

Семинар ЛФВЭ (рук. В. А. Никитин)

26 февраля 2016 г. в 11:30. Большой конференц-зал ЛФВЭ

**К 90-летию со Дня рождения академика
Александра Михайловича Балдина
(26.02.1926 – 29.04.2001)**



А. И. Малахов Вступительные замечания

**П. И. Зарубин «Исследования с релятивистскими ядрами
на нуклотроне ОИЯИ: истоки, достижения,
возможности»**

Представлены возможности научного направления, основанного А. М. Балдиным, - релятивистской ядерной физики - для развития физики ядерных кластеров. Ранние из обсуждаемых наблюдений сделаны на облучениях ядерной эмульсии на синхрофазотроне ОИЯИ в 70–90-е годы. На основе ядерной эмульсии, облучавшейся затем на нуклотроне ОИЯИ, выполнен анализ диссоциации релятивистских изотопов бериллия, бора, углерода и азота, в том числе радиоактивных. Эти результаты позволяют представить картину кластеризации легких ядер, включая роль в них нестабильных ядер ${}^6\text{Be}$, ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$.



Диссоциация ядер служит «лабораторией» для изучения беспрецедентного разнообразия кластерных ансамблей. Дальнейший интерес вызывают концепции разреженной ядерной материи, основанной на конденсации нуклонов в легчайшие ядра. Как аналог атомных квантовых газов рассматривается α -частичный конденсат Бозе-Эйнштейна.

Возникает проблема изучения кластерных ансамблей и несвязанных ядер как компонент квантовых сред. Ансамбли кластеров могут играть роль в нуклеосинтезе, что придает изучению кластеризации значение, выходящее за рамки ядерной структуры.


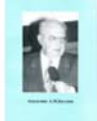



Академик А.М.Балдин

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Академик А.М.Балдин

К 70-летию со дня рождения

-  Вильям Смит. Мои друзья и горы. История одной команды. (2012) rus djvu 4.7 Mb
William Smith. My friends and mountains. The story of one team (2012) rus djvu 4.7 Mb
-  Академик А. М. Балдин. К 75-летию со дня рождения. ОИЯИ, Дубна, 2001 pdf 41 Mb
-  Академик А. М. Балдин к 70-летию со дня рождения. (1996) rus djvu 8 Mb
Academician A.M. Baldin. For the 70th anniversary of his birth(1996) rus djvu 8 Mb

[Home](#)[English](#)[Фотоальбом](#)[статьи о Балдине](#)[Видео](#)[85-летие](#)[фотоархив ЛВЭ](#)

Александр Михайлович Балдин (1926-2001)

Академик Александр Михайлович Балдин, выдающийся ученый в области физики элементарных частиц и атомного ядра, родился 26 февраля 1926 года в Москве на Красной Пресне. В годы Гражданской войны его отец был командиром и комиссаром в знаменитой азинской Железной дивизии. Юность и студенчество Александра Михайловича пришлось на суровые, голодные годы войны и послевоенного восстановления. Он закончил паровозный техникум, стал студентом Московского института инженеров транспорта. Уже в эти годы он осознал свое призвание к научному творчеству. В 1946 г. среди других студентов-отличников он был приглашен продолжить образование во вновь созданном Московском механическом институте боеприпасов, впоследствии Московском инженерно-физическом институте. В 1949 году после окончания Московского инженерно-физического института он был направлен в Физический институт имени П.Н. Лебедева АН СССР, где прошел путь от младшего научного сотрудника до руководителя сектора теоретиков, стал доктором наук и профессором.

Он сформировался как ученый под влиянием блестящей плеяды



<http://veksler.jinr.ru/baldin/>

Владимир Иосифович Векслер (1907-1966)



4 марта 2007 г. исполнилось **100** лет со дня рождения академика Владимира Иосифовича Векслера, физика с мировым именем, лауреата Ленинской премии, Государственной премии СССР и премии "Атом для мира" (США). Владимир Иосифович Векслер - автор важнейших открытий в области физики и техники ускорителей заряженных частиц, основатель и первый руководитель Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

В начале 70-х годов на синхрофазотроне ОИЯИ в Дубне и ускорителе БЕВАЛАК в Беркли были созданы пучки ядер с энергией в диапазоне *нескольких ГэВ на нуклон*. Тем самым возникли предпосылки применения теоретических концепций и экспериментальных методов физики высоких энергий для развития релятивистской теории атомных ядер.

Были проведены циклы исследований методом ядерной эмульсии, на магнитных спектрометрах и на пузырьковых камерах. Их определяющей тенденцией стал поиск универсальных закономерностей в описании столкновений релятивистских составных систем. На этом пути были определены условия выхода на режим предельной фрагментации и масштабно-инвариантное поведение импульсных спектров ядерных фрагментов и мезонов.

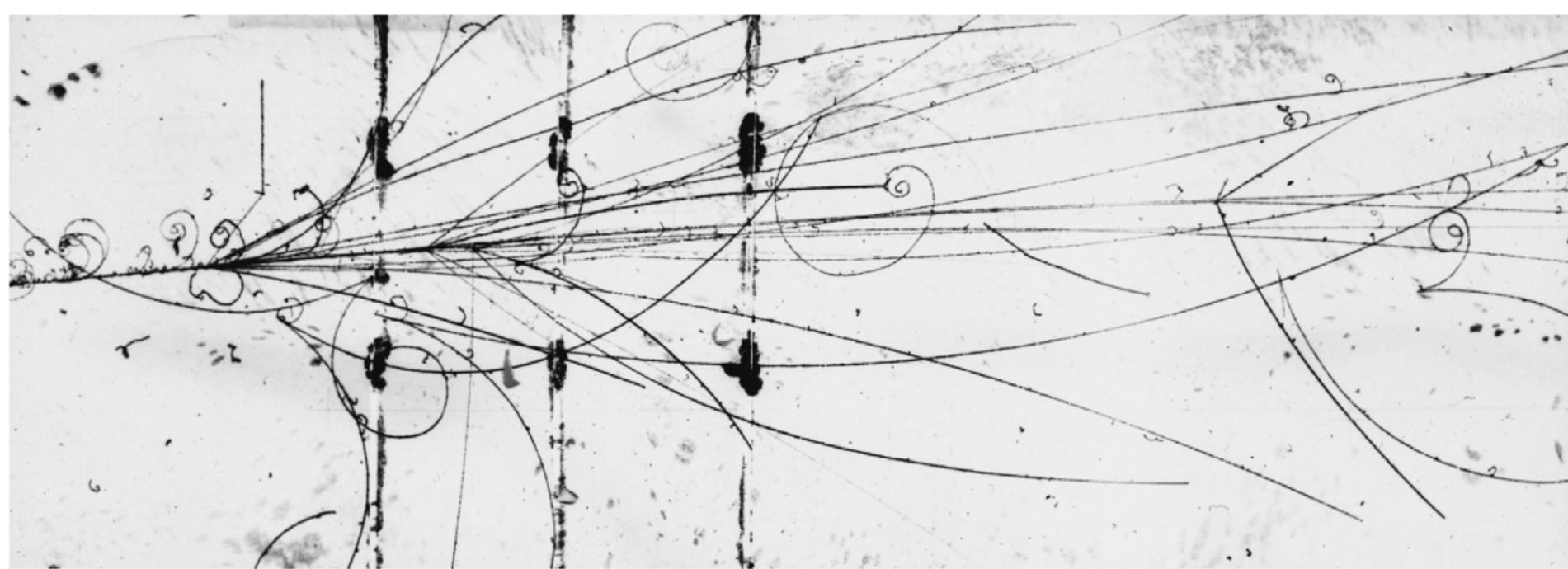
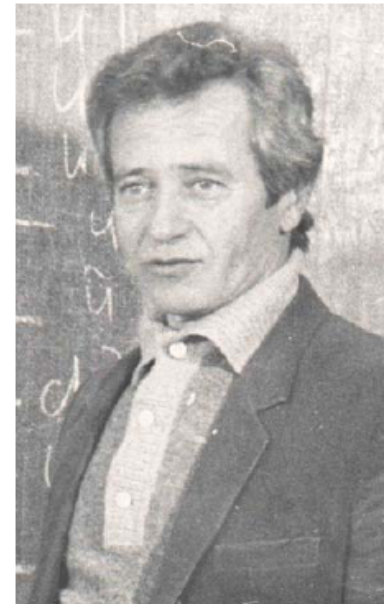
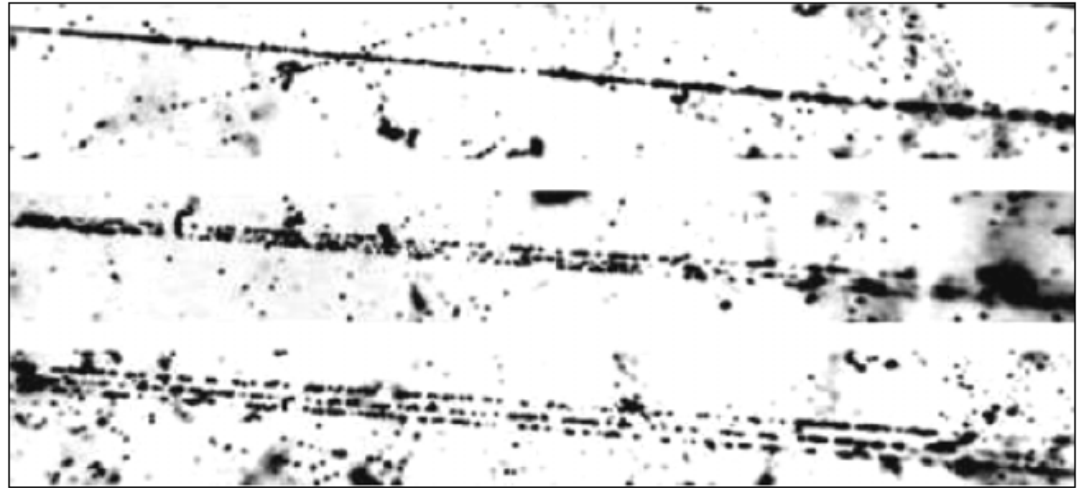
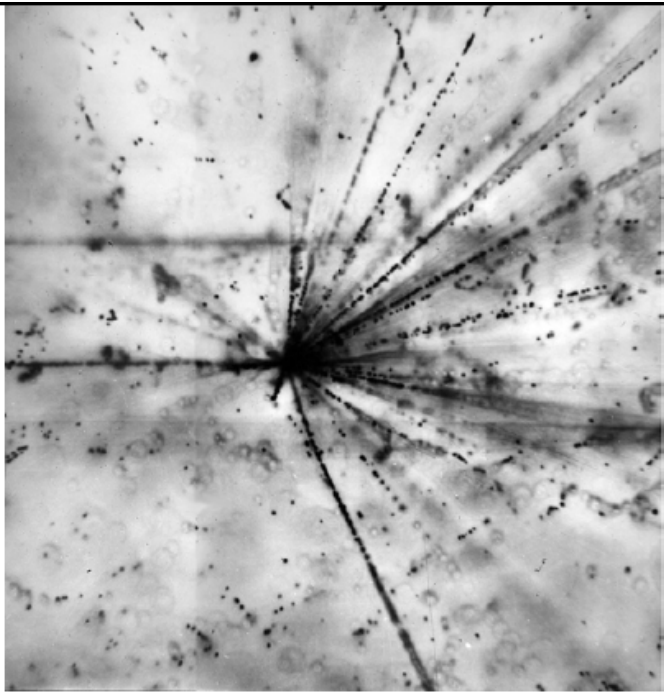


Рис. В.1. Фотография взаимодействия ядра ^{12}C с импульсом $4.5A$ ГэВ/с в пропановой пузырьковой камере (ЛВЭ ОИЯИ, 1974 г.).



Взаимодействия релятивистских ядер в ядерной эмульсии, являющиеся объектом настоящего исследования, начали изучаться еще в период возникновения физики космических лучей в 40-х годах. С начала 70-х по середину 90-х гг. на ускорителях ОИЯИ, ЛБЛ (Беркли), БНЛ (Брукхейвен) и ЦЕРН были получены обзорные сведения о соударениях от легчайших ядер до ядер урана. Особое внимание уделялось взаимодействиям ядер с наибольшей множественностью вторичных частиц. Их трудоемкий анализ мотивировался поиском экзотических ядерных состояний в условиях наибольшей концентрации энергии и плотности материи. Это и внутриядерный каскад, и ударные волны в ядерной материи и, в наибольшей степени, кварк-глюонная плазма.

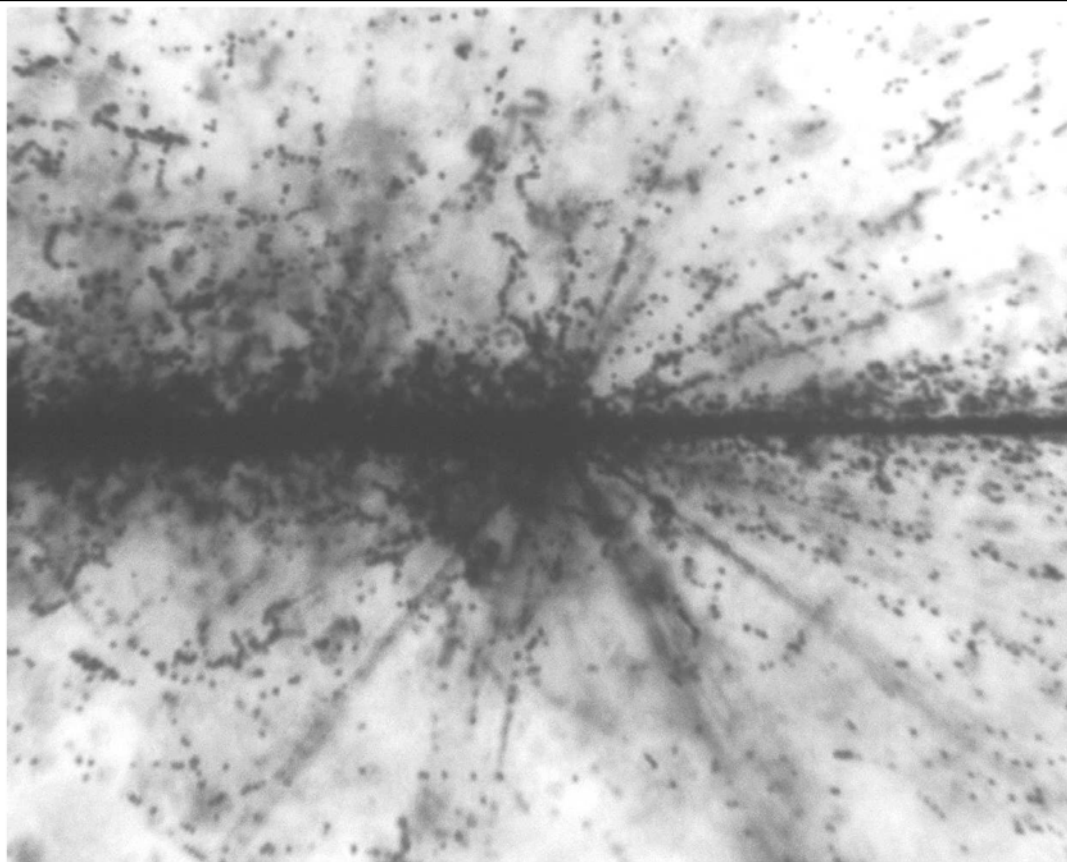
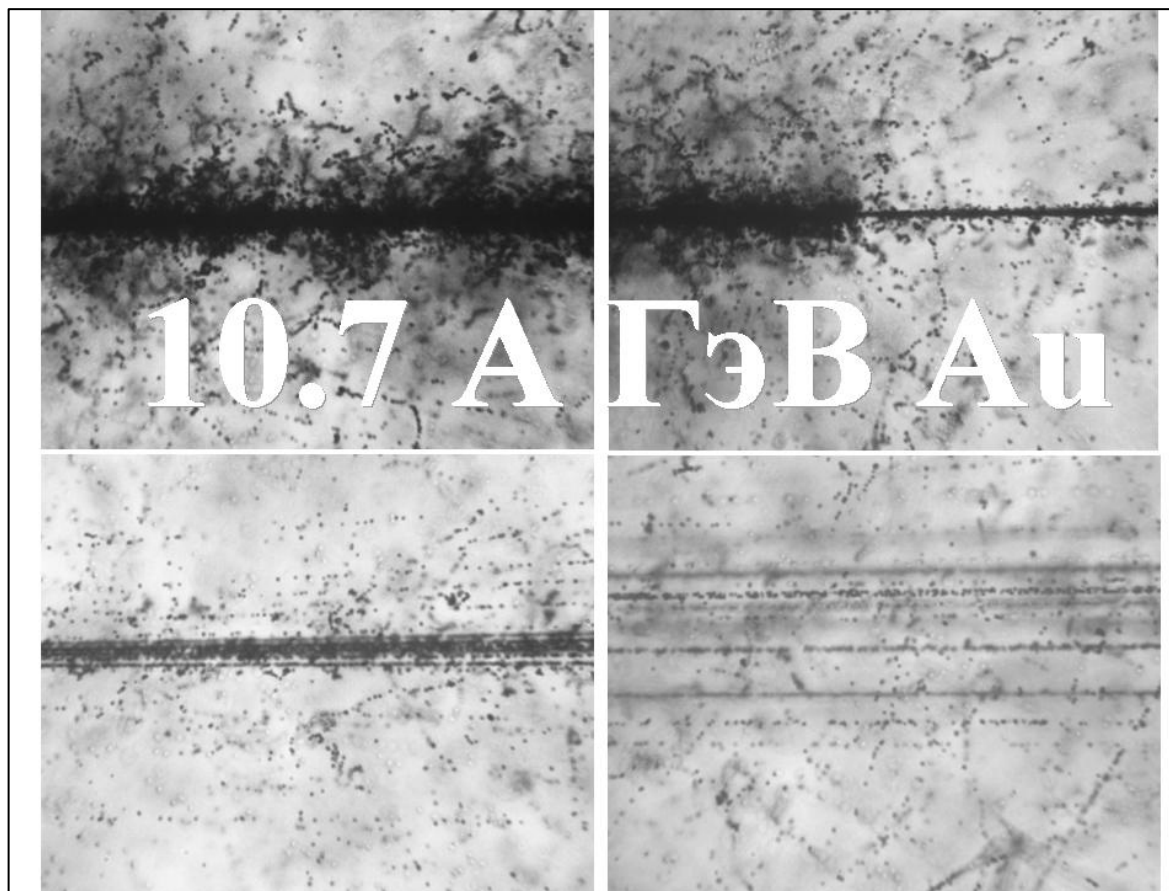


Рис. В.4. Центральное соударение ядра Au с энергией $10.7A$ ГэВ с ядром из состава ядерной эмульсии

Несколько процентов среди наблюдавшихся взаимодействий составили события диссоциации ядер в струи легких и легчайших ядер с суммарным зарядом, как и у начального ядра. Наиболее периферические из них не сопровождались образованием фрагментов мишени и мезонов. Последний класс взаимодействий, определенный как «*когерентная диссоциация ядер*», является предметом настоящего исследования. Согласно наблюдениям в ядерной эмульсии, степень когерентной диссоциации может достигать полного развала на легкие и легчайшие ядра и нуклоны как для легких ядер *O, Ne, Mg* и *Si*, так и тяжелых ядер *Au, Pb* и *U*. Это явление может служить источником кластерных систем беспрецедентной сложности. Данные о нем носят фрагментарный характер, а интерпретация не предложена. Генерация ансамблей фрагментов может протекать через возбужденные состояния, расположенные над порогами связи. Это предположение требует проверок на примерах легких ядер, в том числе радиоактивных, для которых возможна более отчетливая интерпретация. В основе динамики диссоциации тяжелых ядер могут лежать закономерности, устанавливаемые для легких ядер.

Периферические столкновения с диссоциацией ядер могут привести к появлению в конечном состоянии многочастичных комбинаций легчайших ядер с кинематическими характеристиками относительного движения, которые представляют ядерно-астрофизический интерес и которые трудно сформировать в каких-либо других лабораторных условиях. Подчеркнем соответствие между масштабом относительных энергий релятивистских фрагментов и диапазоном температур процессов нуклеосинтеза.



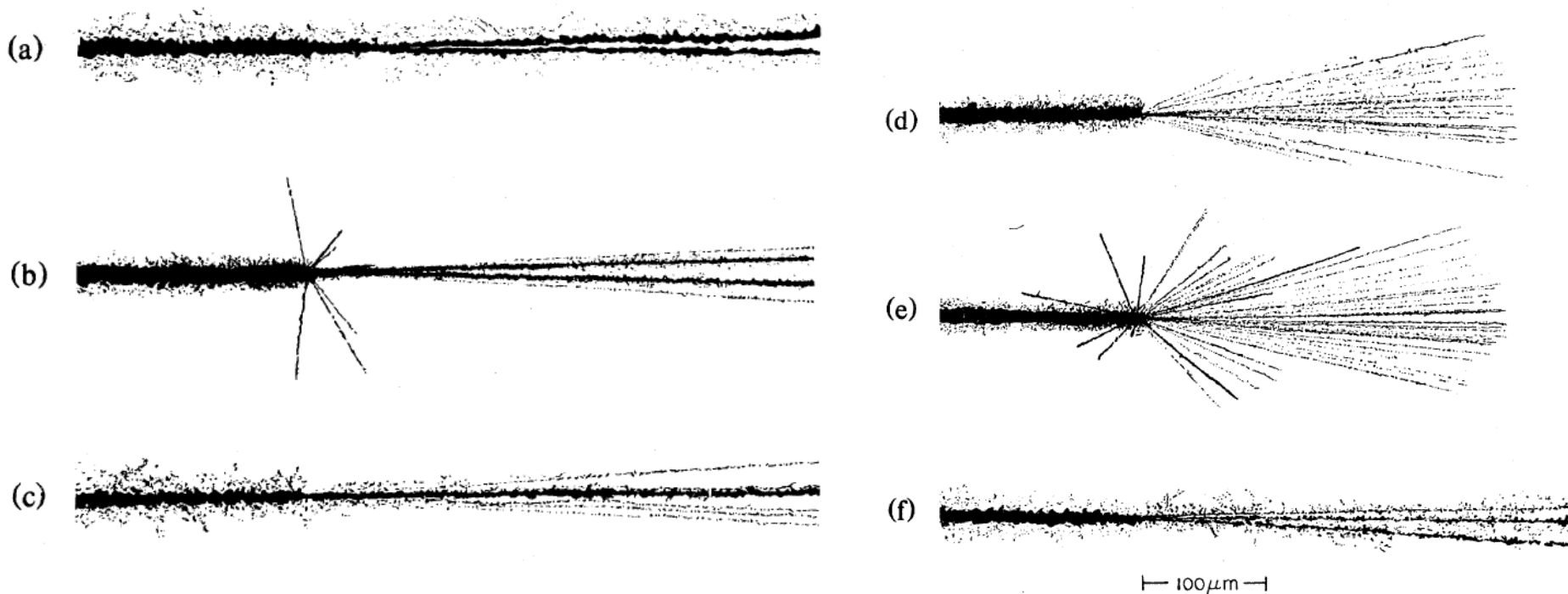
Nuclear collisions of uranium nuclei up to ~ 1 GeV/nucleon

E. M. Friedlander, H. H. Heckman, and Y. J. Karant
*Nuclear Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory,
 University of California at Berkeley, Berkeley, California 94720*

(Received 11 January 1983)

We report observations of inelastic interactions of uranium nuclei with energies up to ~ 1 GeV/nucleon in nuclear emulsions exposed on the occasion of the first successful acceleration of relativistic uranium ions. About one-half of the interactions lead to binary fission. With increasing primary energy, the relative frequency of violent nuclear interactions increases at the expense of binary fissions. Also reported is a range measurement of uranium nuclei in emulsion at 0.945 GeV/nucleon.

FIG. 1. Microprojection drawings of ~ 0.9 GeV/nucleon uranium interactions in nuclear emulsion. (a) "Clean" fission. (b) "Dirty" fission (with both target and additional projectile fragments). (c) $N_h = 0$ event with one heavy projectile fragment. (d) $N_h = 0$ event with only light projectile fragments. (e) "Star" induced in a (Ag-Br) target nucleus. (f) "Ternary" fission.



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

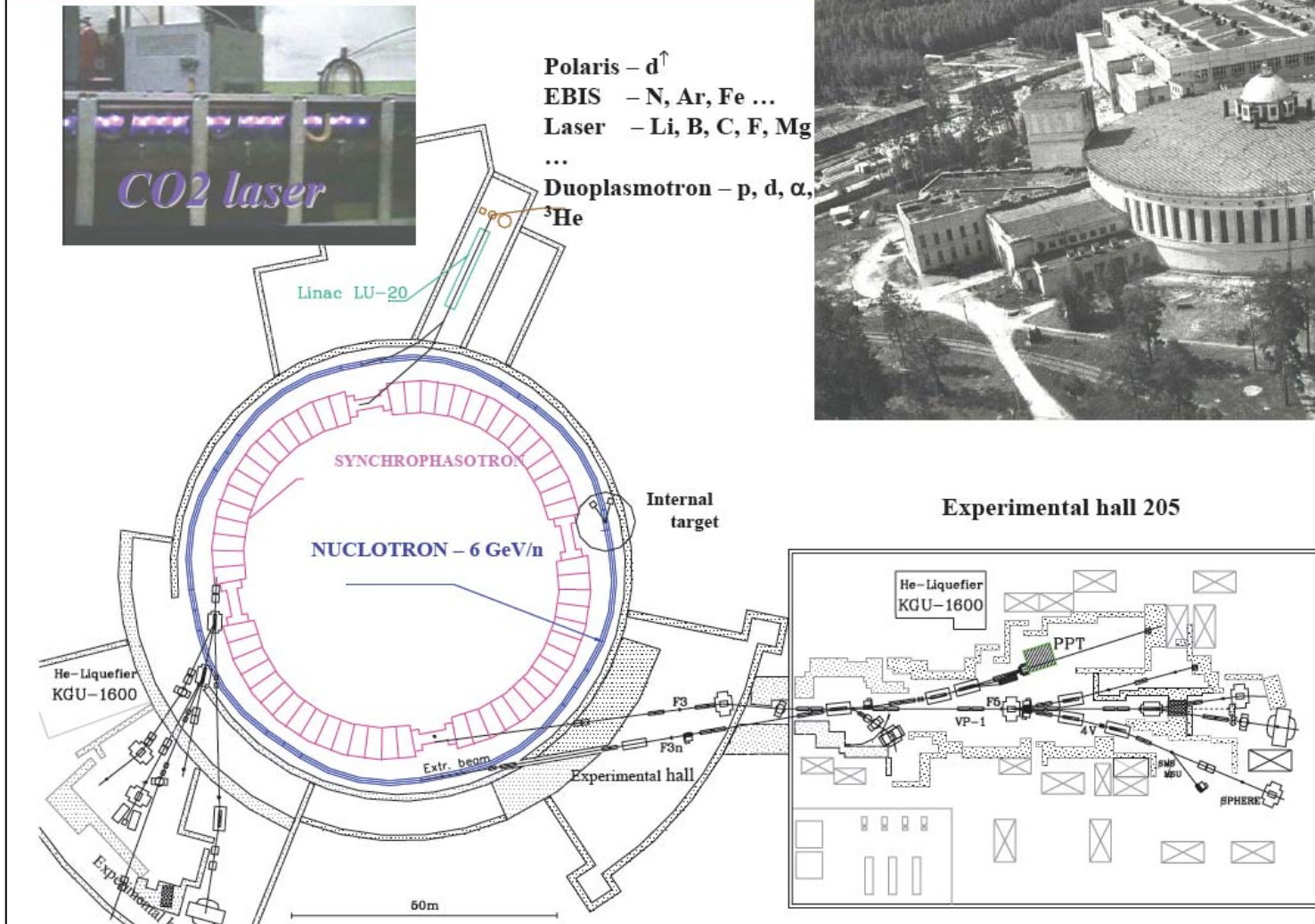
Dubna: Relativistic Nuclei



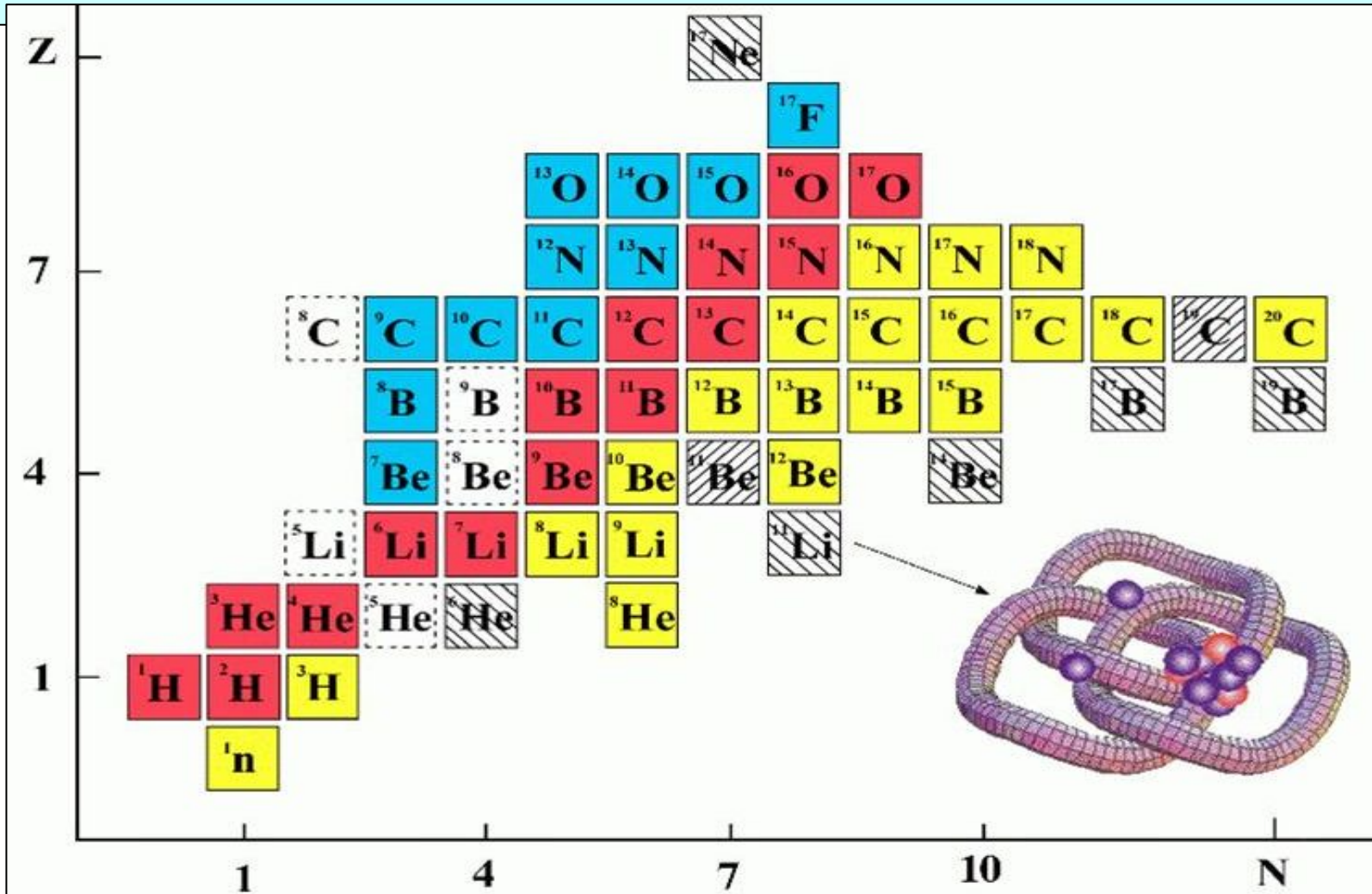
Polaris – d^{\uparrow}
 EBIS – N, Ar, Fe ...
 Laser – Li, B, C, F, Mg
 ...
 Duoplasmatron – p, d, α , ^3He



Experimental hall 205



Исследования ядер у границы нейтронной стабильности, сформировали направление исследований – физика ядер с экзотической структурой. Установлены новые явления в структуре легких ядер и протекании ядерных реакций. Наблюдаются anomalously большие радиусы ядер, образование разделенных в пространстве нуклонных ядерных кластеров. Малая энергия связи указывает на структуру таких ядер как молекулярно-подобную. Успехи достигнуты в изучении ядер с избытком и предельным числом нейтронов, таких как ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$. Открытие экзотических ядер способствовало созданию пучков радиоактивных ядер на многих ускорителях на энергии от десятков МэВ до 1 ГэВ на нуклон. Полное изучение конечных состояний фрагментации для целого семейства легких ядер имеет ценность для развития этого раздела ядерной физики.



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 основных конфигураций нуклонных кластеров.

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

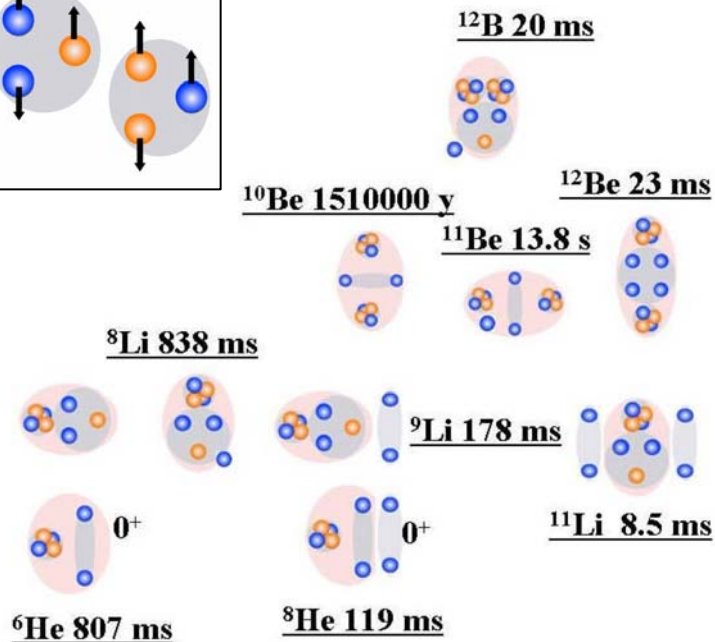
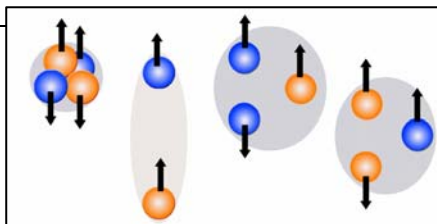
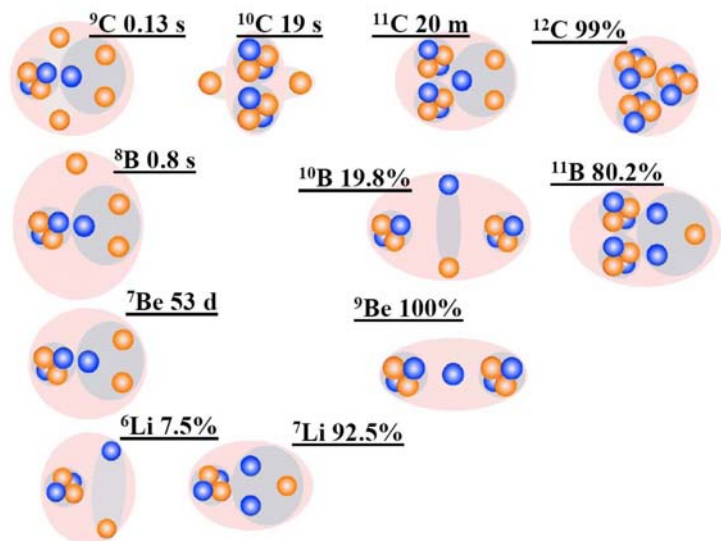


Рис. 1. Диаграмма кластерных степеней свободы в стабильных и нейтронодефицитных ядрах указаны распространенности изотопов или времена жизни; светлые кружки соответствуют протонам, темные - нейтронам; темным фоном выделены кластеры

Рис. 1.12. Диаграмма кластерных степеней свободы в легких нейтроноизбыточных ядрах

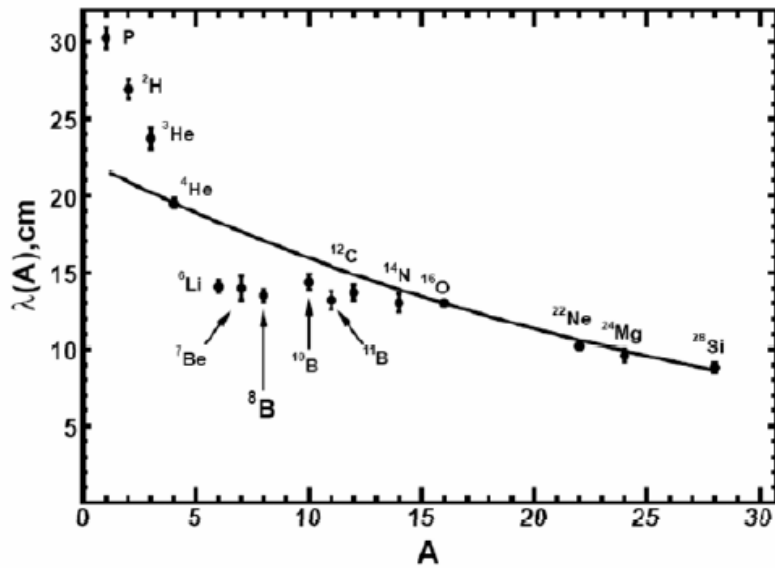


Рис. II.11 Данные по пробегам легких ядер в эмульсии, включая измерения настоящей работы (^7Be , ^8B , $^{10,11}\text{B}$, ^{14}N)

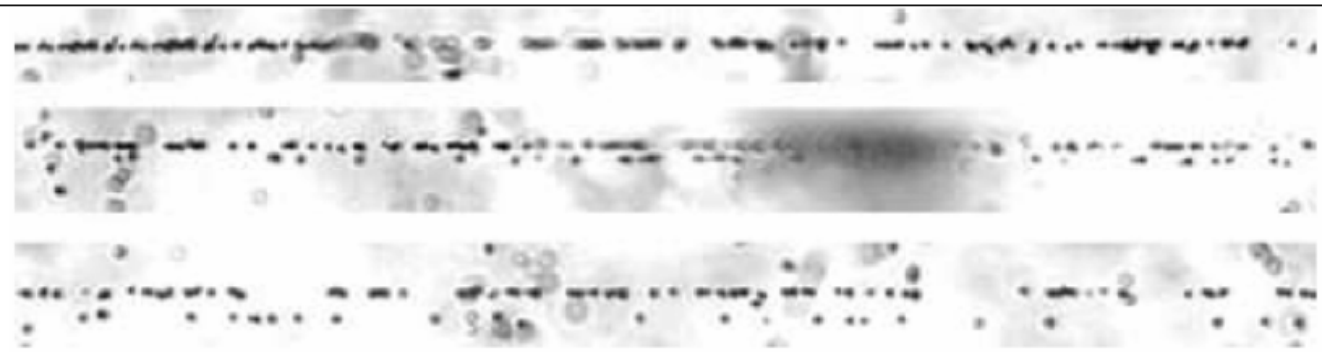
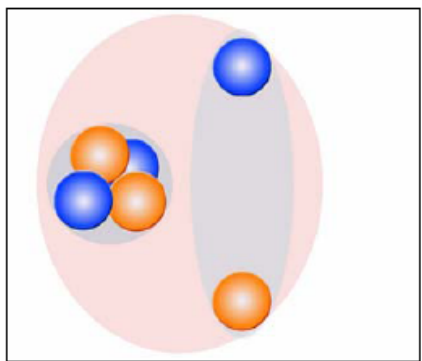


Рис II.12. Фрагментация релятивистского ядра ^6Li на одно- и двухзарядный фрагмент в эмульсии; на верхней фотографии видна вершина взаимодействия и узкая струя их двух фрагментов; при смещении вдоль струи фрагментов (нижние фотографии) отчетливо разделяются один однозарядный и один двухзарядный фрагменты

Возникли целостные представления, унифицировавшие разнообразные явления множественного рождения частиц в обширном энергетическом масштабе. Как обобщение этих концепций, А. М. Балдиным были предложены принципы ослабления корреляций и автомодельности, удовлетворяющие условию релятивистской инвариантности. Кинематика множественного рождения представляется в пространстве 4-скоростей $u_i = P_i/m_i$ в безразмерных релятивистски-инвариантных переменных

$$b_{ik} = - (P_i / m_i - P_k / m_k)^2 = - (u_i - u_k)^2 = 2[(u_i u_k) - 1]$$

где P_i – 4-импульсы частиц, участвующих в реакции, а m_i – их массы.

Оптимальный выбор исследуемой области b_{ik} возможен как вариацией энергии столкновения, так и оптимальным выбором кинематической области регистрации вторичных частиц. Диапазон $b_{ik} < 10^{-2}$ соответствует взаимодействию ядер как слабосвязанных нуклонных систем при возбуждении вблизи энергии связи. Эта область является областью явлений классической ядерной физики. В ситуации некоррелированного образования групп релятивистских фрагментов описание их спектров могло бы свестись к построению суперпозиции универсальных функций. Однако, удовлетворяя обобщающим принципам, физика релятивистской фрагментации оказывается сложнее и богаче.

Несмотря на то, что возможности релятивистского подхода к изучению ядерной структуры были осознаны достаточно давно, электронные эксперименты не смогли приблизиться к детальности наблюдения ансамблей релятивистских фрагментов, обеспечиваемой ядерной эмульсией. Продолжающаяся пауза в этом отношении привела к идее очередного применения ядерной эмульсии на нуклотроне ОИЯИ во впервые формировавшихся пучках легких ядер. Выбор ядерной эмульсии обусловлен уникальной полнотой наблюдения релятивистских фрагментов. Решающее значение для кластерной спектроскопии имеет угловое разрешение, а, значит, лежащее в его основе пространственное разрешение, которое составляет для ядерной эмульсии рекордную величину 0.5 мкм. Следующее по важности требование – это ориентация на ускоренный поиск и измерение именно периферических взаимодействий, чтобы исследовать каналы диссоциации с малыми сечениями. Конечная цель – это установление фактов возникновения необычных конфигураций нуклонных кластеров с их идентификацией и метрологией.

Конфигурационное перекрытие основных состояний ядер с конечными состояниями наиболее полно проявляется при диссоциации на периферии ядер мишени.

Периферические реакции содержат все наблюдаемые характеристики, которые могут быть использованы для интерпретации кластерных состояний.

Диссоциация протекает без перекрытия плотностей сталкивающихся ядер и с передачей возбуждения вблизи энергии связи.

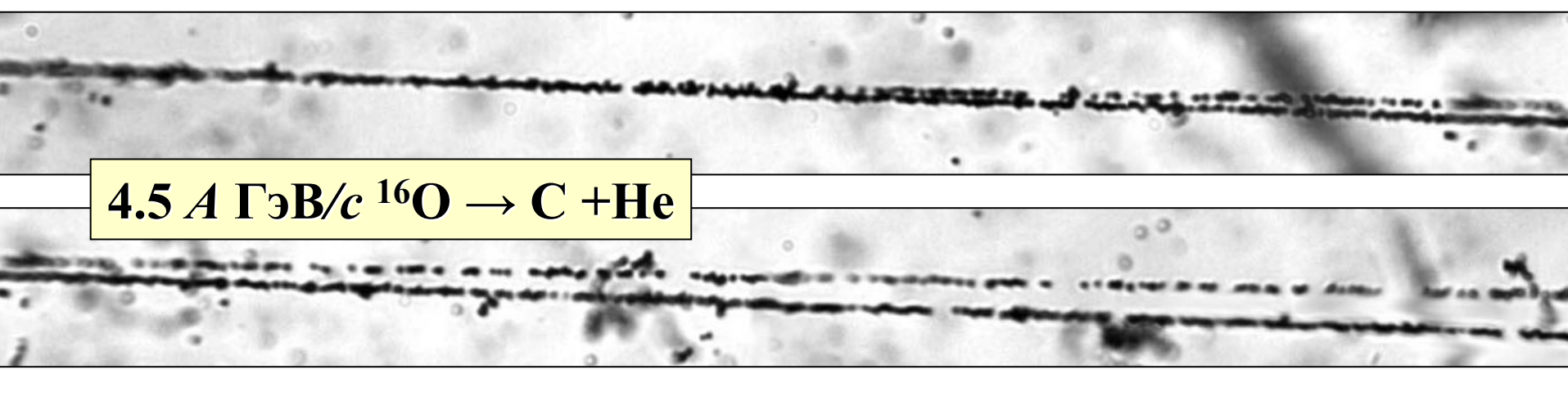
Определение взаимодействий как периферических упрощается при энергии свыше 1 А ГэВ благодаря коллимации фрагментов.

Соблюдается приблизительное равенство импульсов на нуклон релятивистского ядра и его фрагментов, что компенсирует отсутствие измерений импульсов.

Пороги детектирования фрагментов отсутствуют, а энергия, теряемая ими в веществе детекторов, минимальна.

Инвариантное представление позволяет связать характеристики ансамблей фрагментов с выводами физики низких энергий.

Доступно единообразное изучение когерентной диссоциации возможно большего разнообразия ядер, соседствующих в начале таблицы изотопов, в том числе радиоактивных.



$4.5 \text{ А ГэВ}/c \text{ } ^{16}\text{O} \rightarrow \text{C} + \text{He}$

Этапы настоящего исследования оказались тесно связанными с новыми возможностями, возникавшими с развитием нуклотрона ОИЯИ в 2000-е годы.

В завершающий период работы синхрофазотрона ОИЯИ (1999 г.) был получен первый опыт анализа облучения во вторичном пучке смеси ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ с импульсом 2.67А ГэВ/с.

В 2002 г. сотрудничеством БЕККЕРЕЛЬ была выдвинута программа облучений ядерной эмульсии, целью которой стало систематическое изучение картины периферической фрагментации легких ядер.

Вывод пучка на нуклотроне ОИЯИ (2002 г.) позволил выполнить облучение ядрами ${}^{10}\text{B}$ с импульсом 1.8А ГэВ/с. В диссоциации ${}^{10}\text{B}$ была установлена кластеризация $2\alpha + d$, что мотивировало облучения ядрами ${}^{14}\text{N}$ с импульсом 2.9А ГэВ/с для изучения кластеризации $3\alpha + d$, а также ядрами ${}^{11}\text{B}$ с импульсом 2.75А ГэВ/с для изучения кластеризации $2\alpha + t$.

Интерес к ядру ${}^{11}\text{B}$ ускорил анализ кластеризации $\alpha + t$ в предшествующем облучении ядрами ${}^7\text{Li}$ с импульсом 3А ГэВ/с на синхрофазотроне ОИЯИ.

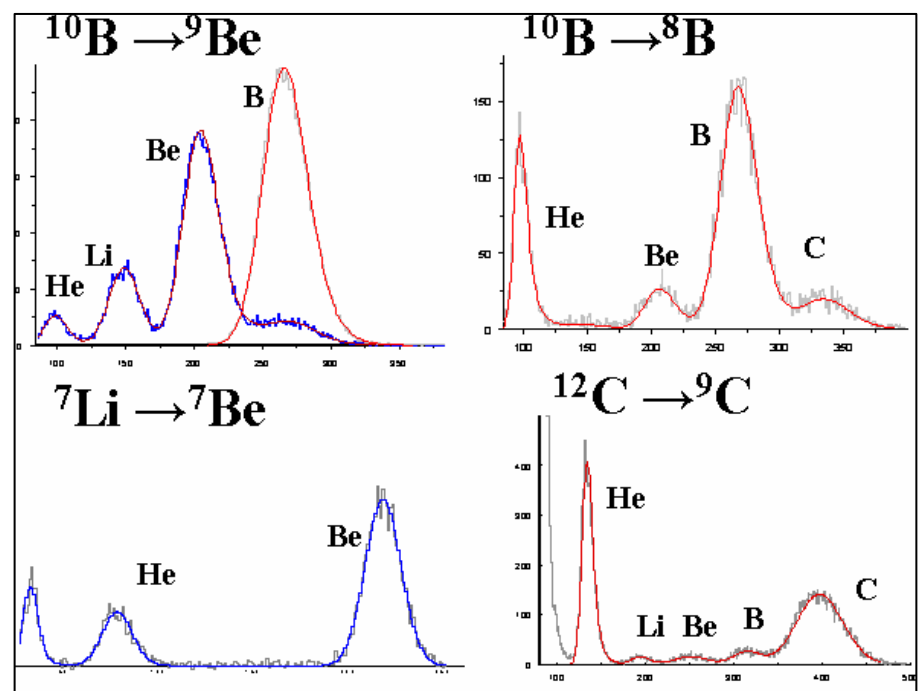
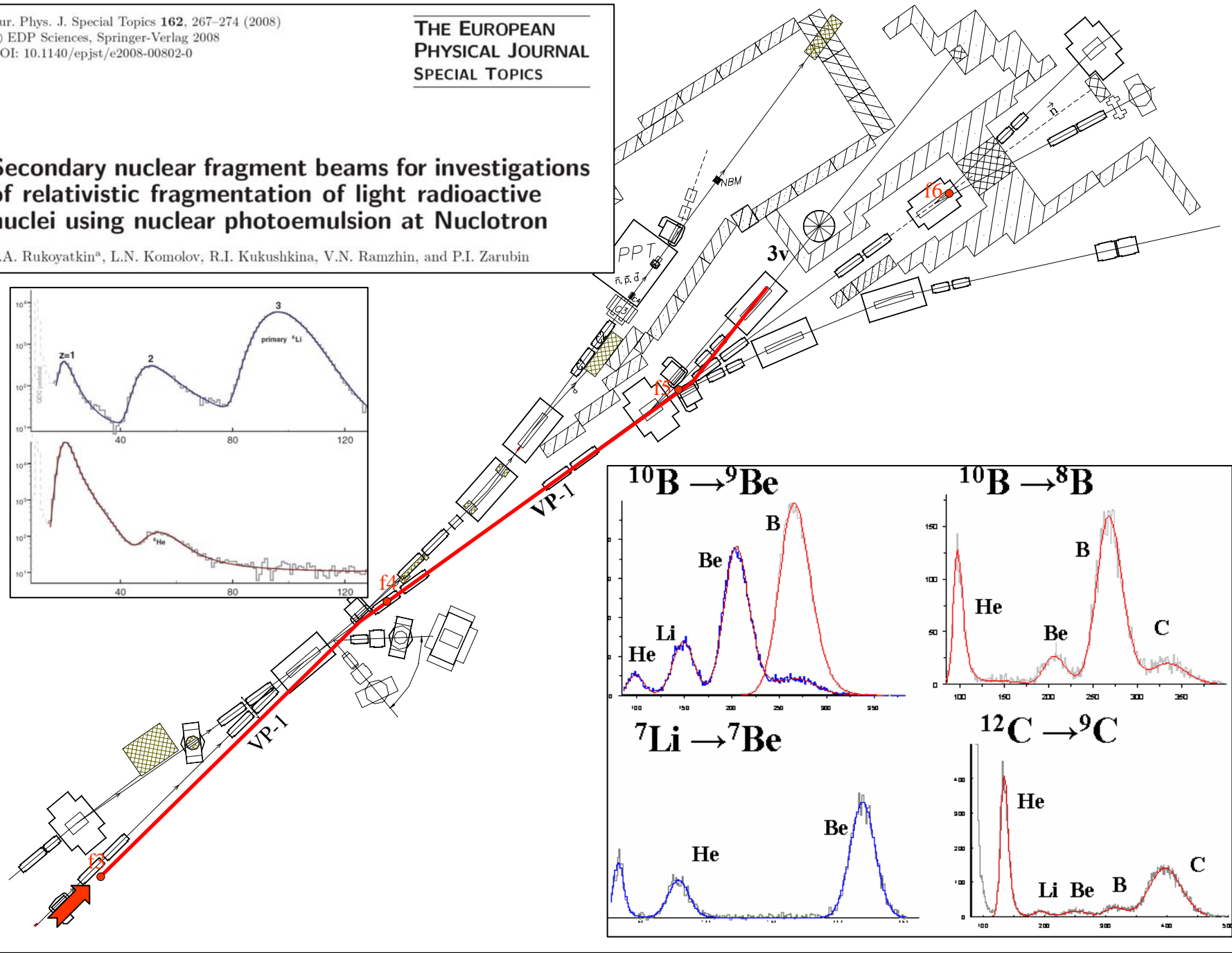
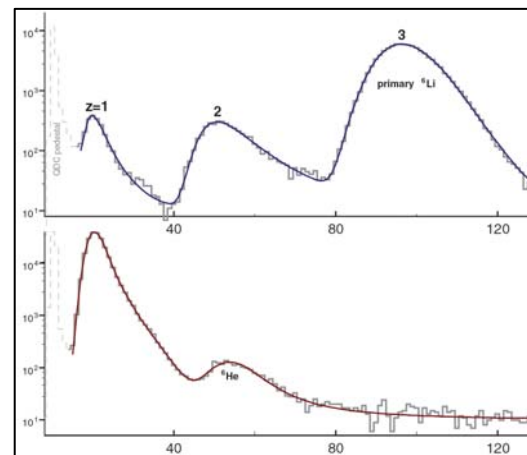
Для развития представлений о кластеризации на основе ${}^3\text{He}$ выполнено облучение во вторичном пучке ядер ${}^7\text{Be}$ с импульсом 2.1 А ГэВ/с, сформированном в реакциях перезарядки первичных ядер ${}^7\text{Li}$ (2004-5 гг.).

Ускорение ядер ${}^{10}\text{B}$ позволило создать вторичные пучки изотопов ${}^9\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ с импульсом 2 А ГэВ/с в оптимальных условиях для облучения и анализа.

Итоги этих облучений дали основания для последующих облучений в пучках изотопов ${}^9,{}^{10}\text{C}$, ${}^{12}\text{N}$ с импульсом 2 А ГэВ/с, формируемых во фрагментации или перезарядке первичных ядер ${}^{12}\text{C}$ (2005-6 гг.).

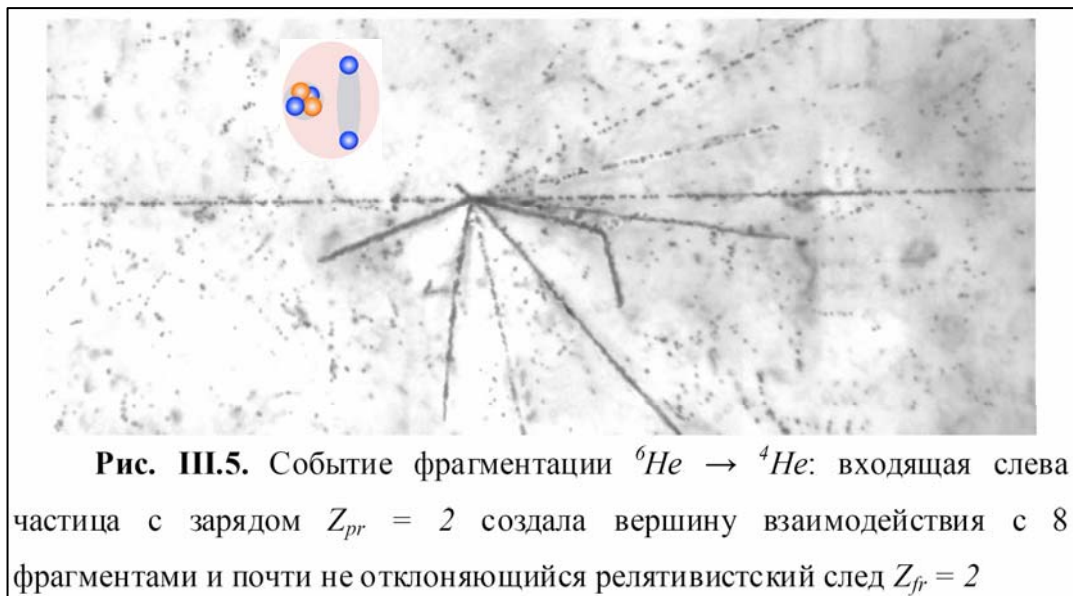
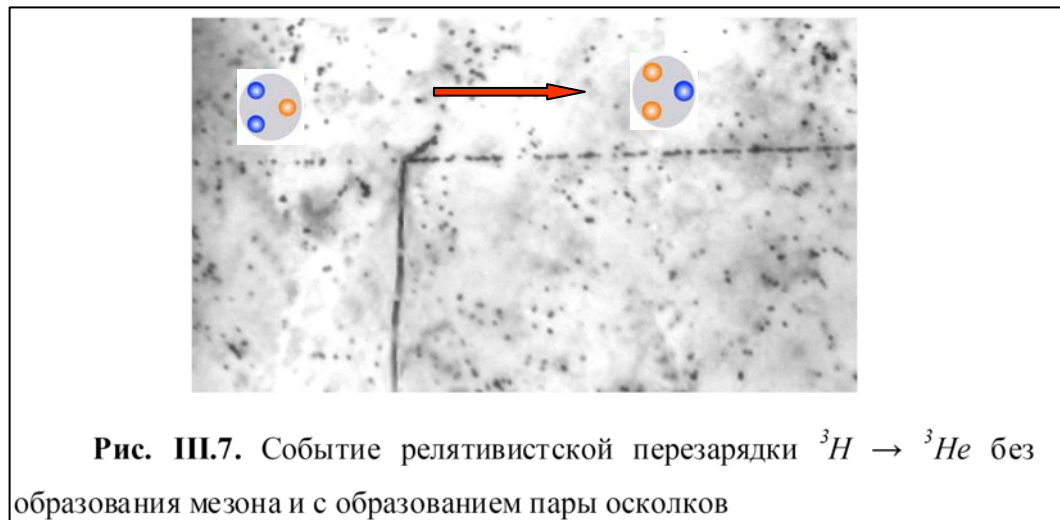
Secondary nuclear fragment beams for investigations of relativistic fragmentation of light radioactive nuclei using nuclear photoemulsion at Nuclotron

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



Облучение ядерной эмульсии в смешанном пучке релятивистских ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^3\text{H}$, сформированном при перезарядке и фрагментации первичных ядер ${}^6\text{Li}$. Получено указание на узкое распределение по P_T^{α} для диссоциации ${}^6\text{He}$, в котором проявляется структурная особенность этого ядра – нейтронное гало. Вклад когерентного взаимодействия в сечение диссоциации составляет не менее 20%. Попутное исследование взаимодействий ядер ${}^3\text{H}$ и зарядово-обменного процесса ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$, стало возможным из-за доминирующего вклада в состав пучка ядер ${}^3\text{H}$.

Ядро	$\langle P_T^{4\text{He}} \rangle$, МэВ/с
${}^4\text{He}$	239 ± 12
${}^6\text{Li}$	144 ± 10
${}^6\text{He}$	90 ± 15
${}^{12}\text{C}$	238 ± 8



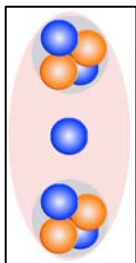
Исследование 2α -частичной фрагментации ядра ${}^9\text{Be}$

Ядро ${}^9\text{Be}$ демонстрирует свойства слабосвязанной системы $2\alpha + n$, что делает его источником генерации α -частичных пар без комбинаторных усложнений.

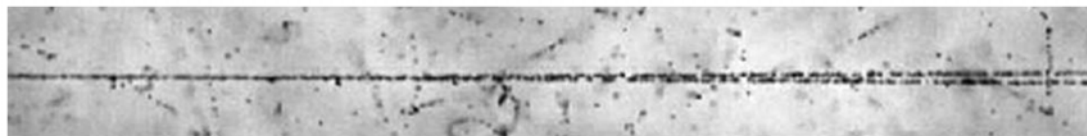
$$\left| {}^9\text{Be}(3/2^-) \right\rangle = \varpi_{0^+} \left| [{}^8\text{Be}(0^+) \otimes n_{p(3/2)}]_{3/2^-} \right\rangle + \varpi_{2^+} \left| [{}^8\text{Be}(2^+) \otimes n_{p(3/2)}]_{3/2^-} \right\rangle$$

где $\varpi_{0^+} = 0.535$ и $\varpi_{2^+} = 0.465$ – весовые коэффициенты двухтельной модели, использованной для вычисления магнитного момента ядра ${}^9\text{Be}$.

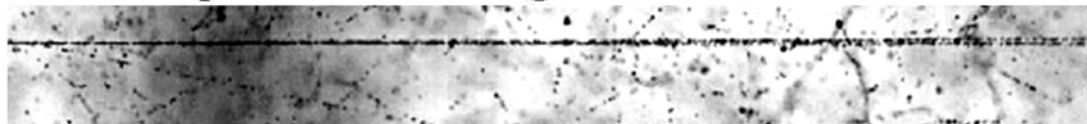
В результате ускоренного сканирования найдено 362 события фрагментации ядра ${}^9\text{Be}$ при с образованием двух α -частиц в конусе с углом раствора до 0.1 рад (примеры на рис. 5).



«белая» звезда



звезда с протоном отдачи (g-частицей)



звезда с тяжелым осколком (b-частицей)

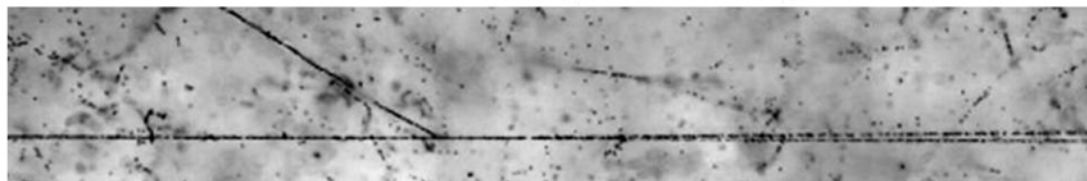
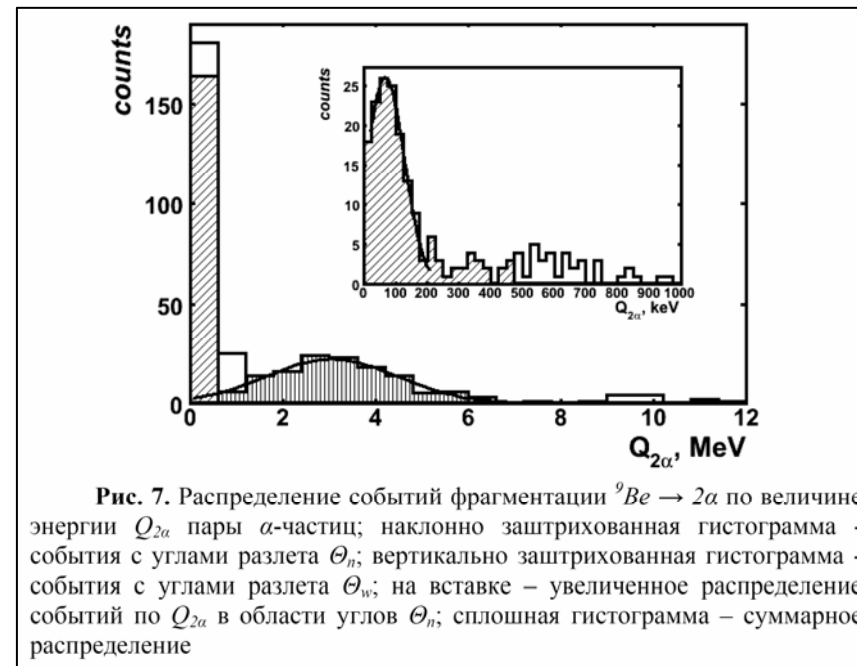
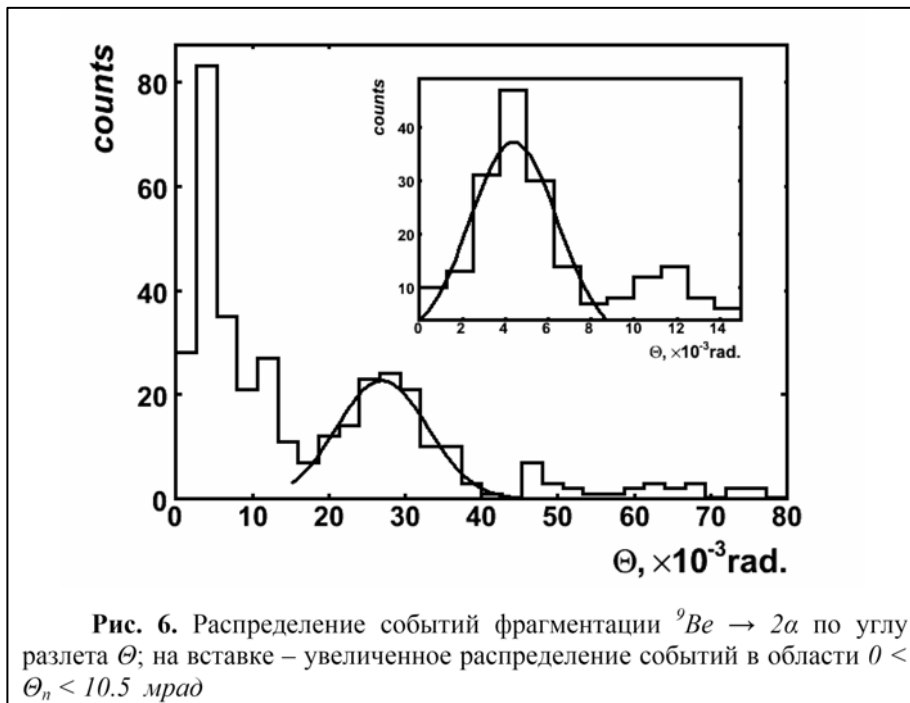
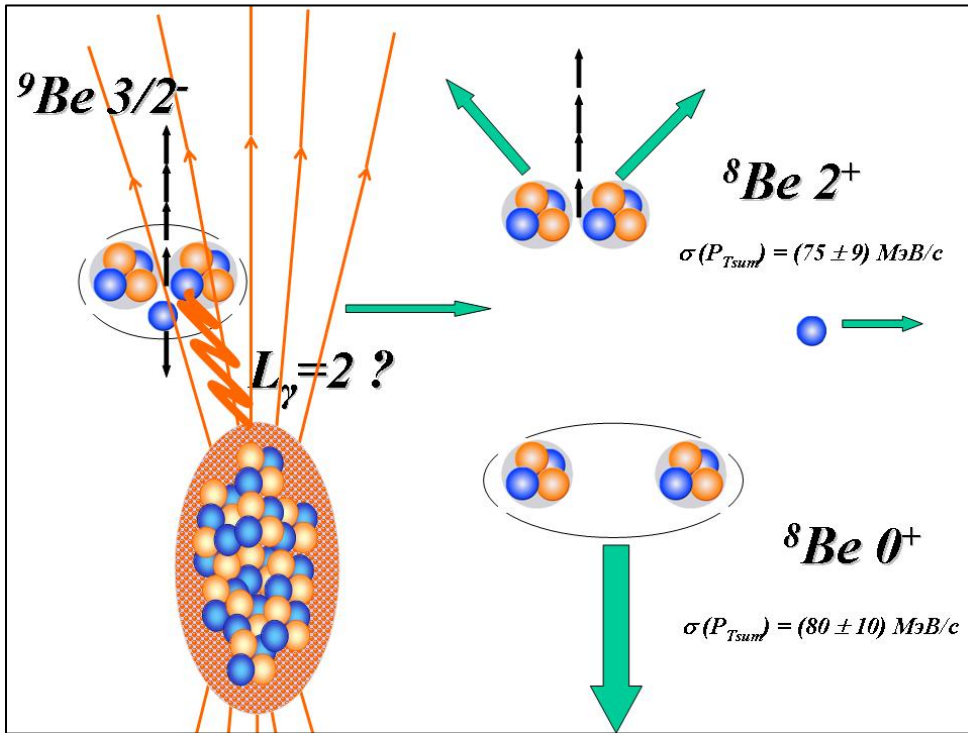


Рис. 5. Микрофотография событий фрагментации ядра ${}^9\text{Be}$ с образованием двух α -частиц в переднем конусе фрагментации



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



Θ , мрад	Доля (событий)
Θ_n (0 - 10.5)	0.56 ± 0.04 (164)
Θ_w (15.0 - 45.0)	0.44 ± 0.04 (130)

Доли событий Θ_n и Θ_w соответствуют весам состояний 0^+ and 2^+ основы ${}^8\text{Be}$, принятым в 2-тельной модели, $\omega_{0^+} = 0.535$ и $\omega_{2^+} = 0.465$ [1,2].

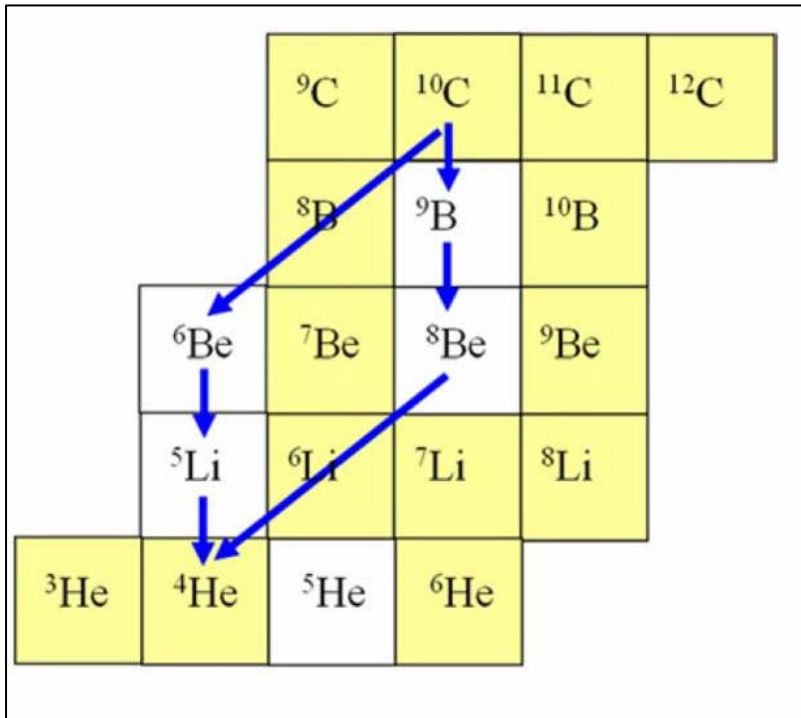
1. Y. L. Parfenova and Ch. Leclercq-Willain, «Hyperfine anomaly in Be isotopes and neutron spatial distribution: A three-cluster model for ${}^9\text{Be}$ », Phys. Rev. C 72, 054304 (2005).

2. Y. L. Parfenova and Ch. Leclercq-Willain, «Hyperfine anomaly in Be isotopes in the cluster model and the neutron spatial distribution», Phys. Rev. C 72, 024312(2005)

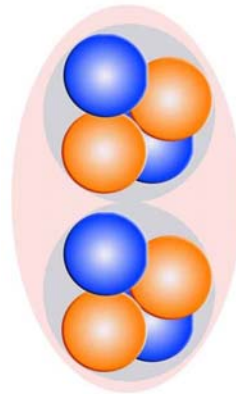
Представленные данные можно рассматривать как доказательство того, что в структуре ядра ${}^9\text{Be}$ с высокой вероятностью имеется кор в виде двух состояний ядра ${}^8\text{Be}$ и внешнего нейтрона. Полученные результаты согласуются с теоретическими работами по описанию структуры ядра ${}^9\text{Be}$,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

Основной целью исследования ядер с избытком протонов является, изучение структурной связи протонов, изучение влияния заряда на образование кластерных структур и образование протонного гало, а также изучение нестабильных ядер основы.

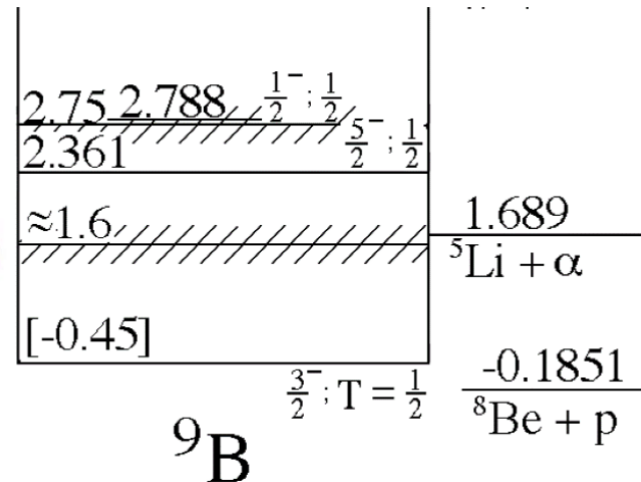
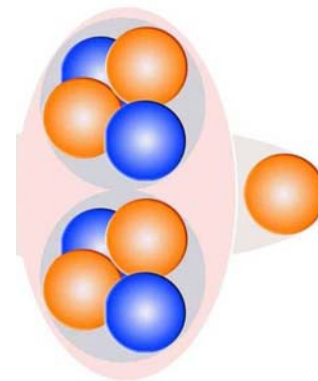
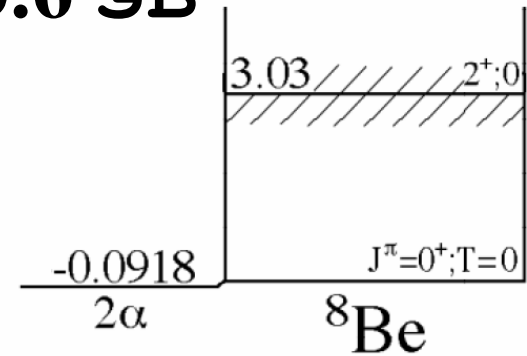
Использование ядерной эмульсии для изучения релятивистской фрагментации радиоактивных ядер с протонным избытком имеет особые преимущества благодаря большой полноте наблюдения конечных состояний.



$\Gamma = 0.54$ кэВ



$\Gamma = 5.6$ эВ



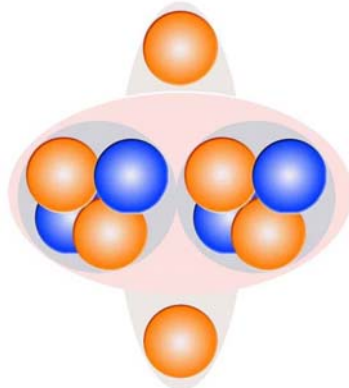
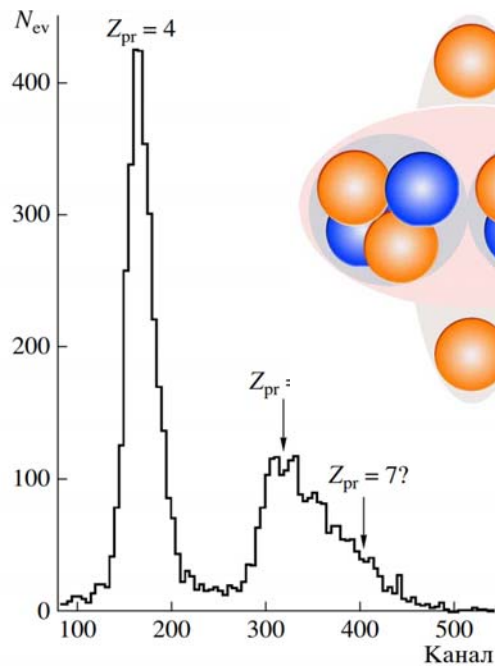
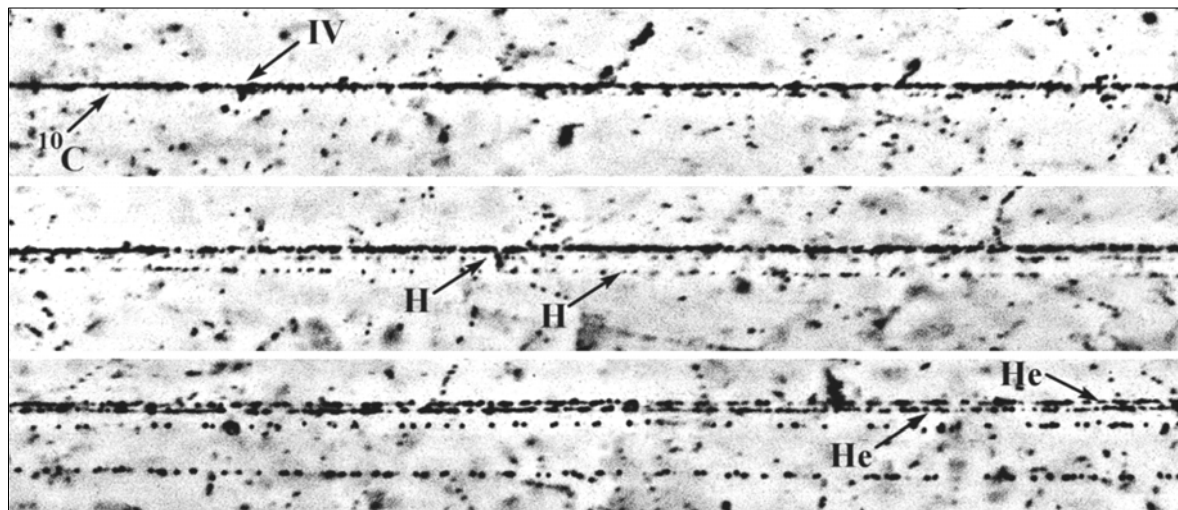
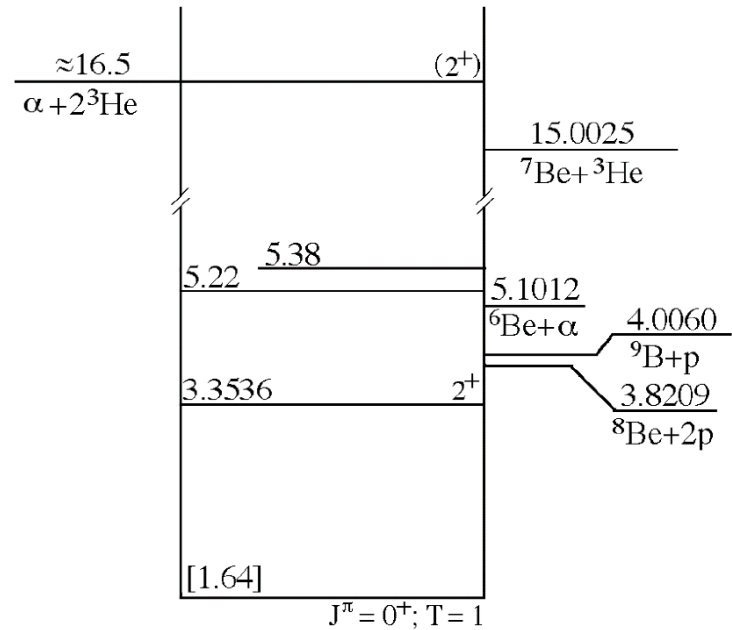


Таблица I.3. Распределение по каналам диссоциации числа «белых» звезд N_{ws} и обитий с фрагментами мишени или рожденными мезонами N_{if} .

Канал	N_{ws}	100%	N_{if}	100%
2He + 2H	186	81.9	361	57.6
He + 4H	12	5.3	160	25.5
3He	12	5.3	15	2.4
6H	9	4.0	30	4.8
Be + He	6	2.6	17	2.7
B + H	1	0.4	12	1.9
Li + 3H	1	0.4	2	0.3
$^{12}C + n$	-	-	30	4.8

Рис. I.2. 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 .

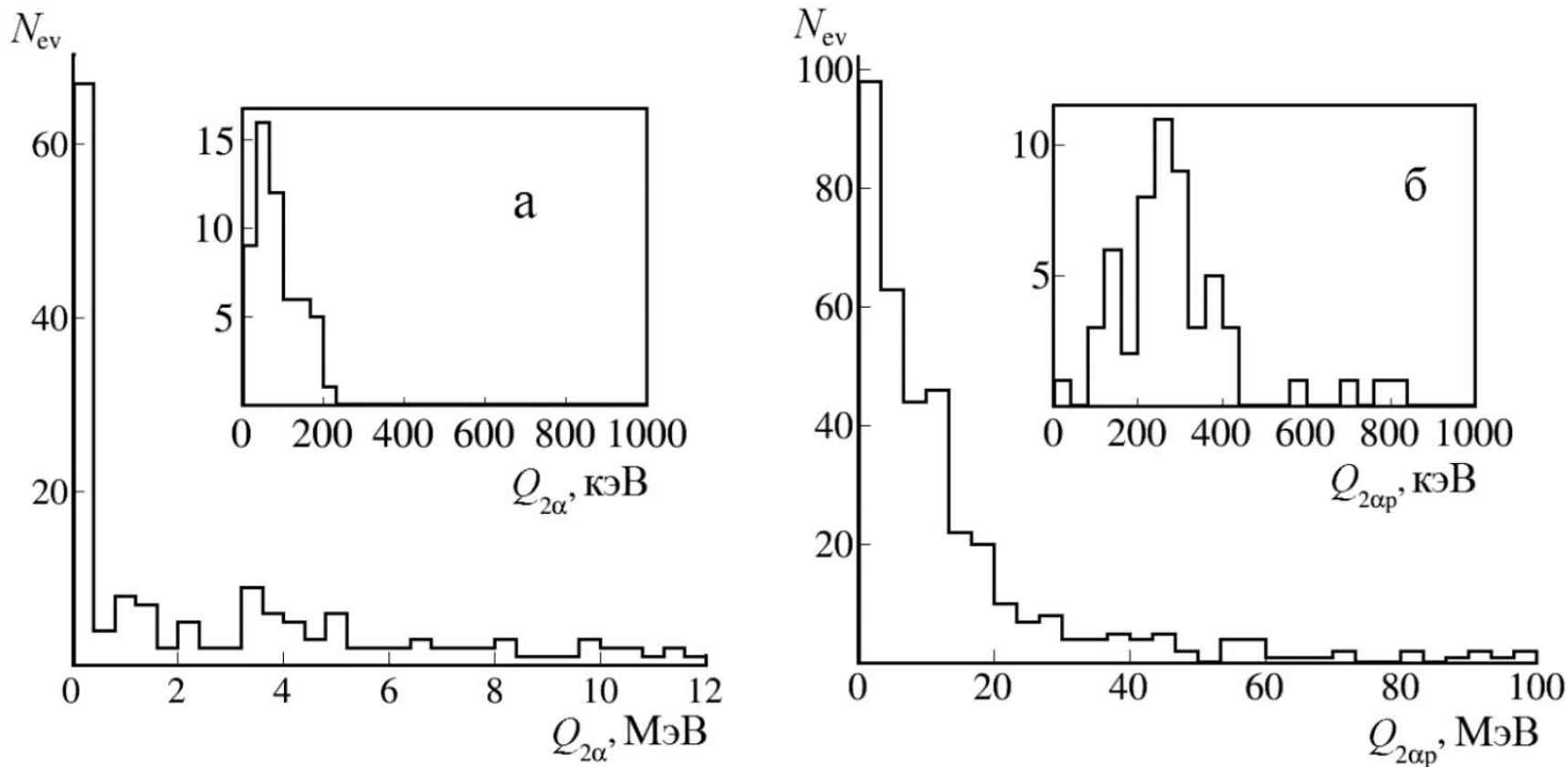
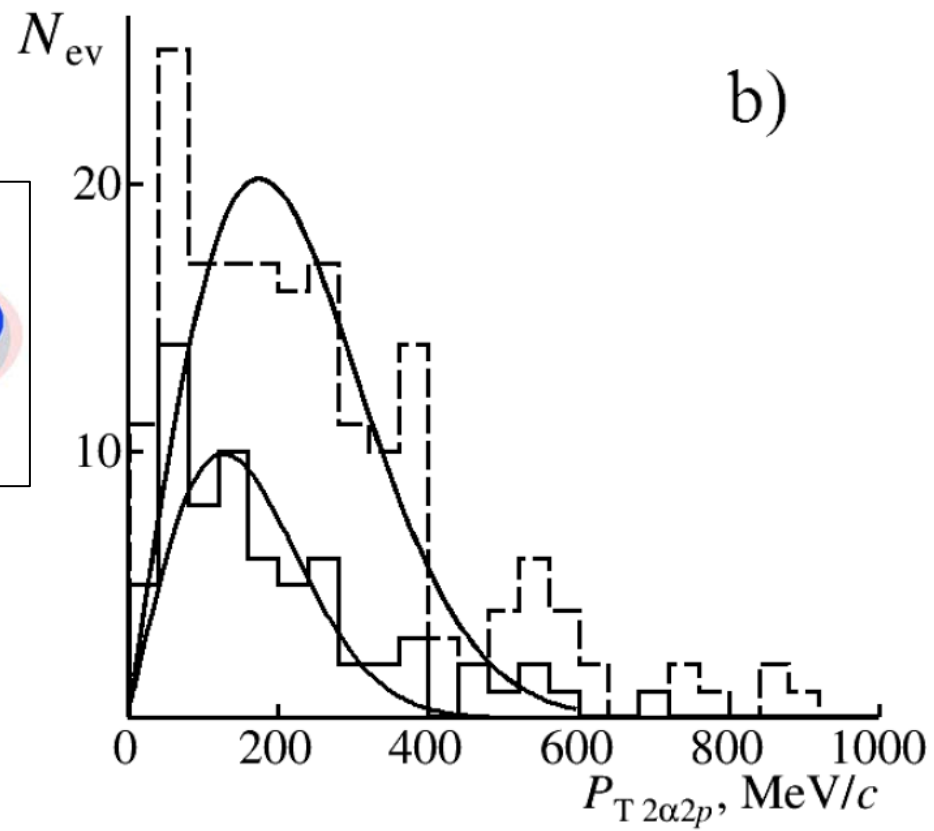
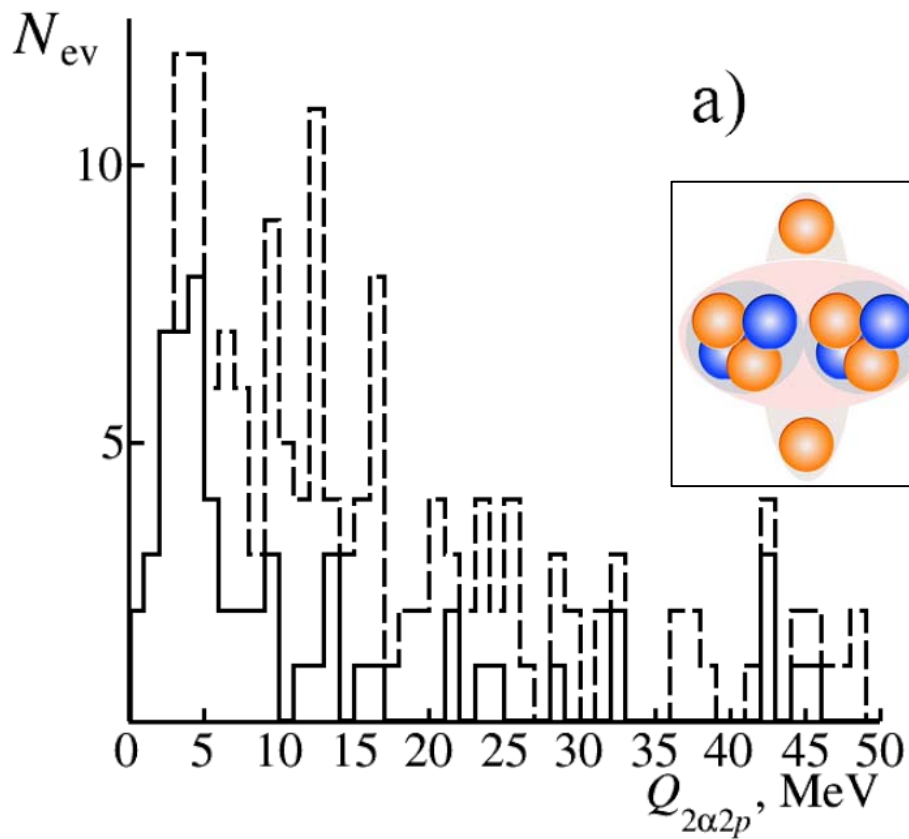
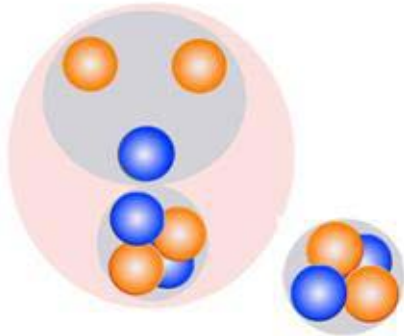


Рис. III.1. Распределение «белых» звезд $^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 2p$ по энергии возбуждения $Q_{2\alpha}$ пар α -частиц; на вставке – увеличенное распределение $Q_{2\alpha}$ (а); распределение событий $Q_{2\alpha p}$ троек $2\alpha + p$; на вставке – увеличенное распределение $Q_{2\alpha p}$ (б).

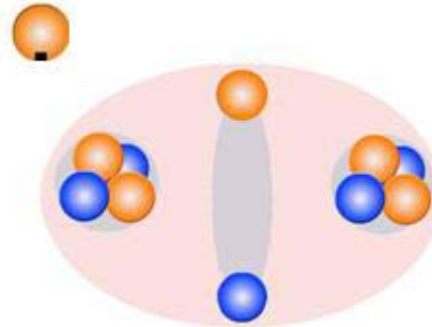
В структуре ядра ^{10}C с вероятностью $(30 \pm 4) \%$ проявляется нестабильное ядро ^9B , а нестабильное ядро ^8Be проявляет себя только как компонента ^9B .



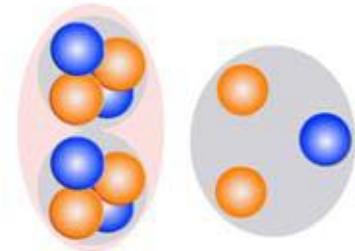
Распределение $Q_{2\alpha 2p}$ «белых» звезд ^{10}C , содержащих ^9B , отличается четкий пик с максимумом при 4.1 ± 0.3 МэВ и RMS 2,0 МэВ. Статистика пика составляет 17 ± 4 % от общего числа «белых» звезд ^{10}C или 65 ± 14 % от содержащих ^9B .



7.6 MeV



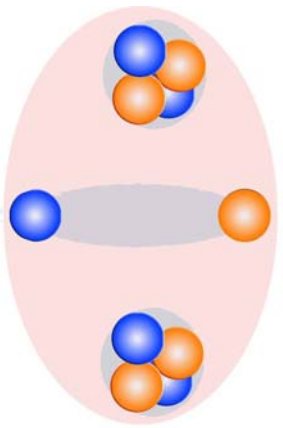
8.7 MeV



9.2 MeV

Channel	¹² C	¹¹ C	¹⁰ C	⁹ C
B + H		6 (5 %)	1 (0.4 %)	15 (14 %)
Be + He		18 (13 %)	6 (2.6 %)	
Be + 2H				16 (15 %)
3He	100 (100 %)	25 (17 %)	12 (5.3 %)	16 (15 %)
2He + 2H		72 (50 %)	186 (82 %)	24 (23 %)
He + 4H		15 (11 %)	12 (5.3 %)	28 (27 %)
Li + He + H		5 (3 %)		
Li + 3H			1 (0.4 %)	2 (2 %)
6H		3 (2 %)	9 (4 %)	6 (6 %)

⁸Be_{g.s.} присутствует в 24 ± 7 % событий $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$, а в канале 3He в 27 ± 11 %. Канал $^9\text{B} + \text{H}$ составляет 14 ± 3 %.



Распады ядра ${}^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$ проявляется в диссоциации ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ (80%) с вероятностью $34 \pm 7 \%$, включая $14 \pm 4 \%$ от распадов ${}^9\text{B}$.

${}^6\text{Li} + \alpha$

Пороги

4.5 МэВ

${}^8\text{Be} + d$

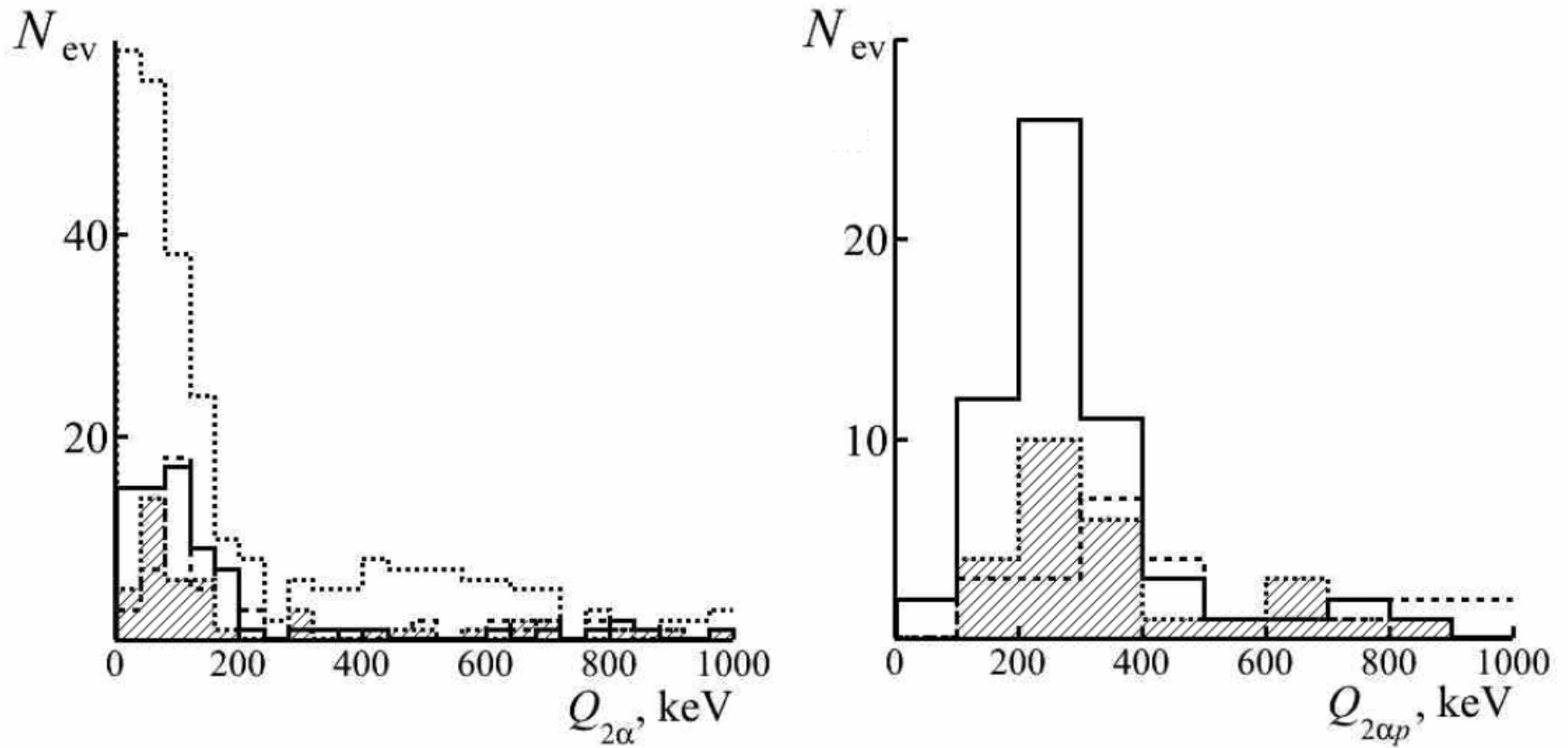
6.0 МэВ

${}^9\text{Be} + p$

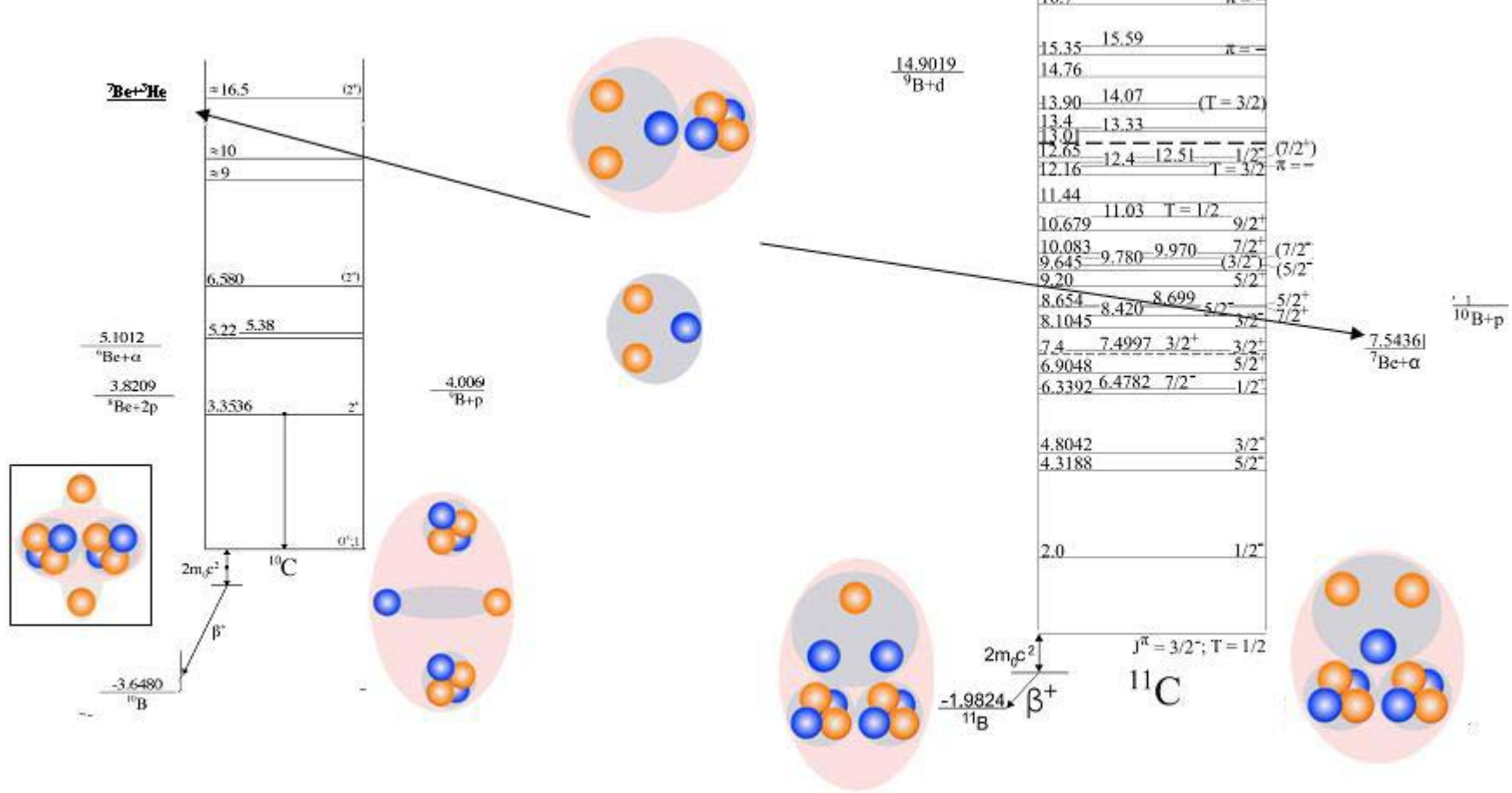
6.7 МэВ

${}^9\text{B} + n$

8.4 МэВ



Distributions of all found stars ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ (left top, dotted), ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$, ${}^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ (hatched) and “white” stars ${}^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ (solid) over energy $Q_{2\alpha}$ of 2α pairs and energy $Q_{2\alpha p}$ of $2\alpha p$ triples.



Рассмотрение нуклеосинтеза ${}^{10,11}\text{B}$, ${}^{11,10}\text{C}$ и ${}^{12}\text{N}$ через ${}^7\text{Be}$ (${}^3\text{He}, \gamma$) ${}^{10}\text{C}$ (e^+, ν) ${}^{10}\text{B}$ ("горячий прорыв») указывает на важность в их структуре несвязанных ядер. Синтез ${}^{10}\text{C}$, идущий с нарастанием счет α -кластеризации, имеет «окно» для формирования состояний ${}^9\text{B} + p$, ${}^8\text{Be}_{2+} + 2p$ и ${}^6\text{Be} + \alpha$. Эти структуры сохраняются в ${}^{10}\text{C}$ (e^+, ν) ${}^{10}\text{B}$ (p, γ) ${}^{11}\text{C}$ (e^+, ν) ${}^{11}\text{B}$. «Окно» реакции ${}^7\text{Be}({}^4\text{He}, \gamma){}^{11}\text{C}$ ведет только к ассоциации ${}^7\text{Be}$ и ${}^4\text{He}$, которая также вносит вклад в ${}^{11}\text{C}$ и ${}^{11}\text{B}$. В результате электромагнитных переходов в реальных конфигурациях возникает их разнообразие в ядрах ${}^{10,11}\text{C}$ и ${}^{10,11}\text{B}$.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

На правах рукописи

Артеменков Денис Александрович
«Исследование фрагментации ядер ${}^9\text{Be}$ на альфа-частичные пары в
ядерной фотоэмульсии при энергии 1.2 А ГэВ»

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Зарубин П.И.

Дубна, 2007 г.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина

На правах рукописи

СТАНОВАЯ
Рапица Желязкова

**Исследование релятивистской фрагментации ядер
 ${}^8\text{B}$ методом ядерной фотографической эмульсии**

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель
кандидат физико-математических наук
П. И. Зарубин

Дубна 2007

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

На правах рукописи

ЩЕДРИНА
Татьяна Викторовна

Исследование фрагментации релятивистских ядер ${}^{14}\text{N}$
методом ядерной фотографической эмульсии

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Зарубин П. И.

Дубна 2008

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория физики высоких энергий
имени В. И. Векслера и А. М. Балдина

на правах рукописи

ЗРУБИН
Павел Игоревич

**Кластеризация нуклонов в диссоциации
легких релятивистских ядер**

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных
частиц

Научный консультант
доктор физико-математических наук
профессор
МАЛАХОВ Александр Иванович

Дубна, 2010 г.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория физики высоких энергий
им. В. И. Векслера и А. М. Балдина

На правах рукописи

КРИВЕНКОВ
Дмитрий Олегович

**Исследование когерентной диссоциации
релятивистских ядер ${}^9\text{C}$**

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научные руководители
кандидат физико-математических наук
П. И. Зарубин

кандидат физико-математических наук
Д. А. Артеменков

Дубна, 2010 г.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория физики высоких энергий
им. В. И. Векслера и А. М. Балдина

На правах рукописи

МАМАТКУЛОВ
КАХРАМОН ЗИЯДУЛЛАЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОЙ ДИССОЦИАЦИИ ЯДРА ${}^{10}\text{C}$
ПРИ ЭНЕРГИИ 1.2 ГЭВ НА НУКЛОН**

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научные руководители:
кандидат физико-математических наук
Д. А. Артеменков
доктор физико-математических наук, профессор
Р. Н. Бекмурзаев

Дубна, 2015 г.

В качестве фундаментальных элементов своей структуры легкие ядра содержат виртуальные ассоциации нуклонов, или кластеры. Их простейшие наблюдаемые проявления – легчайшие ядра ${}^4_3\text{He}$ и ${}^3_2\text{H}$, не имеющие возбужденных состояний. Суперпозиции легчайших кластеров и нуклонов образуют следующие ядра, в том числе нестабильные ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$, которые, в свою очередь, играют роль составляющих кластеров.

Баланс возможных суперпозиций в состояниях с подходящим спином и четностью определяет факт связанности и параметры основного состояния соответствующего ядра. Кластеризация основного состояния легкого ядра определяет структуру его возбуждений и начальные условия реакций с его участием. Дальнейшее присоединение нуклонов и легчайших ядер ведет к оболочечному типу структуры. Переплетение кластерных и оболочечных степеней свободы делает группу легких ядер своего рода «лабораторией» ядерной квантовой механики все еще полной сюрпризов.

Кластеризация лежит в основе процессов, сопровождающих явления физики ядерных изобар, гиперядер, кварк-партонных степеней свободы. Представления о кластеризации ядер важны для применений в ядерной астрофизике, физике космических лучей, ядерной медицине и, возможно, даже для ядерной геологии.

Christian Beck *Editor*

Clusters in Nuclei, Volume 3

Chapter 3 “Tomography” of the Cluster Structure of Light Nuclei via Relativistic Dissociation

P.I. Zarubin

3.1 Introduction

Collective degrees of freedom, in which groups of few nucleons behave as composing clusters, are a key aspect of nuclear structure. The fundamental “building blocks” elements of clustering are the lightest nuclei having no excited states—first of all, the ^4He nucleus (α particles) as well as the deuteron (d), the triton (t) and the ^3He nucleus (h , helion). This feature is clearly seen in light nuclei, where the number of possible cluster configurations is small (Fig. 3.1). In particular, the cluster separation thresholds in the nuclei of ^7Be , $^6,7\text{Li}$, $^{11,10}\text{B}$, $^{11,12}\text{C}$ and ^{16}O are below the nucleon separation thresholds. The stable ^9Be , and unbound ^8Be and ^9B nuclei have a clearly pronounced cluster nature. In turn, the cluster nuclei ^7Be , ^7Li , and ^8Be serve as cores in the isotopes ^8B and $^9\text{--}^{12}\text{C}$. Descriptions of the ground states of light nuclei in the shell and cluster models are complementary. In the cluster pattern the light nuclei are represented as superpositions of different cluster and nucleon configurations. The interest in such states is associated with the prediction of their molecular-like properties [1, 2]. Nuclear clustering is traditionally regarded as the prerogative of the physics of nuclear reactions at low energies [3]. The purpose of these lecture notes is to present the potential of one of the sections of high-energy physics—relativistic nuclear physics—for the development of the concepts of nuclear clustering.

In the last decade, the concepts of ultracold dilute nuclear matter based on the condensation of nucleons in the lightest nuclei have been developed [4–7]. An α -particle Bose-Einstein condensate (αBEC) is considered as an analogue of atomic quantum gases [5, 7]. These developments put forward the problem of studying a variety of cluster ensembles and unbound nuclei as fundamental components of novel quantum matter. In a macroscopic scale coherent ensembles of clusters may play an

P.I. Zarubin (✉)
V.I. Veksler and A.M. Baldin Laboratory of High Energy Physics, Joint Institute for Nuclear
Research, Dubna, Russia
e-mail: zarubin@ihe.jinr.ru

Book Performance Report

2014

Availability of and results for your eBook

June 2015

Dear Christian Beck,

Year	Chapter Downloads
2014	1,151
2013	565

Lecture Notes in Physics 875

Christian Beck *Editor*

Clusters
in Nuclei,
Volume 3

 Springer

ISBN 978-3-319-01077-9
(ebook)

ISBN 978-3-319-01076-2
(print book)

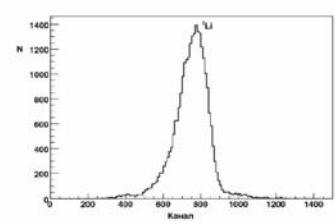
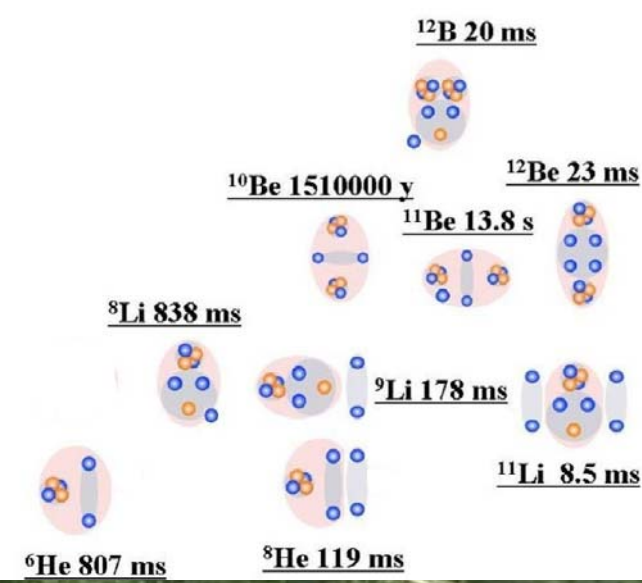
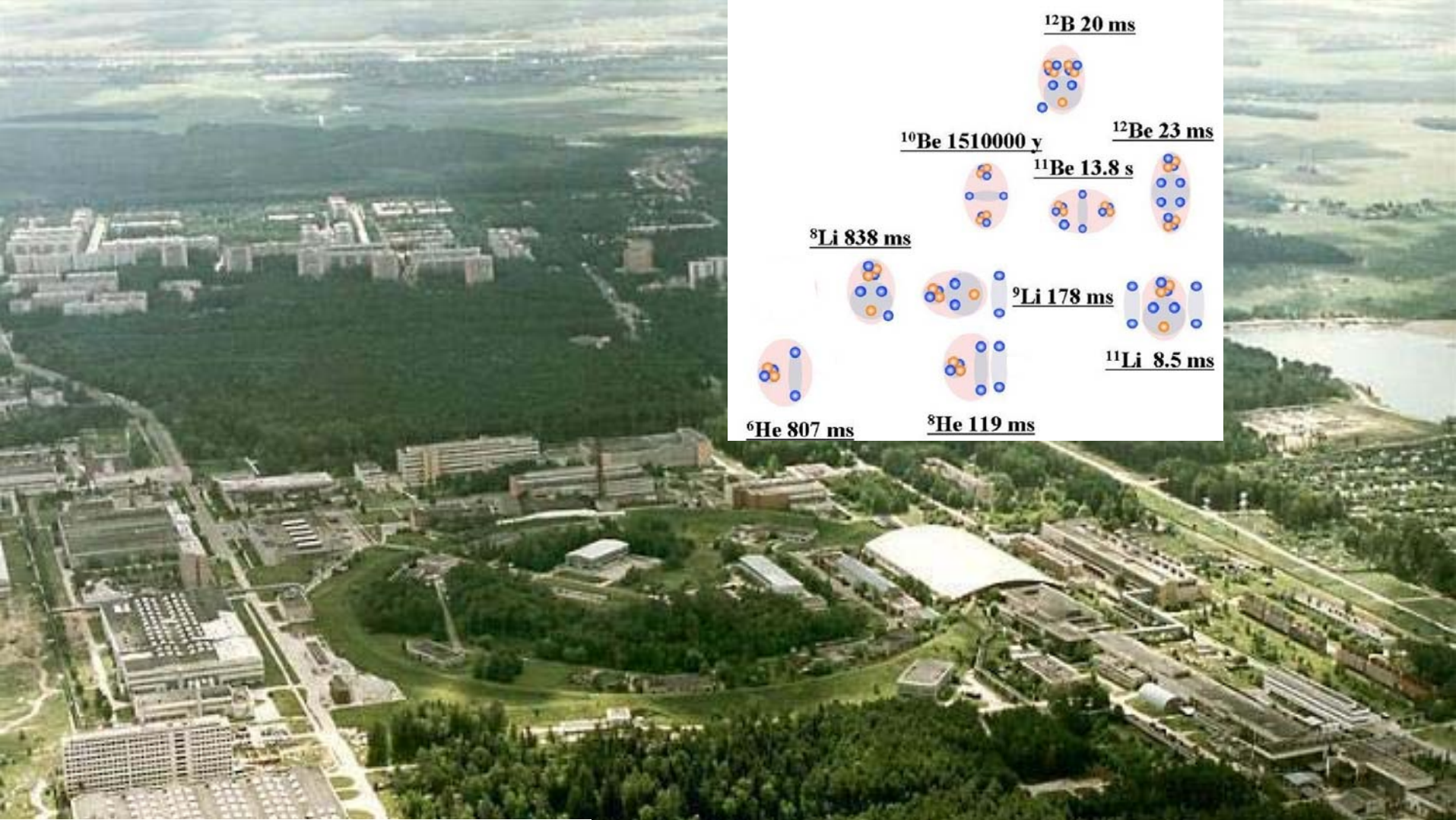


Рис. 9: Амплитудный спектр с адронного калориметра. Цена канала 3.2 канал/ГэВ, пьедестал в 250-м канале.

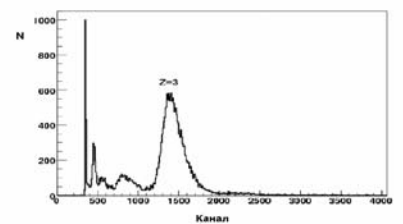


Рис. 10: Амплитудный спектр со сцинтилляционного счётчика S_3 . Основной сигнал соответствует заряду $Z=3$. Сигналы с меньшей амплитудой связаны с развалом ядра ^7Li в веществе перед счетчиком.

Таким образом, в весеннем сеансе 2012 года получен важный результат — ускоренные до полной энергии 300 ГэВ ионы углерода выведены из ускорителя У-70, продемонстрированы возможности канала №22 в качестве сепаратора фрагментов.

Полученный в этом сеансе опыт работы с высокоэнергичными пучками ионов углерода и продуктами их фрагментации позволяет уверенно планировать дальнейшие эксперименты в области релятивистской ядерной физики на крупнейшем в России Ускорительном комплексе У-70 ГИЦ ИФВЭ.

Candidate Resonant Tetraneutron State Populated by the $^4\text{He}(^8\text{He},^8\text{Be})$ Reaction

K. Kisamori,^{1,2} S. Shimoura,¹ H. Miya,^{1,2} S. Michimasa,¹ S. Ota,¹ M. Assie,³ H. Baba,² T. Baba,⁴ D. Beaumel,^{2,3} M. Dozono,² T. Fujii,^{1,2} N. Fukuda,² S. Go,^{1,2} F. Hammache,³ E. Ideguchi,⁵ N. Inabe,² M. Itoh,⁶ D. Kameda,² S. Kawase,¹ T. Kawabata,⁴ M. Kobayashi,¹ Y. Kondo,^{7,2} T. Kubo,² Y. Kubota,^{1,2} M. Kurata-Nishimura,² C. S. Lee,^{1,2} Y. Maeda,⁸ H. Matsubara,¹² K. Miki,⁵ T. Nishi,^{9,2} S. Noji,¹⁰ S. Sakaguchi,^{11,2} H. Sakai,² Y. Sasamoto,¹ M. Sasano,² H. Sato,² Y. Shimizu,² A. Stolz,¹⁰ H. Suzuki,² M. Takaki,¹ H. Takeda,² S. Takeuchi,² A. Tamii,⁵ L. Tang,¹ H. Tokieda,¹

M. Tsumura,⁴ T. Uesaka,² K. Yako,¹ Y. Yanagisawa,² R. Yokoyama,¹ and K. Yoshida²

¹Center for Nuclear Study, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

²RIKEN Nishina Center, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

³IPN Orsay, 15 Rue, Georges, Clemenceau 91400 Orsay, France

⁴Department of Physics, Kyoto University, Yoshida-Honcho, Sakyo, Kyoto 606-8501, Japan

⁵Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, 10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

⁶Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan

⁷Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama, Meguro, Tokyo 152-8550, Japan

⁸Faculty of Engineering, University of Miyazaki, 1-1 Gakuen, Kibanadai-nishi, Miyazaki 889-2192, Japan

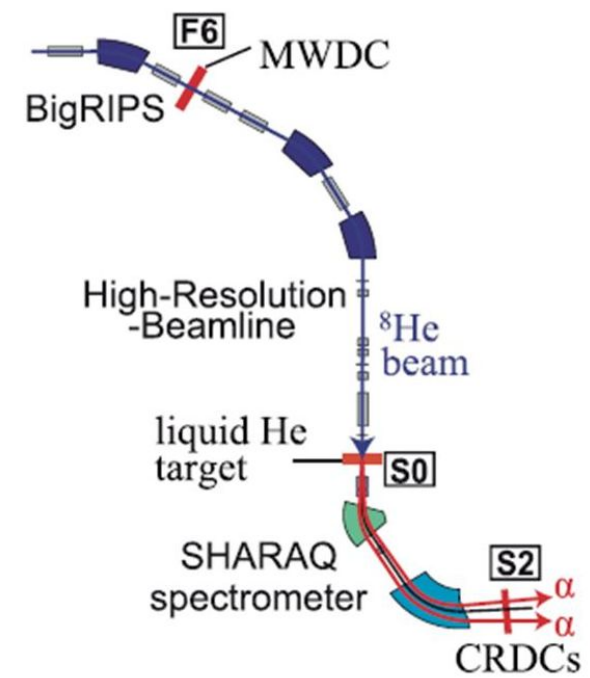
⁹Department of Physics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

¹⁰National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State University, 640 S Shaw Lane, East Lansing, Michigan 48824, USA

¹¹Department of Physics, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi, Fukuoka 812-8581, Japan

¹²National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba, Japan

(Received 30 July 2015; revised manuscript received 11 October 2015; published 3 February 2016)

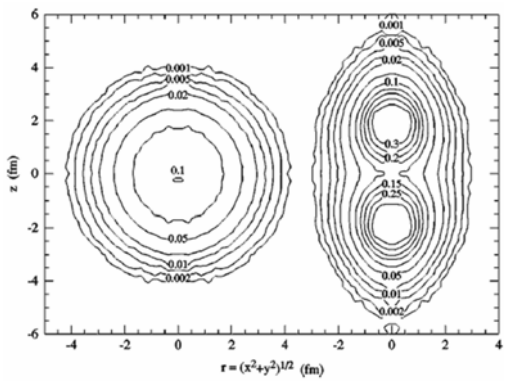


In summary, we performed missing-mass spectroscopy of the tetraneutron system via the DCX reaction $^4\text{He}(^8\text{He},^8\text{Be})$ at 186 MeV/u with the SHARAQ spectrometer at the RI Beam Factory. Through an analysis to eliminate multiparticle events, the missing-mass spectrum of the tetraneutron system containing 27 events was obtained with almost absent background signals. The spectrum has a clear peak with a 4.9σ significance level near the threshold of four-neutron decay in comparison with the theoretical curve assuming direct decay to the two correlated dineutron pairs. The mean of the peak is $0.83 \pm 0.65(\text{stat}) \pm 1.25(\text{syst})$ MeV and the upper limit of the width is 2.6 MeV (FWHM). This result suggests a possible resonant state of the tetraneutron system.

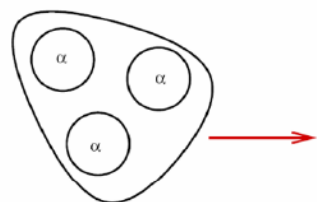
Alpha-Clusters in Nuclear Systems

P. Schuck

Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Röpke,
A. Tohsaki, W. von Oertzen and T. Yamada

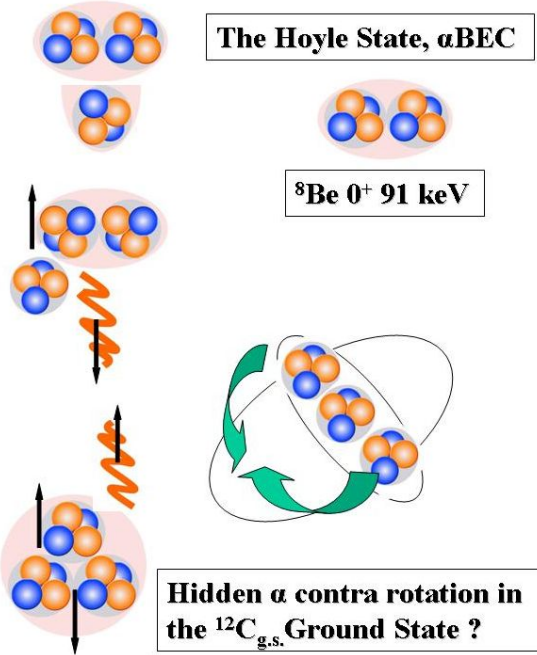
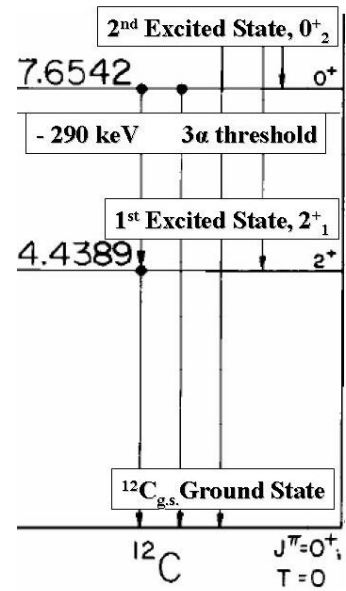
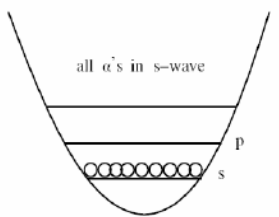
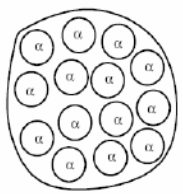


If O_2^+ in ^{12}C dilute α -state

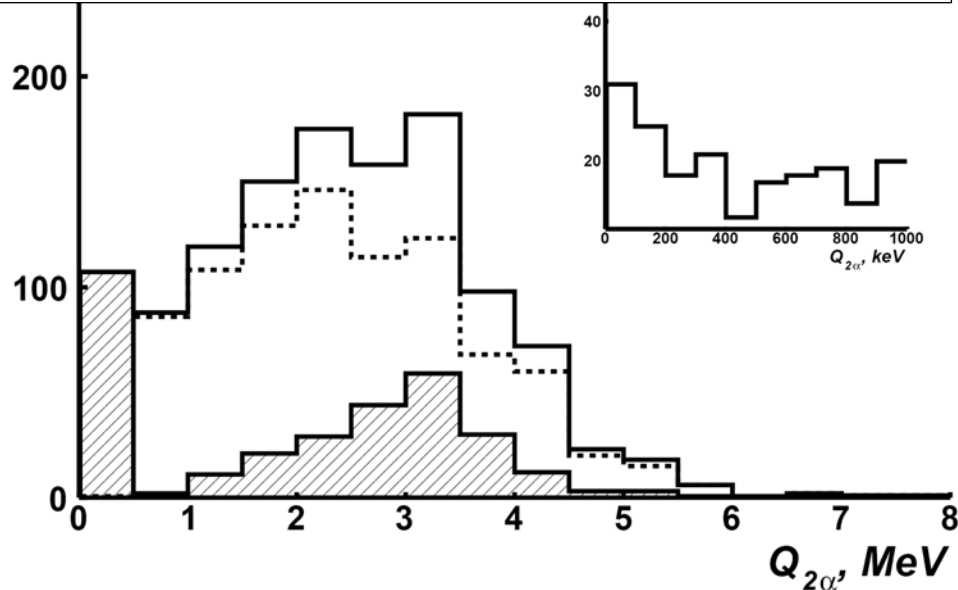


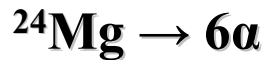
then α -condensate
infinite matter $\rho_{crit} \sim \frac{\rho_0}{3}$

Conjecture: all n. α nuclei possess excited n α condensed state



КОРРЕЛЯЦИИ α -ЧАСТИЦ В РАСЩЕПЛЕНИЯХ ЯДЕР ^{12}C НЕЙТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 14.1 МЭВ





Electromagnetic dissociation of relativistic ^{18}O nuclei

D. L. Olson and B. L. Berman

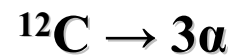
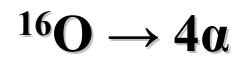
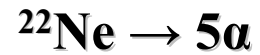
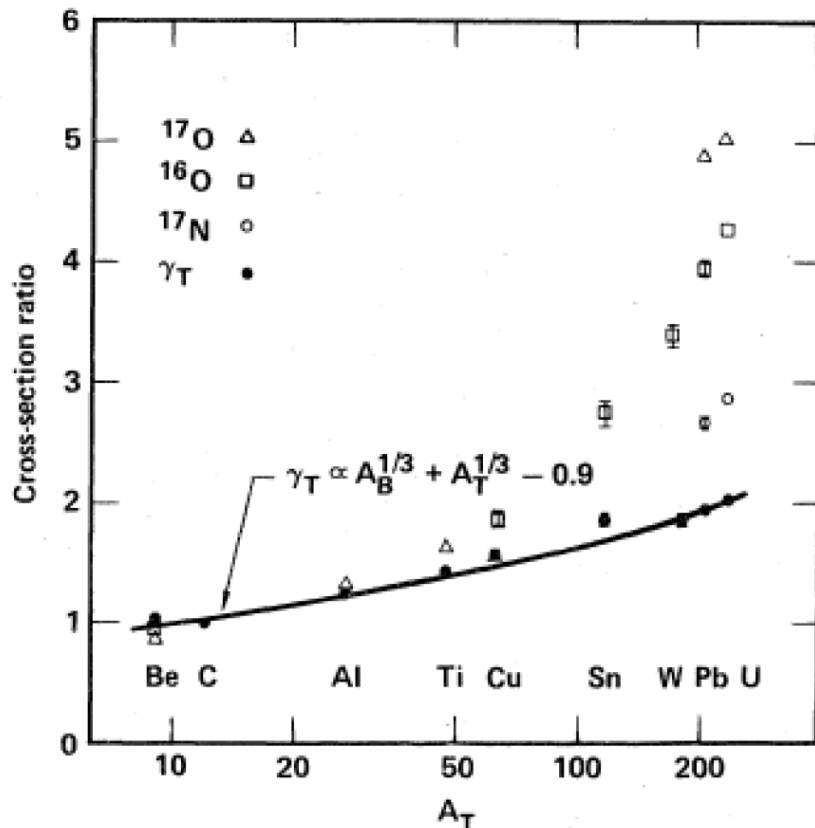
Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Livermore, California 945

D. E. Greiner, H. H. Heckman, P. J. Lindstrom, and G. D. Westfall

Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California

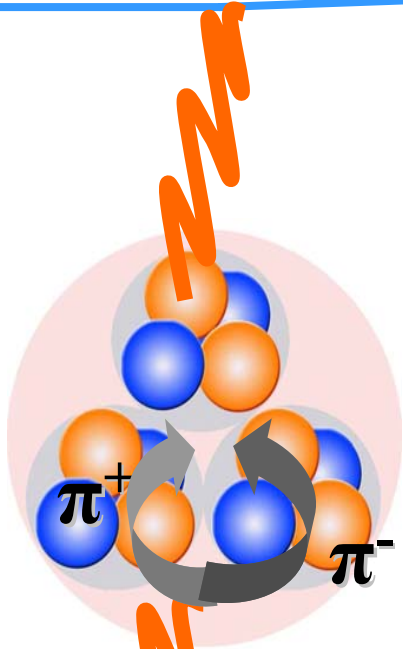
H. J. Crawford

University of California Space Sciences Laboratory, Berkeley, California 94720



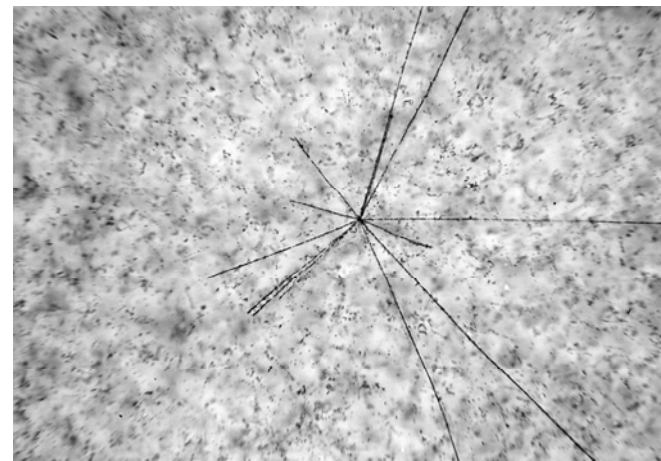


μ

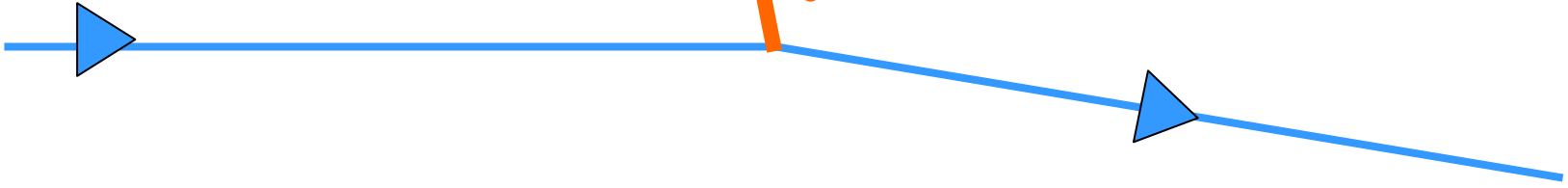


π^+

π^-



μ





BEQUEREL
PROJECT

Проект
БЕККЕРЕЛЬ

Beryllium (Boron)

Clustering

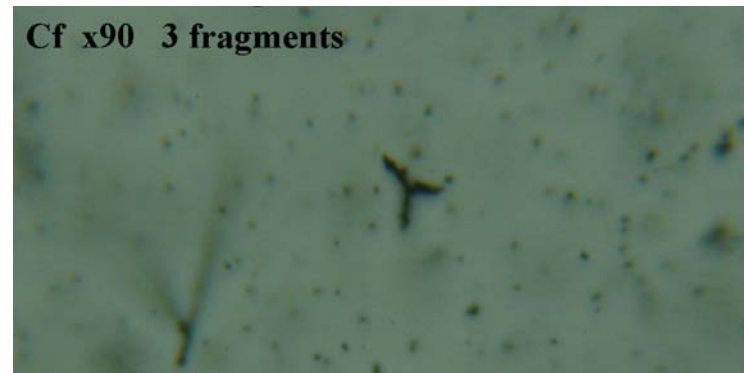
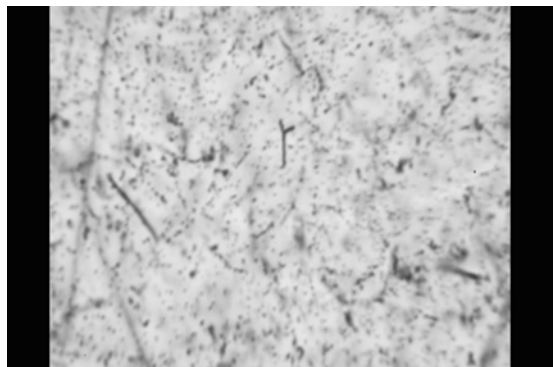
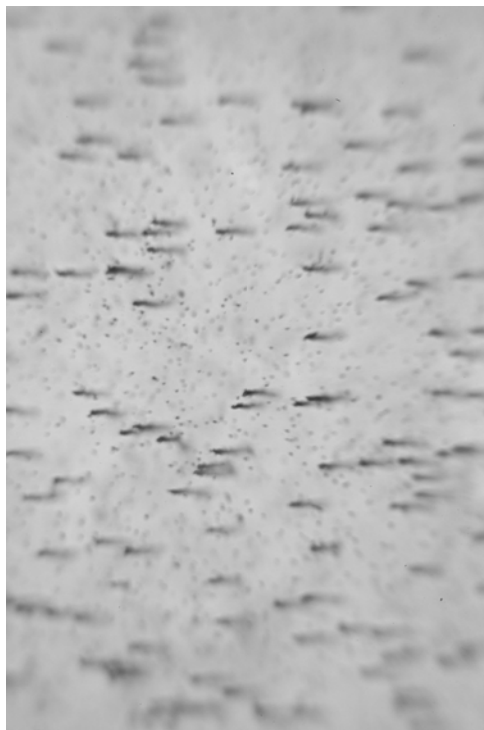
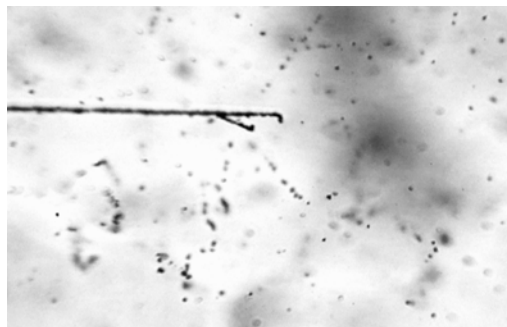
Quest in

Relativistic Multifragmentation

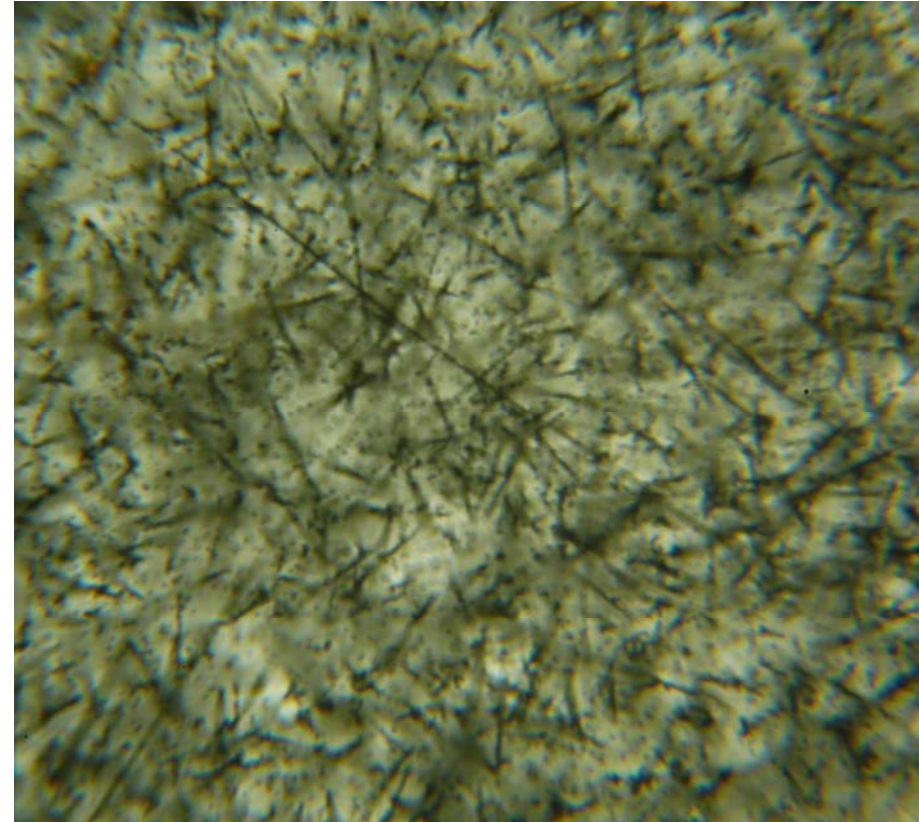
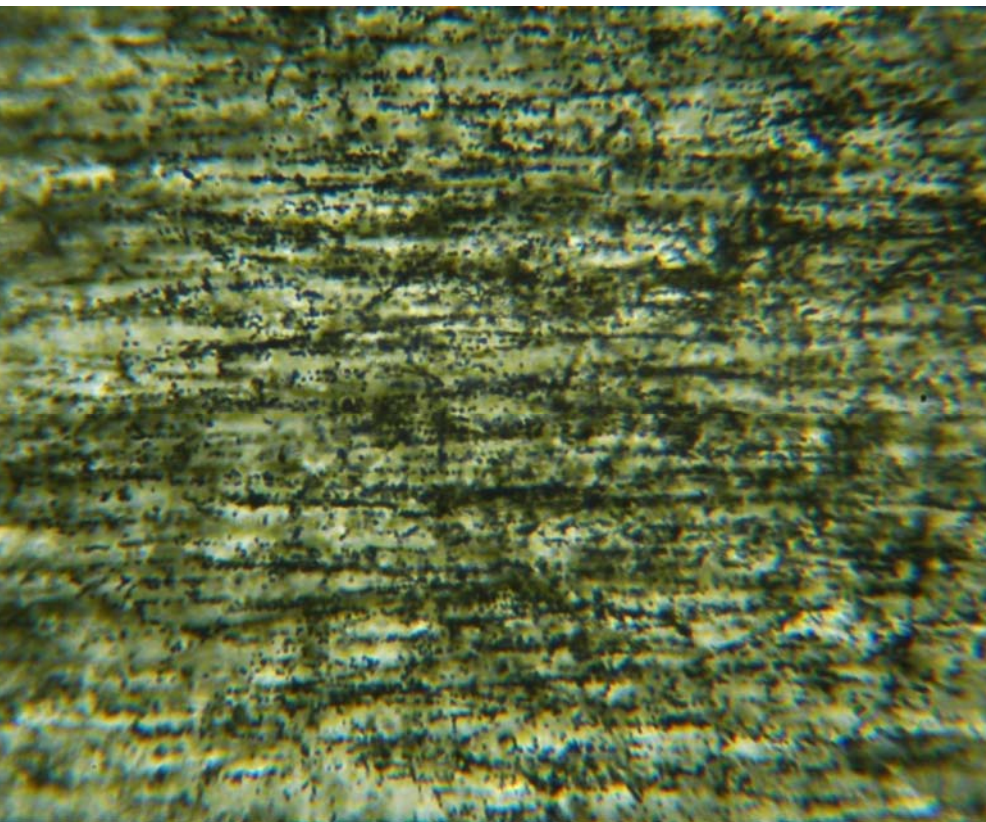
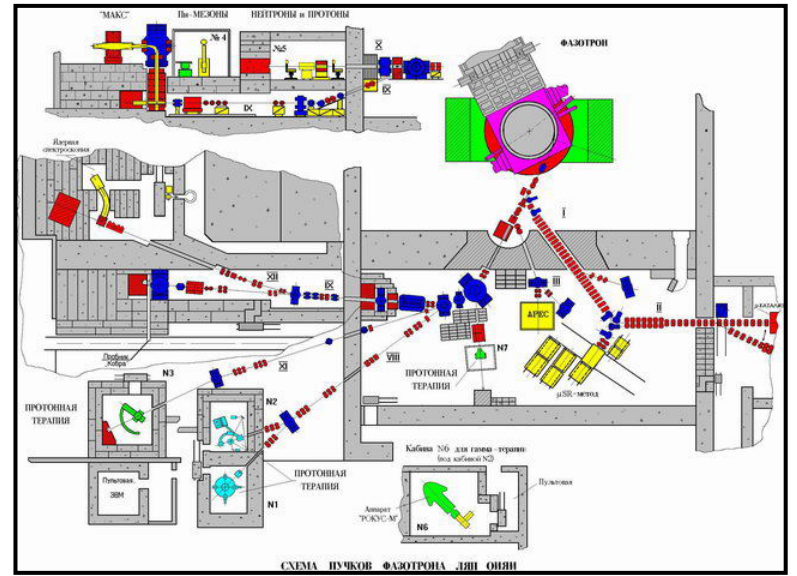
<http://becquerel.jinr.ru>

“Перспективы метода ядерной эмульсии в проблемах ядерной и нейтронной физики”

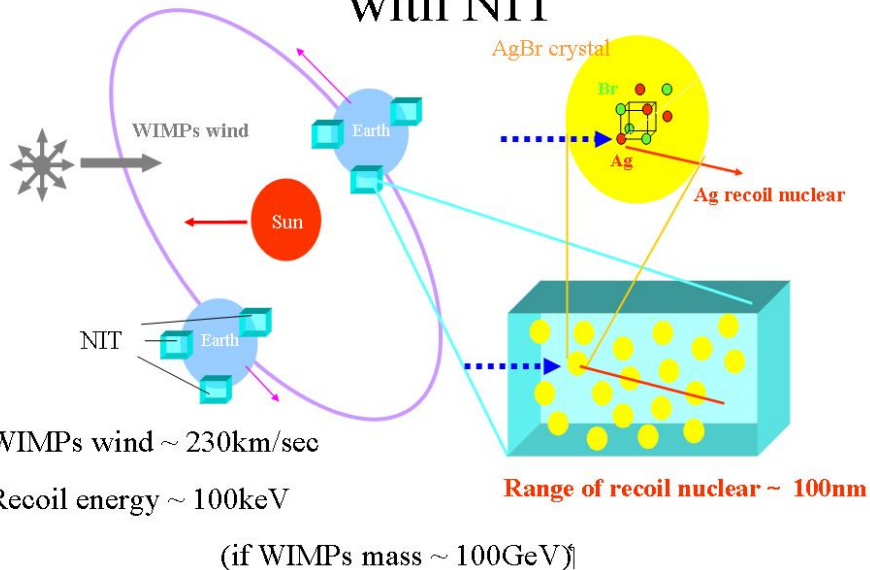
П. И. Зарубин



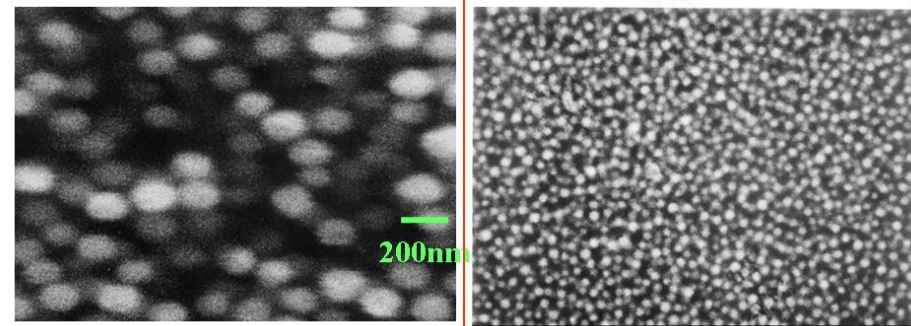
Лаборатория физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ



Principle for Detection of WIMPs with NIT



High resolution emulsion (NIT)



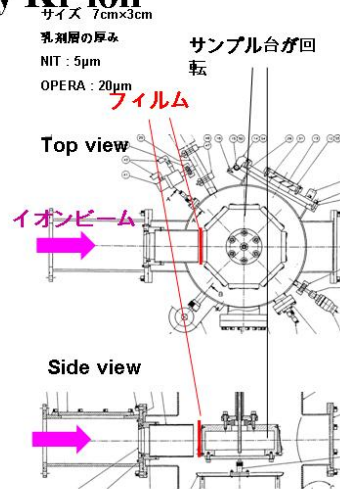
OPERA: AgBr crystal size $\sim 200\text{nm}$
 2.3 AgBr/ μm

NIT: AgBr crystal size $\sim 40\text{nm}$
 11 AgBr/ μm

5 times resolution for OPERA!

Recoil nuclear test of NIT

\Rightarrow implant low velocity Kr ion

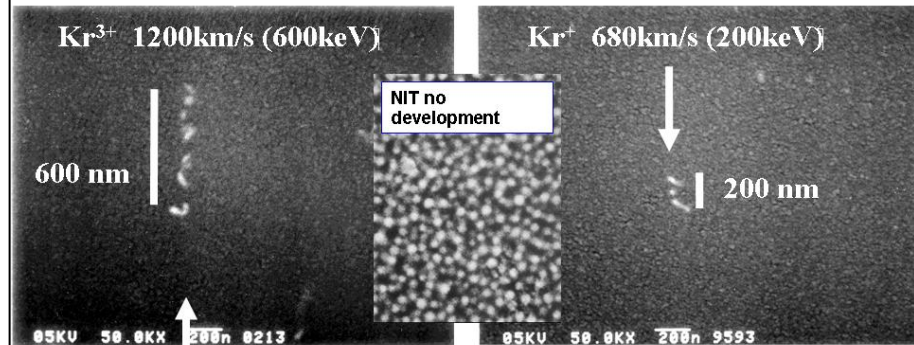


チェンバーの真空はそのままに
 7つのサンプルに照射できる

Tracking test by low velocity Kr

SEM image

Supposition **Br** recoil



*из беседы с А. М. Балдиным
в конце 90-х:*

*«Ну ладно... Понимаю тебя...
Ты хочешь жить своим умом.
 Попробуй...
Это трудно, но интересно!»*