

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени П. Н. ЛЕБЕДЕВА**

на правах рукописи

УДК 539.172.17

ЗАРУБИН

Павел Игоревич

**Кластеризация нуклонов в диссоциации легких
релятивистских ядер**

специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва, 2010 г.

Общая характеристика работы

В последнее десятилетие получили развитие концепции барионной материи, находящейся в холодной разреженной фазе, с кластеризацией нуклонов в легчайшие ядра ${}^4\text{He}$ (α , α -частицы), ${}^3\text{He}$ (h , гелионы), ${}^2\text{H}$ (d , дейтроны) и ${}^3\text{H}$ (t , тритоны). Глубокие теоретические разработки, выполненные в этом направлении, ориентируют на изучение кластерных ансамблей α , h , d и t как целостных квантовых систем и дают мотивацию новому поколению экспериментов по кластерной спектроскопии. Поскольку макроскопические кластерные состояния могут играть роль промежуточной фазы в астрофизических процессах, эти исследования приобретают значение, выходящее за рамки проблем ядерной структуры.

Качественно разнообразить кластерную спектроскопию позволяют пучки ускоренных ядер, в том числе радиоактивных. Конфигурационное перекрытие основных состояний ядер с конечными состояниями наиболее полно проявляется при диссоциации налетающих ядер на периферии ядер мишени. Периферические реакции содержат все наблюдаемые характеристики, которые могут быть использованы для интерпретации кластерных состояний. Периферическая диссоциация протекает без существенного перекрытия плотностей сталкивающихся ядер и с передачей возбуждения вблизи энергии связи кластеров или их групп. Определение взаимодействий как периферических упрощается при энергии ядер свыше $1A$ ГэВ благодаря возрастающей коллимации фрагментов. Пороги детектирования фрагментов исчезают, а теряемая ими энергия в детекторах минимальна. Инвариантное представление позволяет описать характеристики ансамблей фрагментов и сохранить целостность с выводами физики низких энергий.

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 стало стремление к поиску общих закономерностей в описании картины столкновения релятивистских составных систем. На этом пути были определены условия выхода на режим предельной фрагментации и масштабно-инвариантное поведение импульсных спектров ядерных фрагментов и мезонов. Возникли целостные представления, унифицировавшие разнообразные явления множественного рождения частиц в обширном энергетическом масштабе. Как обобщение этих концепций, академиком А. М. Балдиным были предложены принципы ослабления корреляций и автомодельности, удовлетворяющие условию релятивистской инвариантности. 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.

Ядерная физика остается на передовом фронте исследований микромира благодаря открытию экзотических ядер, сделанному на пучках релятивистских ядер в Беркли. Были установлены принципиально новые явления в структуре легких радиоактивных ядер и в протекании ядерных реакций. Наблюдались аномально большие радиусы некоторых ядер, объясняемые на основе молекулярно-подобных ядерных структур, состоящих из разделенных в пространстве нуклонных ядерных кластеров. Это открытие 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. 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 в ОИЯИ [1]. Не менее важно и то, что развитие релятивистской ядерной физики создало методологическую и методическую основу для углубленного исследования ядерной кластеризации.

Актуальность настоящего исследования состоит в применении концепций и экспериментальных методов релятивистской ядерной физики для развития физики нуклонных кластеров. Его замысел состоит в последовательной проверке предположения о том, что в периферической диссоциации релятивистских ядер возможно исследование коррелированных ансамблей нуклонных кластеров. В теоретическом плане данная идея не является очевидной, а ее экспериментальная проверка, по объективным причинам, затруднительна.

Взаимодействия релятивистских ядер, являющиеся объектом настоящего исследования, начали изучаться методом ядерной эмульсии 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.

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. В принципе, генерация ансамблей фрагментов может протекать не только в непрерывном спектре, но и 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.

Стопки слоев ядерных эмульсий остаются эффективным, гибким и недорогим средством поисковых исследований. Эмульсионный метод позволяет не только единообразно изучать структуру фрагментации, но и обнаружить новые явления в физике кластеров. 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. В основе динамики диссоциации тяжелых ядер лежат закономерности, устанавливаемые для легких ядер. Легкие ядра являются источниками для генерации базовых конфигураций нуклонных кластеров и нуклонов. 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 впервые формировавшихся пучках легких ядер на нуклотроне ОИЯИ [2-6].

В качестве проблемы исследования диссертантом было выдвинуто предложение о единообразном изучении когерентной диссоциации возможно большего разнообразия ядер, соседствующих в начале таблицы изотопов, в том числе радиоактивных. 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 вплоть до крайне малых парциальных сечений. Конечная цель использования эмульсии – это установление фактов возникновения необычных конфигураций нуклонных кластеров с идентификацией и метрологией. В изучаемых периферических взаимодействиях с малой передачей энергии и импульса соблюдается приблизительное равенство импульсов на нуклон исследуемого релятивистского ядра и его фрагментов, что компенсирует отсутствие измерений импульсов. Будучи ценными сами по себе, детальные сведения по возникновению кластерных конфигураций будут весьма полезны для планирования электронных экспериментов с высокой статистикой событий.

Таким образом, практическая цель использования ядерной эмульсии в нашем исследовании – это поиск новых явлений ядерной кластеризации для доступного разнообразия легких ядер с использованием достаточно простого и универсального метода. К настоящему времени на нуклотроне ОИЯИ стопки ядерной эмульсии облучены релятивистскими изотопами $^{7,9}\text{Be}$, $^{8,10,11}\text{B}$, $^{9,10}\text{C}$, $^{12,14}\text{N}$ [7]. Измерения взаимодействий в значительной степени завершены, что позволяет представить целостную картину кластеризации нуклонов при диссоциации этих ядер. Возникли предпосылки для сравнения с результатами облучений ядрами ^{12}C , ^{16}O и $^{6,7}\text{Li}$, выполненными на синхрофазотроне ОИЯИ 70 - 90-е годы, позволившими установить типы кластеризации 3α , 4α , $\alpha + d$ и $\alpha + t$.

Цель диссертации состоит в изучении когерентной диссоциации легких ядер в ансамбли нуклонных кластеров, включая их зарядовую топологию, изотопный состав и кинематические характеристики. Для целостного развития концепции этого явления предложено ответить на следующие вопросы:

1. Соответствует ли структура α -частичных возбуждений кластерных ядер $N\alpha$ -состояниям их периферической диссоциации?
2. Проявляются ли другие типы нуклонной кластеризации - d , t и h ?
3. Возможно ли заселение кластерных комбинаций с перегруппировкой нуклонов за пределы α -кластеризации?
4. Как соотносятся дифракционный и электромагнитный механизмы когерентной диссоциации релятивистских ядер?

Для ответа на них в диссертации решены следующие экспериментальные задачи:

1. Исследована диссоциация релятивистских ядер ^{14}N и ^9Be
2. Исследована диссоциация релятивистских изотопов бора $^{10,11}\text{B}$
3. Исследована диссоциация радиоактивных ядер ^6He , ^7Be , ^8B и ^9C

Этапы настоящего исследования оказались тесно связанными с новыми возможностями, возникавшими с развитием нуклотрона ОИЯИ в 2000-е годы. Этим этапам следует в целом и текст диссертации. В завершающий период работы синхрофазотрона ОИЯИ (1999 г.) был получен первый опыт анализа облучения во вторичном пучке смеси ядер ^6He и ^3H [7]. В 2002 г. сотрудничеством БЕККЕРЕЛЬ была выдвинута программа облучений ядерной эмульсии, целью которой стало систематическое изучение картины периферической фрагментации легких ядер [2-5]. Вывод пучка на нуклотроне ОИЯИ (2002 г.) позволил выполнить облучение ядрами ^{10}B . В диссоциации ^{10}B была установлена кластеризация $2\alpha + d$ [8,9], что мотивировало облучения ядрами ^{14}N для изучения кластеризации $3\alpha + d$ [9-13], а также ядрами ^{11}B для изучения кластеризации $2\alpha + t$ [15]. Интерес к ядру ^{11}B ускорил анализ кластеризации $\alpha + t$ в предшествующем облучении ядрами ^7Li на синхрофазотроне ОИЯИ [8]. Для развития представлений о кластеризации на основе ^3He выполнено облучение во вторичном пучке ядер

${}^7\text{Be}$, сформированном в реакциях перезарядки первичных ядер ${}^7\text{Li}$ (2004-5 гг.) [7,15]. Ускорение ядер ${}^{10}\text{B}$ позволило создать вторичные пучки изотопов ${}^9\text{Be}$ [6,9,12,16-19] и ${}^8\text{B}$ [6,12,19-21] в оптимальных условиях для облучения и анализа. Итоги перечисленных облучений дали основания для облучений в пучках изотопов ${}^{9,10}\text{C}$, ${}^{12}\text{N}$, формируемых во фрагментации или перезарядке первичных ядер ${}^{12}\text{C}$ (2005-6 гг.) [6,10,22].

Научная новизна исследования. В периферической диссоциации ядер ${}^9\text{Be}$ по 2α -частичному каналу обнаружено доминирование основного и первого возбужденного состояний ядра ${}^8\text{Be}$, проявляющихся с близкими вероятностями. Впервые установлено, что при диссоциации ядра ${}^{14}\text{N}$ по лидирующему 3α -частичному каналу основная часть конечных состояний соответствует области кластерных возбуждений ядра ${}^{12}\text{C}$. В когерентной диссоциации релятивистских изотопов ${}^{10,11}\text{B}$ обнаружено лидирование зарядовой топологии фрагментов $2\text{He} + \text{H}$, для которой установлено проявление d и t типов кластеризации. Впервые установлена лидирующая роль ${}^3\text{He}$ типа кластеризация в релятивистской диссоциации ядер ${}^7\text{Be}$. Впервые изучена когерентная диссоциация релятивистского ядра ${}^8\text{B}$, обнаружено лидирование канала ${}^7\text{Be} + p$ и определены условия электромагнитной диссоциации. Впервые изучена когерентная диссоциация релятивистского ядра ${}^9\text{C}$, в которой идентифицировано образование кластерного состояния $3{}^3\text{He}$.

Научно-практическая значимость исследования. Получены данные по периферической диссоциации целого семейства легких ядер, включая радиоактивные, на основе которых выдвинута целостная концепция образования кластерных систем легчайших ядер ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}$, ${}^2\text{H}$ и ${}^3\text{H}$ и создана основа для развития нового направления в ядерной физике – физики релятивистских кластерных систем. Продемонстрированы возможности нуклотрона ОИЯИ для исследований ядерной структуры. Итоги настоящего исследования будут полезны для экспериментов с высокой сложностью и разнообразием детекторов на ядерных пучках нуклотрона ОИЯИ, синхротрона У-70 ИФВЭ и зарубежных центров. Ориентированное на ядерную кластеризацию, настоящее исследование содержит сведения для таких разделов физики промежуточных энергий, как изобарные степени свободы в ядрах и реакции перезарядки, гиперядра, явления предельной фрагментации ядер. Результаты исследования могут иметь применение для планирования исследований в ядерной астрофизике, физике космических лучей и ядерной геологии. Этот цикл облучений оказался важным и потому, что возобновилось применение ядерной эмульсии, что необходимо для сохранения технологии, опыта анализа и привлечения молодых исследователей. Продемонстрировано, что метод ядерной эмульсии сохраняет перспективы применения и заслуживает обновления на основе современных технологий анализа изображений. Создана обширная

коллекция видеоматериалов о взаимодействиях релятивистских ядер, которая может использоваться в образовательных целях.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Обнаружение доминирующего вклада распадов ядра ${}^8\text{Be}$ в диссоциации ядра ${}^9\text{Be}$.
2. Выводы о структурных особенностях диссоциации ядра ${}^{14}\text{N}$ и лидировании множественного канала $3\text{He} + \text{H}$.
3. Обнаружение лидирования зарядовой топологии $2\text{He} + \text{H}$ и установление для когерентных процессов типов кластеризации на основе дейтронов и тритонов в диссоциации изотопов ${}^{10,11}\text{B}$.
4. Обнаружение лидирования кластеризации с образованием ядра ${}^3\text{He}$ в диссоциации ядра ${}^7\text{Be}$.
5. Выводы о структуре диссоциации ядра ${}^8\text{B}$, обнаружение лидирования канала ${}^7\text{Be} + p$ в когерентных процессах и определение условий электромагнитной диссоциации.
6. Структура когерентной диссоциации релятивистского ядра ${}^9\text{C}$ и идентификация состояний $3{}^3\text{He}$.

Личный вклад диссертанта:

1. Формулирование программы изучения кластерных систем в диссоциации легких релятивистских ядер в ядерной эмульсии, составившей повестку работы сотрудничества БЕККЕРЕЛЬ в 2003-11 гг.
2. Руководство экспериментами по облучению ядерной эмульсии релятивистскими изотопами ${}^{7,9}\text{Be}$, ${}^{8,10,11}\text{B}$, ${}^{9,10}\text{C}$, ${}^{12,14}\text{N}$, выполненными на нуклотроне ОИЯИ, а также ${}^3\text{H}$ и ${}^6\text{He}$ на синхрофазотроне ОИЯИ.
3. Координация работ участников сотрудничества БЕККЕРЕЛЬ по анализу уникального экспериментального материала, полученному в условиях сложного состава первичных пучков.
4. Исследование периферических взаимодействий ядер ${}^{14}\text{N}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ и ${}^9\text{C}$, в том числе в рамках трех кандидатских диссертаций, выполненных под руководством диссертанта.
5. Создание сайта проекта БЕККЕРЕЛЬ, содержащего обширный научно-иллюстративный материал по теме диссертации.

Апробация результатов исследования. Результаты настоящего исследования докладывались диссертантом и публиковались в трудах следующих научных конференций: 18-ая Европейская конференция по физике нескольких тел (Блед, Словения, 2002), VIII Международная конференция по ядро-ядерным столкновениям (Москва, 2003), XVII Международный Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 2004), 19-ая Европейская конференция по физике нескольких тел (Гронинген, Нидерланды, 2004), Научная сессия - конференция секции ЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных

взаимодействий" (ИТЭФ, Москва, 2004 г.), Европейская конференция «Ядерная физика в астрофизике – II» (Дебрецен. Венгрия, 2005), Международная конференция «Новые тенденции в физике высоких энергий» (Ялта, Украина, 2005), 25-е Международное совещание по теории ядра (Рила, Болгария, 2005), Международный симпозиум по экзотическим ядрам “EXON - 2006” (Ханты-Мансийск, 2006 г.), XVIII Международный Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 2006), Европейская конференция «Ядерная физика в астрофизике – III» (Дрезден. Германия, 2007), Международное совещание «Релятивистская ядерная физика: от энергии нуклотрона до ЛНС» (Киев, Украина, 2007), Международная конференция «Новые тенденции в физике высоких энергий» (Ялта, Украина, 2007), Научная сессия - конференция секции ЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий" (ИТЭФ, Москва, 2007 г.), 20-ая Европейская конференция по физике нескольких тел (Пиза, Италия, 2008), 2-я Международная конференция «Актуальные проблемы в ядерной физике и атомной энергии» (Киев, Украина, 2008), 3-е международное совещание по взаимодействиям легких ионов (Протвино, 2008 г.), Международный симпозиум СПИН-2008 (Прага, 2008), XII Международный Семинар по электромагнитным взаимодействиям ядер (ИЯИ, Москва, 2009 г.), Международный симпозиум по экзотическим ядрам “EXON - 2009” (Сочи, 2009 г.), Научная сессия - конференция секции ЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий" (ИТЭФ, Москва, 2009 г.). Развитие работ по проекту представлялось автором на международных программно-консультативных комитетах ОИЯИ по физике частиц и ядерной физике, на семинарах в ЛВЭ ОИЯИ, ФИАН, ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ИФВЭ и ПИЯФ РАН. Выносимые на защиту результаты опубликованы в 11 статьях в журнале «Ядерная физика» и его версии на английском языке, также в журналах Nuclear Physics (1), Few Body Systems (2) и The European Physical Journal (3), Acta Physica Slovaca(1), Ядерна фізика та енергетика (1) и издании American Institute of Physics Conference Proceedings (2).

Краткое содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списков цитируемых работ (165 наименований) и публикаций по теме диссертации; содержит 107 рисунков и иллюстраций и 23 таблицы.

Во **Введении** дан краткий обзор исследований по релятивистской ядерной физике, выполненных методом ядерной эмульсии. Обсуждается значение наблюдений процессов диссоциации релятивистских ядер для исследования кластеризации и формулируется актуальность, цель и задачи исследования, представляется план диссертации.

В **Главе I** представлены проблемы ядерной кластеризации, лежащие в основе вопросов настоящего исследования (рис. 1). Особую значимость исследования кластерных состояний могут иметь для развития сценариев нуклеосинтеза в ядерной астрофизике. Кластеризация нуклонов в легчайшие ядра-кластеры ${}^4\text{He}$, d , t и ${}^3\text{He}$ при низких температурах $T < 10 \text{ МэВ}$ может вести к неизученным состояниям разреженной ядерной материи (§I.1).

Кратко изложены современные идеи в развитии концепции α -частичной кластеризации. Отчетливо α -кластеризация проявляется в легких $4N$ -ядрах ${}^8\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ и ${}^{20}\text{Ne}$, в которых энергия связи нуклонов линейным образом соответствует числу возможных α - α связей. Опираясь на «молекулярный блок» $\alpha + \alpha$ можно конструировать $N\alpha$ -цепочки, представляющие собой ядерные аналоги молекулярных структур. Диаграмма Икеда демонстрирует включение кластерных степеней свободы с ростом энергии возбуждения. Интригующий сценарий состоит в том, что может происходить α -конденсация в условиях, когда α -частицы являются хорошо определенными конститuentами ядерной материи. Своим возникновением такой конденсат обязан квартетной конденсации фермионов. Для α -конденсации критическая плотность от нормальной равна примерно $\rho_0/5 = 0.17 \text{ фм}^{-3}$. Существование α -конденсатной формации симметричной ядерной материи возможно в астрофизике при малых плотностях и температурах. Такой квантовый α -конденсат мог бы быть аналогичен недавно осуществленной конденсации Бозе-Эйнштейна бозонных атомов в магнито-оптических ловушках. Роль простейших α -конденсатных состояний придается основному 0^+ и первому возбужденному 2^+ состоянию ядра ${}^8\text{Be}$.

Обсуждается кластеризация нуклонов в ядрах легче ${}^{12}\text{C}$ (§I.2). Современная модель антисимметризованной молекулярной динамики позволяет включить в кластерное описание и эти ядра путем замены α -частиц на другие кластеры нуклонов, в том числе $2n$, $2p$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ (рис. 1). Тем самым возникают новые измерения в кластерной структуре легких ядер. Рассматриваются возбуждения с перегруппировкой нуклонов за пределы α -частичной кластеризации и возникновение кластерных состояний 2- и 3-нуклонных кластеров, для которых требуется преодоление гораздо более высоких энергетических порогов (§I.3). Этот тип возбуждений имеет особое ядерно-астрофизическое значение, поскольку обратный ему процесс

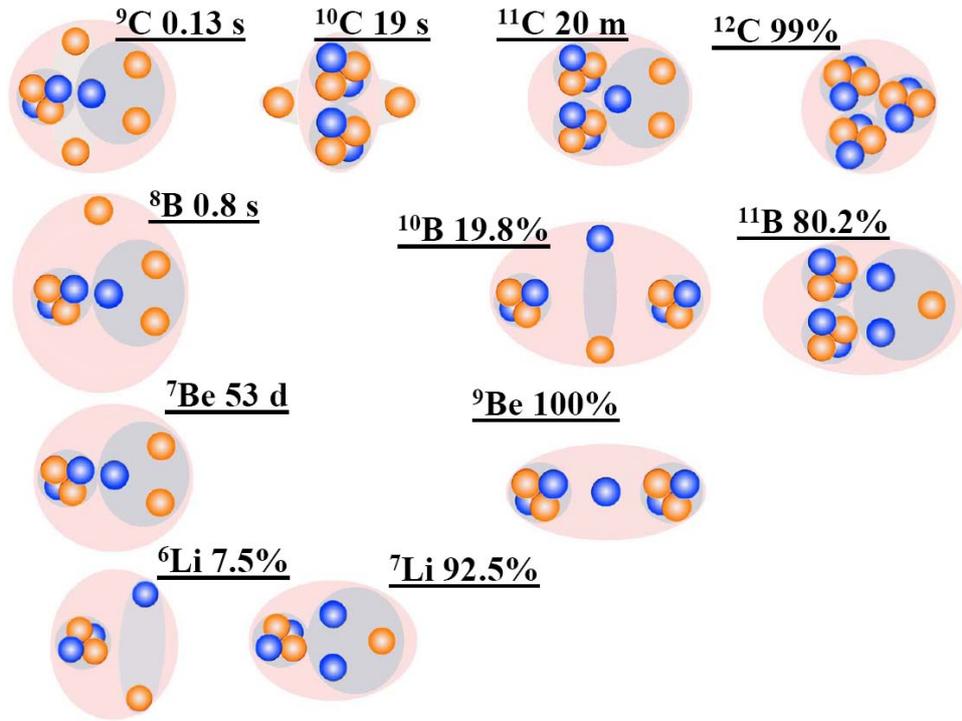


Рис. 1. Диаграмма кластерных степеней свободы в стабильных и нейтронодефицитных ядрах указаны распространенности изотопов или времена жизни; светлые кружки соответствуют протонам, темные - нейтронам; темным фоном выделены кластеры

перехода в основное состояние ядра с образованием α -кластера ведет к мощному выделению энергии. Выводы о структуре релятивистской фрагментации стабильных ядер и ядер с дефицитом нейтронов позволят по-новому подойти к кластерной структуре нейтроно-избыточных ядер (§I.4). Новой методической возможностью в области энергий $10A$ ГэВ, недоступной при более низких энергиях, становится калориметрическая спектрометрия релятивистских ядер и нейтронов.

В **Главе II** представлены подходы к анализу взаимодействий релятивистских ядер в ядерной эмульсии (§II.1), а также принципиальные результаты по когерентной диссоциации легких стабильных ядер. Их комбинированное использование стало основой проекта БЕККЕРЕЛЬ. События когерентной диссоциации, в которых отсутствуют фрагменты мишени и мезоны ($n_b = 0$, $n_g = 0$, $n_s = 0$), именуемые «белыми» звездами, интерпретируются наиболее ясно [9]. Образование «белых» звезд может протекать при ядерном дифракционном и электромагнитном взаимодействии на тяжелых ядрах мишени.

Важным удобством при интерпретации событий такого типа является требование равенства заряда начального ядра и суммарного заряда фрагментов $Z_{pr} = \sum Z_{fr}$. Возможна идентификация релятивистских изотопов H и He по их полным импульсам, оцениваемым методом многократного рассеяния. Идентификация становится детальной, что оправдывает

использование этой процедуры. Особенный интерес представляют «белые» звезды, в которых сохраняется и число нуклонов $A_{pr} = \sum A_{fr}$.

Первичное сравнение результатов при разных значениях начального импульса на нуклон P_0 проводят по величинам поперечных импульсов фрагментов P_T . Измерения угла θ позволяют вычислить значения поперечных импульсов P_T согласно приближению $P_T \approx A_{fr} P_0 \sin \theta$. Поскольку значения P_T складываются из импульсов, получаемых фрагментами при распаде ядра-снаряда и суммарного импульса отдачи, получаемого при столкновении с мишенью (эффект «bounce off»), то можно перейти к импульсам P_T^* в с. ц. м. системы фрагментов. Величина азимутального угла $\psi_{2\alpha}$ между векторами поперечных импульсов характеризует корреляцию в паре α -частиц. Рассмотрение 2-частичных корреляций между частицами позволяет осуществить выбор между модельными подходами, которые приводят к описанию одночастичных распределений. Энергия возбуждения системы фрагментов может быть приближенно определена как $Q = M^* - M$, где M – масса основного состояния ядра, соответствующего заряду и весу анализируемой системы, M^* – инвариантная масса системы фрагментов $M^{*2} = (\sum P_j)^2 = \sum (P_i \cdot P_k)$, $P_{i,k}$ – 4-импульсы фрагментов i и k , определяемые в уже описанных приближениях.

Представлены исследования когерентной диссоциации релятивистских ядер ^{12}C и ^{16}O (§II.2). В начале 70-х годов на синхрофазотроне ОИЯИ был впервые получен пучок ядер ^{12}C с энергией $3.65A$ ГэВ и выполнены облучения эмульсионных стопок. Наблюдались события когерентной диссоциации («белые» звезды), среди которых единственным вариантом топологии оказалась тройка двухзарядных следов 3α . В данном случае процесс $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$, являющийся классическим кластерным развалом, надежно наблюдается в релятивистской кинематике.

Ключевым стал вывод о наблюдении релятивистских распадов $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$, указавший на возможности изучения в ядерной эмульсии систем α -кластеров, начиная с минимальной относительной энергии. Изучение «белых» звезд $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ на высоком уровне статистики (641 «белая» звезда) продемонстрировало принципиальную возможность исследования эмульсионным методом процессов, имеющих сечения $10^{-2} - 10^{-3}$ от неупругого сечения. Решающими факторами оказываются: ориентация на ускоренный поиск событий требуемого канала, толщина мишени и эффективность наблюдения.

Описаны особенности когерентной диссоциации более тяжелых ядер (§II.3). Прогресс в развитии синхрофазотрона как источника релятивистских ядер, достигнутый в 80-е годы, позволил выполнить облучения эмульсионных стопок в пучках ядер ^{22}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si и ^{32}S [9]. Основная особенность – доминирование «белых» звезд в статистике периферических взаимодействий, что позволяет выделить их в класс взаимодействий, имеющий перспективы детального исследования.

Таблица 1. Распределение взаимодействий ядер ^{22}Ne с энергией $3.22A$ ГэВ по множественности следов фрагментов мишени n_b и n_g для каналов диссоциации с сохранением суммой зарядов фрагментов $\sum Z_{fr} = 10$ в конусе фрагментации и без образования мезонов ($n_s = 0$). В скобках – доля канала в процентах.

| n_b | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | >3 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|---|---|----|
| n_g | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $F + H$ | 26 (19.5) | 9 (15.0) | 13 (44.8) | 2 | - | 1 |
| $O + He$ | 54 (40.6) | 19 (31.7) | 2 (6.9) | - | 1 | 1 |
| $O + 2H$ | 12 (9.0) | 7 (11.7) | - | - | - | - |
| $N + He + H$ | 12 (9.0) | 7 (11.7) | 4 (13.8) | 1 | - | - |
| $N + 3H$ | 3 (2.3) | 3 (5.0) | - | - | - | - |
| $C + 2He$ | 5 (3.8) | 3 (5.0) | 3 (10.3) | 1 | - | - |
| $C + 2He + 2H$ | 5 (3.8) | 3 (5.0) | 3 (10.3) | - | - | - |
| $C + 4H$ | 2 (1.0) | - | - | - | - | - |
| $B + Li + H$ | 1 (0.8) | - | - | - | - | - |
| $B + 2He + H$ | 2 (1.5) | 1 (1.7) | - | - | - | - |
| $B + He + 3H$ | 2 (1.5) | 1 (1.7) | - | - | - | - |
| $B + 5H$ | 1 (0.8) | - | 1 (3.4) | - | - | - |
| $2Be + 2H$ | - | 1 (1.7) | - | - | 1 | - |
| $Be + Li + 3H$ | 1 (0.8) | - | - | - | - | - |
| $Be + 3He$ | 2 (1.5) | - | - | - | - | - |
| $Be + He + 4H$ | 1 (0.8) | - | - | - | - | - |
| $Li + 3He + H$ | - | 1 (1.7) | - | - | - | - |
| $5He$ | 3 (2.3) | - | 1 (3.4) | 2 | - | 1 |
| $4He + 2H$ | 1 (0.8) | 5 (8.3) | 2 (6.9) | - | - | - |

Это утверждение можно проиллюстрировать на основе массива измерений неупругих взаимодействиях ядер ^{22}Ne с энергией $3.22A$ ГэВ, имеющего наибольшую статистику. В табл. 1 прослеживается распределение по зарядовой топологии событий с сохранением суммарного заряда ядра $\sum Z_{fr} = 10$ в конусе фрагментации и без образования мезонов ($n_s = 0$) от множественности следов мишени n_b и n_g . Присутствуют все каналы - от отделения одиночных фрагментов $Z_{fr} = 1$ и 2 от «холодного остатка» первичного ядра ^{22}Ne до его полного разрушения на легчайшие ядра.

В образовании $N\alpha$ -частичных ансамблей, имеющих узкое распределение по скоростям в с. ц. м., может проявиться ядерное состояние аналогичное разреженному конденсату Бозе-Эйнштейна (БЕС). Рис. 2 представляет для них нормированное распределение по энергии возбуждения $Q = Q/4N_\alpha$. На статистике 4100 взаимодействий ядер ^{22}Ne среди событий $^{22}\text{Ne} \rightarrow 5\alpha$ обнаружены две «белые» звезды с весьма малыми Q равными 400 и 600 кэВ на нуклон. Детектирование таких «холодных» 5α -состояний является аргументом в пользу поисков α -кластерных БЕС состояний методом

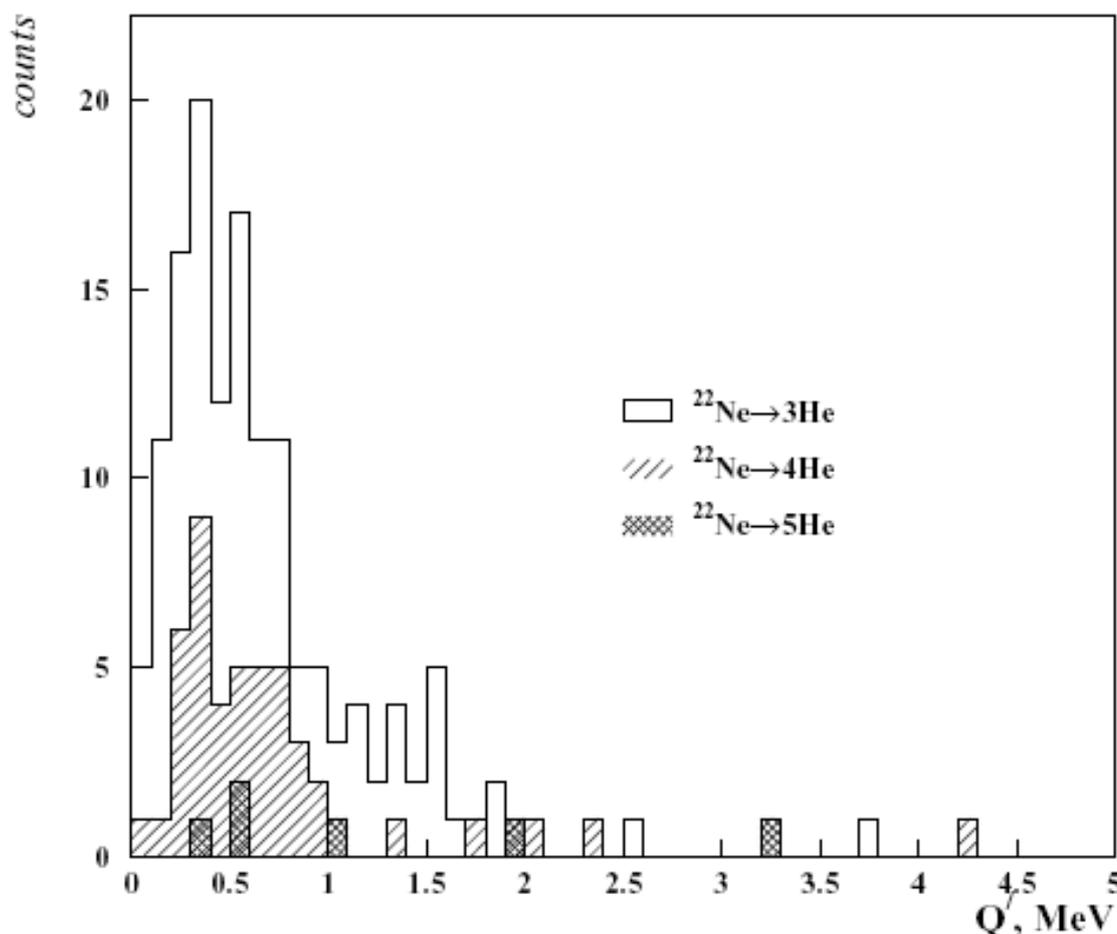


Рис. 2. Распределение α -частичных пар по нормированной энергии возбуждения Q' для каналов фрагментации $^{22}\text{Ne} \rightarrow N\alpha$ [10]

релятивистской фрагментации и мотивацией для исследования более легких $N\alpha$ -систем как элементов этого квантового состояния.

События множественной фрагментации релятивистских ядер вплоть до их полного разрушения на легчайшие ядра и нуклоны без возбуждения ядер мишени надежно наблюдались для ядер Au и Pb и даже U . Представленные выводы мотивируют дальнейшие исследования систем ядерных кластеров методом релятивистской фрагментации. По-существу, были сделаны совершенно необходимые, однако только первые шаги в этом направлении.

Ультрапериферические 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 важнейших процессов нуклеосинтеза.

Предельная ограниченность статистики «белых» звезд и нарастающие сложности измерений, казалось, вели к выводу, что эмульсионный метод себя исчерпал. Однако, вновь полученные данные по взаимодействиям

релятивистских ядер ${}^6\text{Li}$ в ядерной эмульсии способствовали очередному осознанию его возможностей для решения задач кластерной структуры. При продвижении к более тяжелым ядрам группа кластерных ядер оказалась как бы забытой, может быть, потому что не могла инициировать яркие события с множеством следов. Тем не менее, именно для этих ядер удалось найти физические эффекты, связанные с изменениями в только формирующейся ядерной структуре. Поэтому эта группа ядер заслуживает систематических исследований методом релятивистской фрагментации в эмульсии.

Рассматривается проявление в релятивистской фрагментации кластерной структуры ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ (§II.4). Ядро ${}^6\text{Li}$ является единственным среди стабильных ядер, за исключением дейтрона, относящимся к экзотическим ядрам, которые характеризуются усиленными сечениями взаимодействия и узкими импульсными распределениями фрагментов из-за увеличенных размеров и слабой связи нуклонов. Особенностью изотопного состава фрагментов ядра ${}^6\text{Li}$ стал большой выход дейтронов, практически равный выходу протонов. Установлено, что в когерентной диссоциации релятивистского ядра ${}^6\text{Li}$ лидирует кластерная система $\alpha + d$. Развитие проекта БЕККЕРЕЛЬ сделало актуальным вопрос о тритоне как кластерном элементе в структуре легких ядер, решенном при анализе «белых» звезд ${}^7\text{Li} \rightarrow \text{He} + \text{H}$. Новые данные стимулировали теоретический анализ вкладов в сечение ядерной дифракционной диссоциации и электромагнитных взаимодействий на смеси ядер состава эмульсии. Первый тип взаимодействия охватывает диапазон по переданному поперечному импульсу $50 < P_T < 400 \text{ МэВ}/c$, а второй, существенно более узкий с $P_T < 50 \text{ МэВ}/c$.

В Главе III представлена серия первых экспериментов, выполненных по проекту БЕККЕРЕЛЬ. Рассматривается опыт облучения ядерной эмульсии в смешанном пучке релятивистских ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ (§III.1) [6,7], 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. Оценка вклада когерентного взаимодействия в сечение диссоциации составляет не менее 20%. Представлено попутное исследование взаимодействий ядер ${}^3\text{H}$ и зарядово-обменного процесса ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$, ставшее возможным из-за доминирующего вклада в состав пучка ядер ${}^3\text{H}$ (§III.2).

Следующим шагом стало исследование периферических взаимодействий релятивистских ядер ${}^7\text{Be}$, пучок которых был получен в реакции перезарядки ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be}$ (§III.3) [6,15]. В табл. 2 приведены числа событий, зарегистрированных в различных каналах фрагментации ядер ${}^7\text{Be}$. Примерно в 50% случаев реакция происходит без испускания нейтронов $\sum A_{fr} = 7$. Отчетливо прослеживается тенденция снижения статистики с ростом массового порога образования кластеров. Диссоциация релятивистских ядер ${}^7\text{Be}$ определяется кластерной конфигурацией ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$.

Таблица 2. Распределение числа взаимодействий ${}^7\text{Be}$ с суммой зарядов фрагментов $\sum Z_{fr} = 4$ по идентифицированным каналам фрагментации; приведена статистика когерентных ($n_h = 0$) и некогерентных событий ($n_h > 0$).

| Канал | ${}^4\text{He}$ + ${}^3\text{He}$ | ${}^3\text{He}$ + ${}^3\text{He}$ | ${}^4\text{He}$ + $2p$ | ${}^4\text{He}$ + d + p | ${}^3\text{He}$ + $2p$ | ${}^3\text{He}$ + d + p | ${}^3\text{He}$ + $2d$ | ${}^3\text{He}$ + t + p | $3p$ + d | $2d$ + $2p$ | ${}^6\text{Li}$ + p |
|-----------|---|---|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------|----------------|-----------------------------|
| $n_h = 0$ | 30 | 11 | 13 | 10 | 9 | 8 | 1 | 1 | 2 | - | 9 |
| $n_h > 0$ | 11 | 7 | 9 | 5 | 9 | 10 | - | - | 1 | - | 3 |

Изучены особенности периферической фрагментации ядра ${}^{10}\text{B}$ (§III.4) [8,9]. В 65% периферических взаимодействий распад ядра ${}^{10}\text{B}$ происходит на две частицы с зарядом $Z_{fr} = 2$ и одну частицу с зарядом $Z_{fr} = 1$ (рис. 3), из них в 40% случаев однозарядной частицей является дейтрон. В 10% событий содержатся одновременно фрагменты Li и He (рис. 4), что также можно рассматривать как корреляцию $\alpha + d$. Всего в 2% событий содержатся фрагменты с зарядами, равными $Z_{fr} = 4$ и 1 (ядро ${}^9\text{Be}$ и протон). Канал фрагментации $\text{He} + 3\text{H}$ (развал одного из α -кластеров), составляет 15%. Соотношение событий в каналах $2\text{He} + d$ и $2\text{He} + p$ примерно равно, что аналогично фрагментации ядра ${}^6\text{Li}$ и указывает на обильный выход дейтронов.

Рассматриваются особенности периферической фрагментации ядра ${}^{11}\text{B}$ (§III.5) [14]. Установлено лидирование канала $2\text{He} + \text{H}$, как и в случае ядра ${}^{10}\text{B}$. Большая доля тритонов в «белых» звездах говорит в пользу его существования в качестве кластера в ${}^{11}\text{B}$. Наблюдались события неупругой перезарядки ядра ${}^{11}\text{B}$ в возбужденные состояния ядра ${}^{11}\text{C}^*$ (т. е., $\sum Z_{fr} = 6$ при $Z_{pr} = 5$).

В **Главе IV** описан эксперимент по исследованию кластерных особенностей фрагментации ядер ${}^9\text{Be}$ [6,9,112,16-19]. Ядро ${}^9\text{Be}$ демонстрирует свойства слабосвязанной системы $2\alpha + n$, что делает его источником генерации α -частичных пар без комбинаторных усложнений. Представлены угловые корреляции α -частиц (§IV.1). В результате ускоренного сканирования найдено 362 события фрагментации ядра ${}^9\text{Be}$ с образованием двух α -частиц в переднем конусе фрагментации с углом раствора до 0.1 рад (примеры на рис. 5). Особенностью распределения по углам разлета Θ для найденных пар α -частиц является наличие двух пиков (рис. 6). Около 81% событий по величине угла разлета Θ образуют две примерно равные группы – это «узкие» α -пары в интервале $0 < \Theta_{n(\text{arrow})} < 10$ мрад и «широкие» - $15 < \Theta_{w(\text{ide})} < 45$ мрад. Присутствует небольшое число «промежуточных» α -пар $10.5 < \Theta_{m(\text{edium})} < 15$ мрад и более широких - $45 < \Theta_{v(\text{ery})w(\text{ide})} < 114$ мрад. Физический смысл распределения по углам разлета Θ проясняется в распределении инвариантной величины $Q_{2\alpha}$ (рис. 7), характеризующей энергию возбуждения (§IV.2).

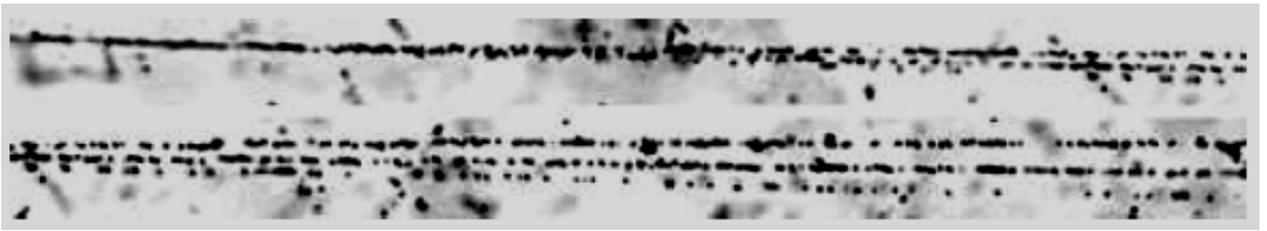


Рис. 3. Диссоциация ядра $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$

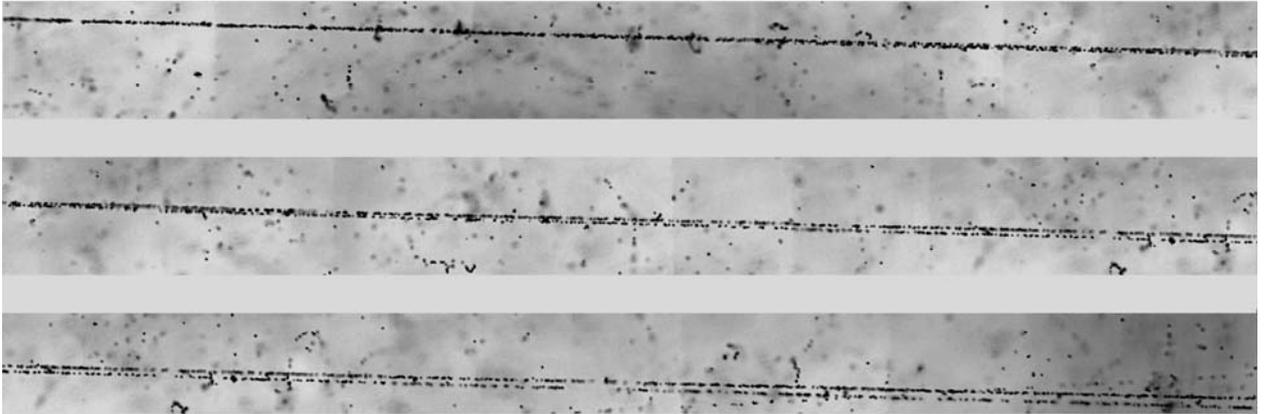
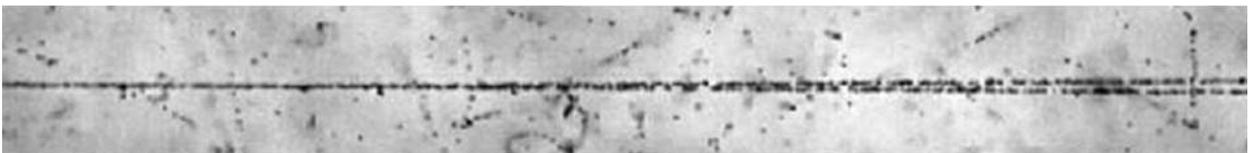
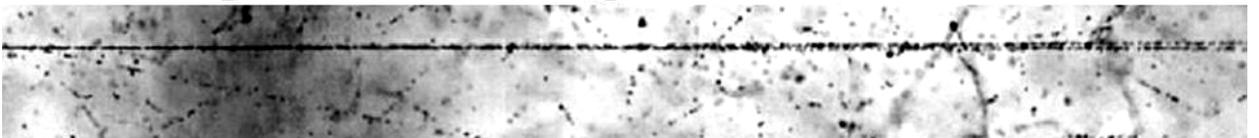


Рис. 4. Диссоциация ядра $^{10}\text{B} \rightarrow \text{Li} + \text{He}$

«белая» звезда



звезда с протоном отдачи (g-частицей)



звезда с тяжелым осколком (b-частицей)

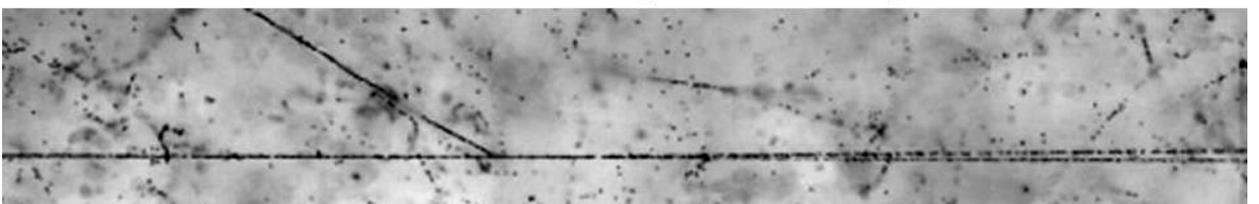


Рис. 5. Микрофотография событий фрагментации ядра ^9Be с образованием двух α -частиц в переднем конусе фрагментации

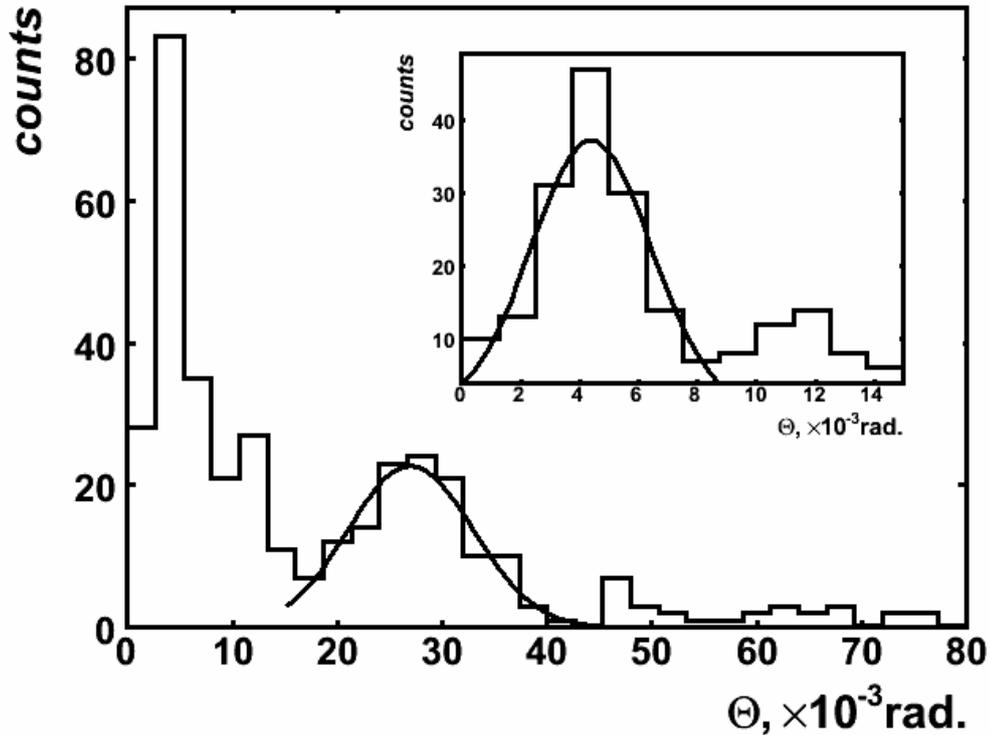


Рис. 6. Распределение событий фрагментации ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ по углу разлета Θ ; на вставке – увеличенное распределение событий в области $\theta < \Theta_n < 10.5 \text{ мрад}$

Для $(75 \pm 10) \%$ событий с узким углом разлета Θ_n в распределении по величине $Q_{2\alpha}$ характеризуется средним значением $\langle Q_{2\alpha} \rangle = 86 \pm 4 \text{ кэВ}$ со среднеквадратичным отклонением $\sigma(Q_{2\alpha}) = 48 \pm 2 \text{ кэВ}$. Величина $\langle Q_{2\alpha} \rangle$ совпадает с энергией распада основного состояния 0^+ ядра ${}^8\text{Be}$. Благодаря много меньшей ширине этого состояния, величина $\sigma(Q_{2\alpha})$ может служить оценкой разрешения. Для событий с широким углом разлета Θ_w получено значение $\langle Q_{2\alpha} \rangle = 3.1 \pm 0.1 \text{ МэВ}$ при $\sigma(Q_{2\alpha}) = 1.3 \pm 0.1 \text{ МэВ}$. В этом случае $\langle Q_{2\alpha} \rangle$ и $\sigma(Q_{2\alpha})$ соответствуют первому возбужденному состоянию 2^+ ядра ${}^8\text{Be}$. В целом, можно сделать вывод, что 72% событий фрагментации ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$, протекают через промежуточные состояния 0^+ и 2^+ ядра ${}^8\text{Be}$. Именно благодаря этому обстоятельству формируется двухпиковая структура в распределении углов разлета Θ , а для описания распределения α -частиц по углу вылета θ требуется два распределения Релея.

Классификация взаимодействий в канале ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ по типу участвующего ядра-мишени позволяет получить распределения суммарных поперечных импульсов P_{Tsum} пар α -частиц для когерентной диссоциации на ядрах групп $AgBr$ ($n_h = 0$) и развале на ядрах H ($n_g = 1$) (§IV.3). Приблизительно 80% взаимодействий на ядрах группы $AgBr$ в канале ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ характеризуются параметром распределения Релея $\sigma_{AgBr}(P_{Tsum}) = (77 \pm 7) \text{ МэВ/с}$.

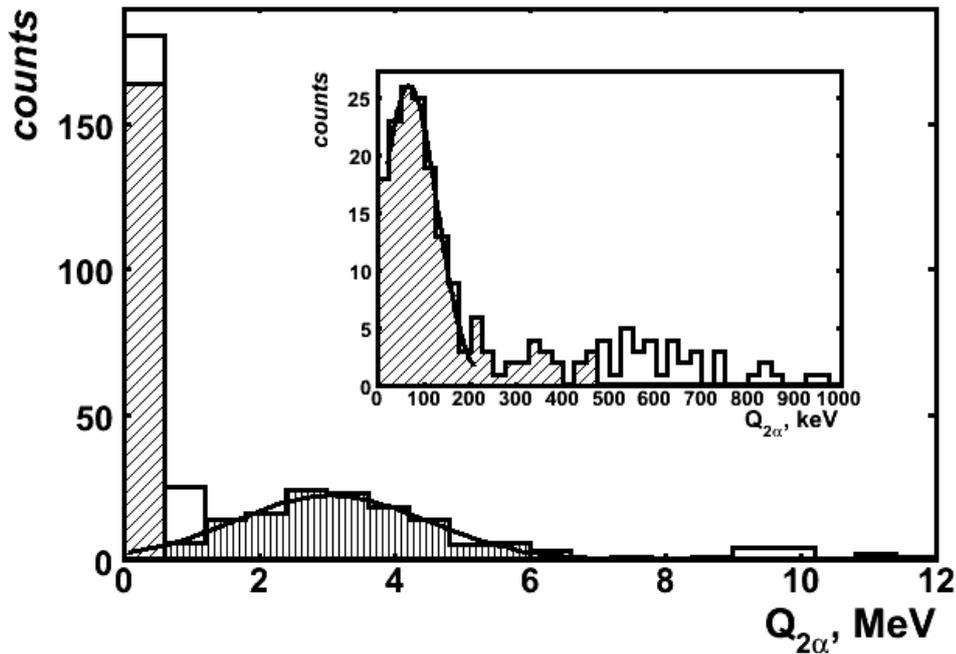


Рис. 7. Распределение событий фрагментации ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ по величине энергии $Q_{2\alpha}$ пары α -частиц; наклонно заштрихованная гистограмма - события с углами разлета Θ_n ; вертикально заштрихованная гистограмма - события с углами разлета Θ_w ; на вставке – увеличенное распределение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

Такое значение объяснимо в рамках обсуждаемой статистической модели. Величина P_{Tsum} может определяться поперечным импульсом, уносимым нейтроном. Наблюдаемое различие в форме распределений может свидетельствовать о разнице условий образования α -пар в реакциях на указанных группах ядер.

Распределение 88% событий по величине P_{Tsum} для группы Н, характеризуется величиной $\sigma_H(P_{Tsum}) = (126 \pm 23) \text{ МэВ/с}$. По-видимому, за развал ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ в реакции на протоне отвечает более жесткий механизм взаимодействия, чем при когерентной диссоциации на ядрах группы AgBr. Рассматривается распределение α -частиц по поперечному импульсу и проведено сравнение со статистической моделью. Описание распределений по фрагментации ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ требует выхода за рамки статистической модели, состоящем в раздельном описании двух состояний ${}^8\text{Be}$ - «широкого» 0^+ и «компактного» 2^+ .

Дано резюме проведенного исследования ядра ${}^9\text{Be}$, и обсуждается полученная физическая картина (§IV.4). Следуя представлениям о ядре ${}^9\text{Be}$, как о кластерной систем $\alpha + n + \alpha$, можно заключить, что в основном состоянии этого ядра с 50%-ой вероятностью присутствует пара α -кластеров с угловым моментом равным $L = 2$ (или D-волны). Таким образом, в экспериментальных данных по соотношению состояний ${}^8\text{Be}$ проявляется спиновый аспект его α -кластерной структуры. 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.

В Главе V описано исследование фрагментации релятивистских ядер ${}^{14}\text{N}$ [9-13]. Отправная задача состояла в выявлении роли кластеризации внешних нуклонов в виде дейтрона. В процессе исследования выявилась яркая роль канала фрагментации ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$. Представлен анализ периферических взаимодействий ядер ${}^{14}\text{N}$ (§V.1). Для анализа были отобраны события N_{pf} (табл. 3), в которых суммарный заряд фрагментов $\sum Z_{fr}$ равен заряду ядра-снаряда $Z_{pr} = 7$ и отсутствуют рожденные частицы ($n_s = 0$). Реализуются каналы, начиная с $C + H$ до почти полного расщепления $\text{He} + 5\text{H}$. Основной вклад (77%) вносят каналы $C + H$, $3\text{He} + H$ и $2\text{He} + 3\text{H}$. Доля событий $C + H$ достаточно значительна – 25%. Доля событий $B + \text{He}$ оказалась малой – всего 8 %. Лидирующую роль в статистике, как для «белых» звезд, так и для событий с образованием фрагментов мишени, занимает множественный канал ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + H$ (35%). Идентификация фрагментов $Z_{fr} = 1$ и 2 для каналов ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + H$ и $C + H$ привела к соотношению изотопов ${}^1\text{H}$ и ${}^2\text{H} \approx 17:7$, указывая на заметное снижение выхода дейтронов по сравнению со случаями ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$. Смена соотношения протонов и дейтронов для ядра ${}^{14}\text{N}$ представляет интерес как чувствительный тест релятивистской диссоциации к изменению энергии связи структурных элементов.

Таблица 3. Распределение периферических взаимодействий N_{pf} ($n_s = 0$) ядер ${}^{14}\text{N}$ с импульсом 2.86A ГэВ/с по зарядовым каналам с $\sum Z_f = 7$, в том числе 61 «белая звезда» N_{ws} и 100 событий с фрагментами мишени N_{tf}

| Канал | $C + H$ | $B + \text{He}$ | $B + 2H$ | $\text{Be} + \text{He} + H$ | $\text{Li} + 4H$ | $\text{Li} + \text{He} + 2H$ | $2\text{He} + 3H$ | $3\text{He} + H$ | $\text{He} + 5H$ |
|----------|---------|-----------------|----------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| N_{ws} | 16 | 5 | 5 | 2 | 1 | - | 6 | 21 | 5 |
| N_{tf} | 24 | 4 | 3 | 5 | 2 | 3 | 21 | 35 | 3 |
| N_{pf} | 40 | 9 | 8 | 7 | 3 | 3 | 27 | 56 | 8 |

Детально изучена фрагментация ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + X$ путем ускоренного поиска событий (§V.2). В распределении по $Q_{2\alpha}$ пары α -частиц проявляется вклад распада ядра ${}^8\text{Be}$ из основного состояния 0^+ (рис. 8). Доля пар α -частиц, являющихся продуктами распада ${}^8\text{Be}$ в основном состоянии 0^+ , составляет – 25 - 30 %. Для оценки энергетического масштаба образования 3α -систем в канале ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$ представлено распределение по инвариантной энергии возбуждения $Q_{3\alpha}$ относительно основного состояния ядра ${}^{12}\text{C}$ (рис. 9). Основная часть событий сконцентрирована в области $Q_{3\alpha}$ от порога до 14 МэВ , перекрывающей α -кластерные уровни ядра ${}^{12}\text{C}$. Смягчение

условий отбора для событий $3He + H$, при котором разрешено образование фрагментов мишени, не ведет к смещению пика 3α -возбуждений. Критерию $Q_{3\alpha} < 20 \text{ МэВ}$ удовлетворяют почти все «белые» звезды». Оценивая в целом представленные в этом параграфе результаты, отметим их соответствие исследованиям релятивистской фрагментации ядер $^{12}C \rightarrow 3\alpha$ и $^{16}O \rightarrow 4\alpha$. Это обстоятельство указывает на универсальность заселения 3α -состояний.

Представлены наблюдения полностью идентифицированных и редких каналов диссоциации ядра ^{14}N (§V.3). Впервые для ядра ^{14}N были идентифицированы процессы релятивистской диссоциации $^{11}C + ^3H$, $^6He + ^4He + ^3He + p$, $^4He + 2 ^3He + d$, для которых характерны глубокая перегруппировка α -частичной структуры этого ядра и преодоление высоких энергетических порогов. Кроме того, обнаружены процессы неупругой перезарядки $^{14}N \rightarrow 3He + 2H$, $^{14}N \rightarrow 3He$, $^{14}N \rightarrow 2He + 2H$. Несмотря на невозможность систематического представления данных по каналам фрагментации с полной идентификацией релятивистских фрагментов, стоит отметить образование среди «белых» звезд $A_{pr} = \sum A_{fr}$ необычных состояний, связанных с виртуальной перегруппировкой нуклонов над пороговыми 3α -частичными связями.

Завершает главу резюме (§V.4). Впервые изучена детальная картина релятивистской диссоциации ядер ^{14}N в ядерной фотографической эмульсии, облученной на нуклотроне ОИЯИ. Уникальные возможности эмульсионного метода позволили систематически изучить зарядовую топологию, угловые распределения и изотопический состав релятивистских фрагментов ядер ^{14}N как в наиболее периферических взаимодействиях («белых» звездах), так и в событиях с образованием фрагментов ядер мишени и мезонов. Установлено, что множественный канал диссоциации $^{14}N \rightarrow 3He + H$ лидирует в распределении по зарядовой топологии фрагментов. Он дает вклад примерно 50% как для «белых» звезд, так и для событий с образованием фрагментов мишени и мезонов. Таким образом, ядро ^{14}N оказывается наиболее эффективным источником образования 3α -частичных систем. Получена значительная статистика для канала диссоциации $^{14}N \rightarrow 3He + H$, позволившая оценить по угловым измерениям энергетический масштаб образующихся в периферической фрагментации 3α -частичных систем. Впервые изучены спектры по суммарному поперечному импульсу α -фрагментов в событиях $^{14}N \rightarrow 3He + X$. Среднее значение величины суммарного переданного системе из 3α -частиц поперечного импульса для «белых» звезд существенно меньше, чем для взаимодействий, сопровождающихся образованием одного или нескольких фрагментов ядра-мишени.

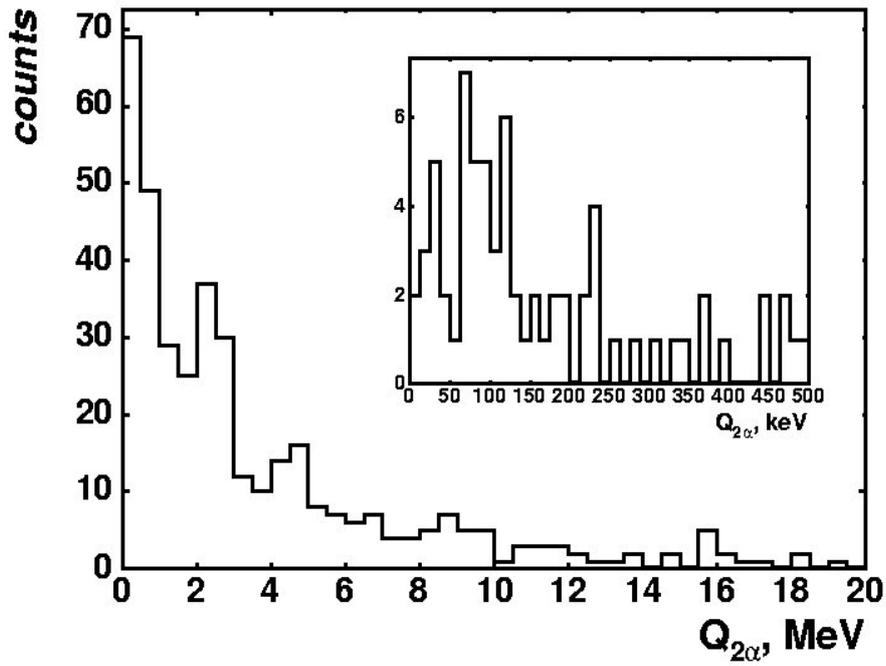


Рис. 8. Распределение событий фрагментации $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + X$ по $Q_{2\alpha}$ пары α -частиц, образующихся в реакции; на вставке: часть распределения в интервале между 0 - 500 кэВ

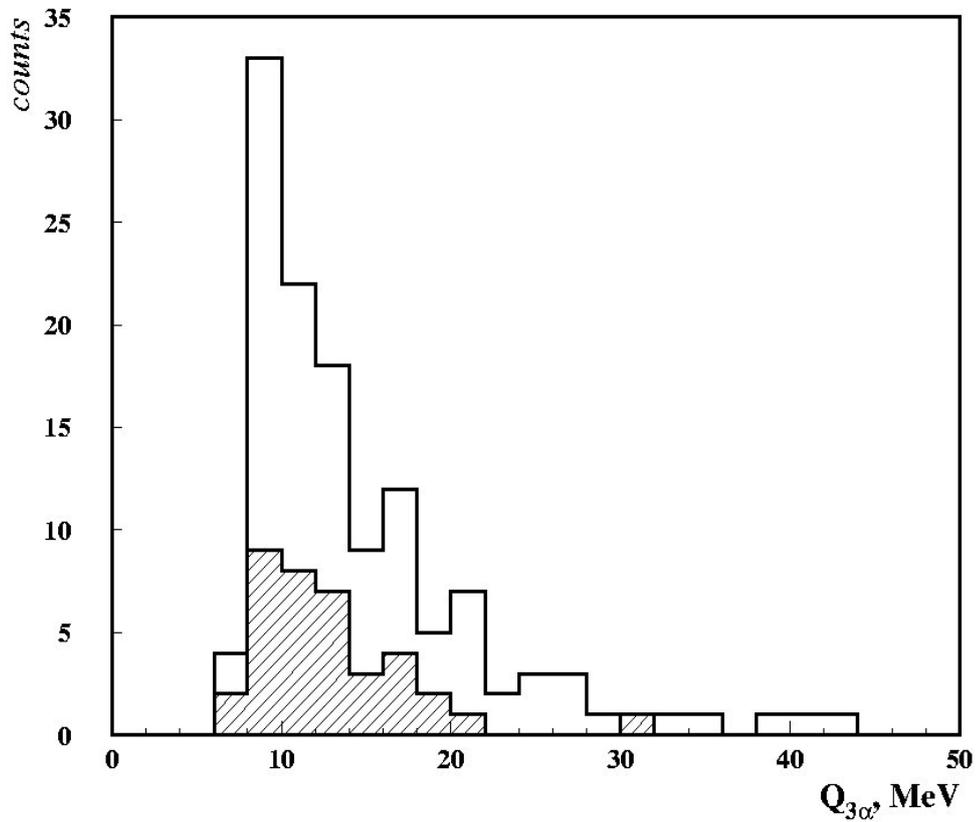


Рис. 9. Распределение по $Q_{3\alpha}$ троек α -частиц для $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha + X$ для всех событий и «белых звезд» (заштрихованная гистограмма)

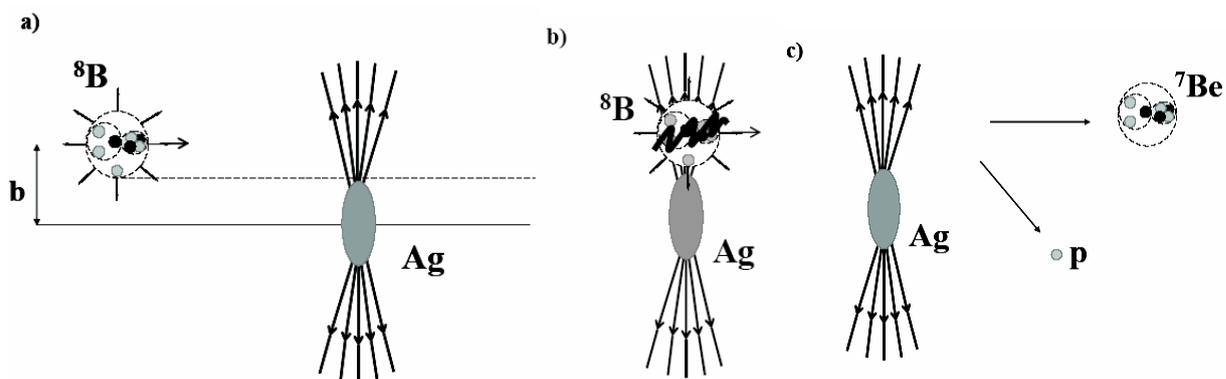


Рис. 10. Схема электромагнитного процесса диссоциации релятивистского ядра 8B в поле тяжелого ядра: сближение ядер с прицельным параметром b (а), поглощение ядром 8B квазиреального фотона (б), диссоциация на пару фрагментов $p + {}^7Be$.

В **Главе VI** рассмотрен эксперимент, ориентированный на поиск электромагнитной диссоциации релятивистского ядра 8B , являющегося наиболее чувствительным к электромагнитному взаимодействию с ядром мишени (рис. 10) [6,12,19-21]. Полученные данные позволяют оценить перспективы исследования сильновозбужденных состояний ядра 8B как трехцентровых систем из кластеров ${}^{1,2}H$, ${}^{3,4}He$ и 6Li методом релятивистской диссоциации. Представлены особенности электромагнитных взаимодействий релятивистских ядер и их экспериментальное исследование (§VI.1).

Обсуждается теоретический анализ вкладов кулоновской, ядерной диссоциации и реакции срыва (стриппинга) в сечение реакции ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ и предсказания зависимости сечения от энергии ядра 8B вплоть до $\approx 2A$ ГэВ. Теоретические данные использованы для оценки сечений процесса электромагнитной и дифракционной диссоциации на ядрах эмульсии. Эти механизмы на ядрах $AgBr$ становятся конкурирующими.

Существенным условием для выделения взаимодействий электромагнитной природы становится меньший суммарный поперечный импульс фрагментов по сравнению со значениями типичными для дифракционной диссоциации. Обсуждается первичный анализ облучения в пучке 8B и зарядовый состав релятивистских фрагментов (§VI.2). В исследованиях с использованием эмульсии, облученной во вторичных пучках, необходимо обеспечить простоту идентификации изучаемых ядер. Поэтому для формирования пучка ядер 8B на нуклотроне ОИЯИ был использован процесс фрагментации первичного пучка релятивистских ядер ${}^{10}B$ с энергией $1.2A$ ГэВ.

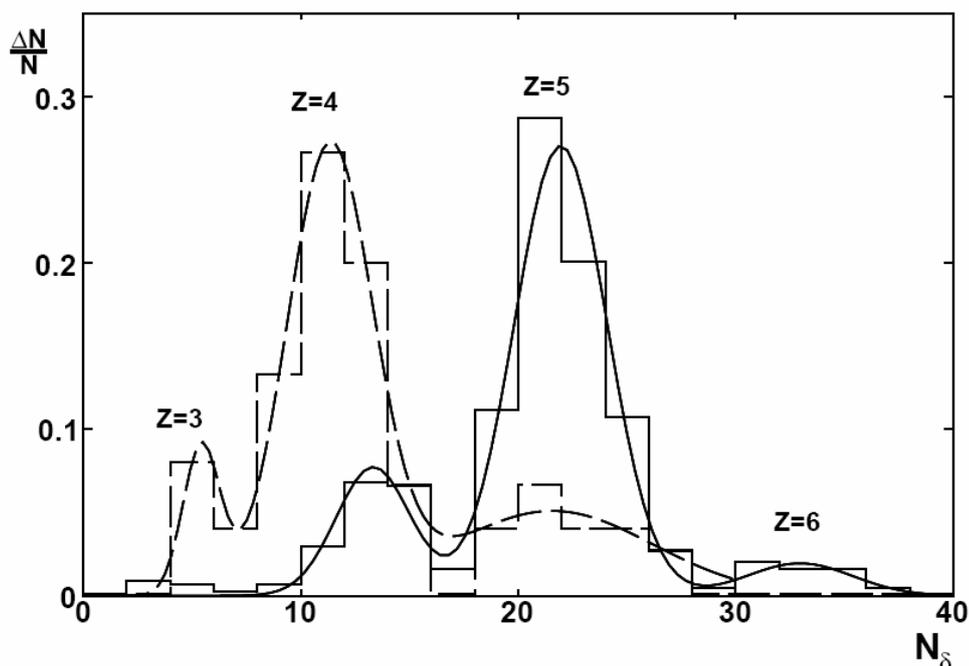


Рис. 11. Распределения по числу δ -электронов на 1 мм длины следов пучковых частиц, вызвавших изучаемые взаимодействия (сплошная гистограмма), и релятивистских фрагментов с зарядами $Z_{fr} > 2$

Для взаимодействий N_{pf} с $\sum Z_{fr} > 2$ выполнены измерения зарядов пучковых ядер Z_{pr} и вторичных фрагментов Z_{fr} (рис. 11). Были отобраны 434 звезды периферической фрагментации N_{pf} , в которых суммарный заряд релятивистских фрагментов в конусе фрагментации до 8° удовлетворяет условию $\sum Z_{fr} > 2$. Распределения по зарядовой топологии для событий сопровождаемых фрагментами ядра-мишени или (и) рожденными мезонами N_{if} и для «белых звезд» N_{ws} (примеры на рис. 12 и 13) проявляют качественное отличие (табл. 4).

Таблица 4. Распределение событий диссоциации ядер 8B по зарядовым модам $\sum Z_{fr} = 5$ при различном сопровождении фрагментами мишени

| | | | | | | | |
|-----------|----|---|---|---|---|---|---|
| n_g | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| n_b | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $He + 3H$ | 12 | 6 | 8 | 3 | 2 | 3 | — |
| $2He + H$ | 14 | 3 | 8 | 2 | 4 | — | 1 |
| $Be + H$ | 25 | 1 | 3 | 3 | 1 | — | — |
| B | 1 | 1 | 8 | 1 | — | 1 | — |

Представлен анализ изотопического состава релятивистских фрагментов He и H , подтверждающий идентификацию первичного изотопа как ядра 8B (§VI.3).

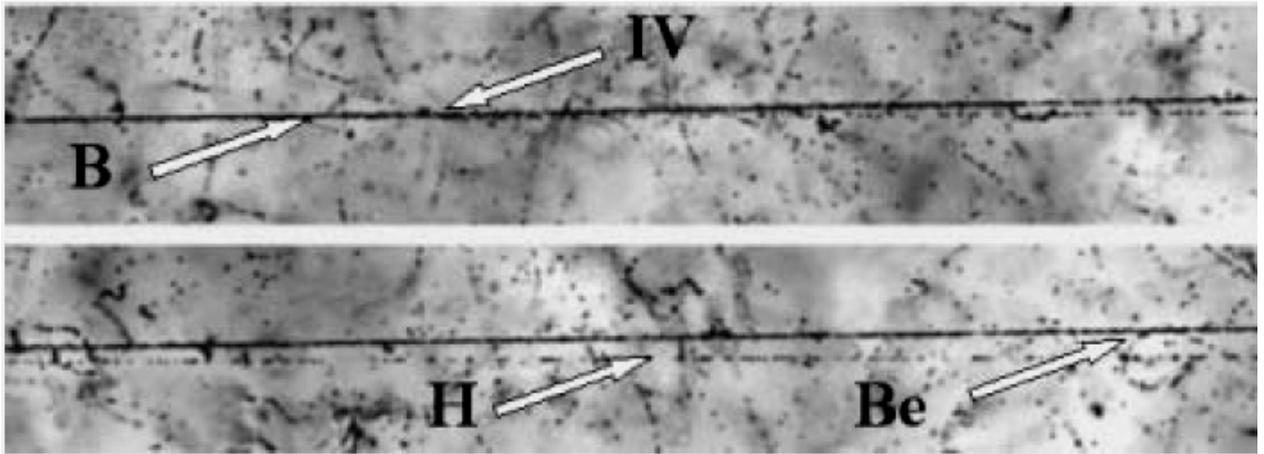


Рис 12. Диссоциация ядра ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$. На верхней фотографии указана вершина взаимодействия IV. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить фрагменты Be и H .

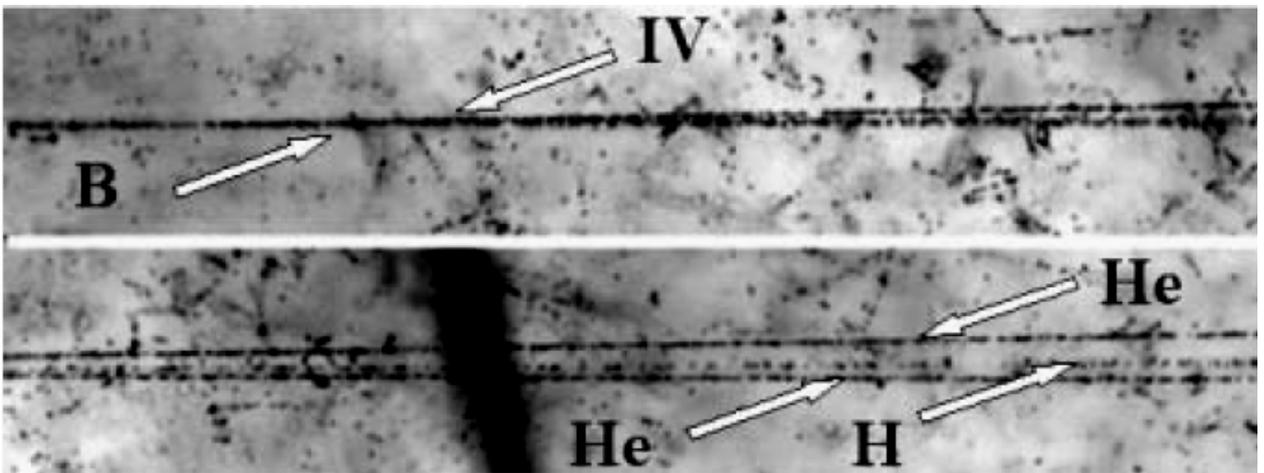


Рис. 13. Диссоциация ядра ${}^8B \rightarrow 2He + H$. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия IV и струя фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить два фрагмента He и один H .

Выполнен анализ распределений фрагментов на основе угловых измерений (§VI.4). Переход в с. ц. м. ${}^7Be + p$ ведет к среднему значению $\langle P_T^* \rangle = 62 \pm 11 \text{ МэВ/с}$ ($RMS = 54 \text{ МэВ/с}$). Его рекордно малая величина указывает на слабую связь протона и кора. Распределение векторной суммы поперечных импульсов фрагментов $P_T({}^8B^*)$ системы ${}^7Be + p$ отражает механизмы ее генерации (рис. 14). Распределение, соответствующее «белым» звездам, имеет среднее значение $\langle P_T({}^8B^*) \rangle = 95 \pm 15 \text{ МэВ/с}$ при $RMS = 73 \text{ МэВ/с}$, а для событий с фрагментами ядра-мишени и рожденными мезонами $\langle P_T({}^8B^*) \rangle = 251 \pm 29 \text{ МэВ/с}$ при $RMS = 112 \text{ МэВ/с}$. Из сравнения этих распределений можно сделать вывод, что условие $P_T({}^8B^*) < 150 \text{ МэВ/с}$ позволяет достаточно эффективно выделить кинематическую область, характерную для образования «белых звезд» ${}^7Be + p$.

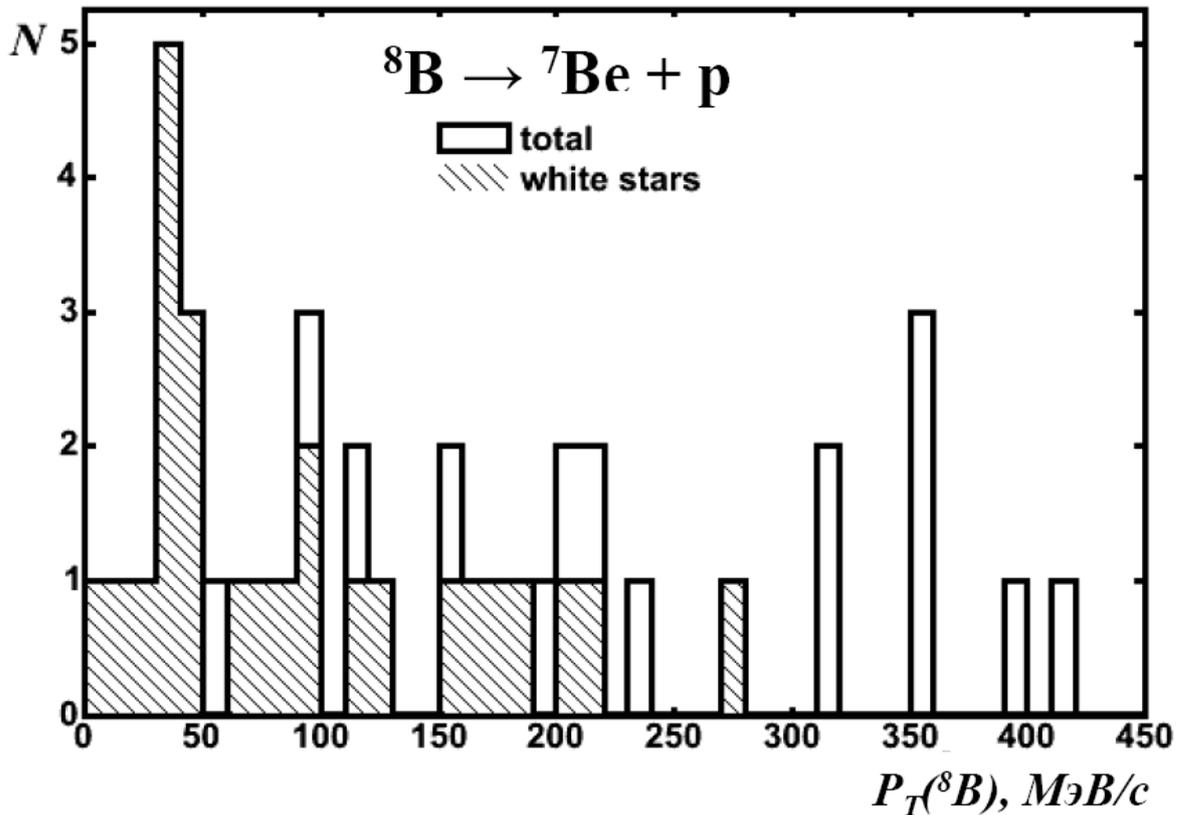


Рис. 14. Распределение по суммарному поперечному импульсу $P_T(^8B^*)$ пар $^7Be + p$, рожденных во взаимодействиях $^8B \rightarrow ^7Be + p$; заштрихованная гистограмма соответствует «белым» звездам

Отобрана группа событий $^7Be + p$, отвечающих критериям электромагнитного образования (§VI.5). Из-за весьма сильной зависимости электромагнитного сечения от заряда ядра мишени вида Z^2 , можно предположить пропорциональный вклад ядер $AgBr$ из состава эмульсии и пренебречь вкладом легких ядер. Тогда полученные величины сечений составляют $\sigma_{Ag} = 81 \pm 21$ мбн и $\sigma_{Br} = 44 \pm 12$ мбн. Для электромагнитной диссоциации на ядре Pb экстраполяция σ_{Ag} ведет к значению $\sigma_{Pb} = 230 \pm 60$ мбн, которое близко к теоретическому значению ≈ 210 мбн, что указывает на правильность отбора событий.

В этом облучении впервые наблюдались события диссоциации ядер ^{10}C (§VI.6). Ядра ^{10}C могли рождаться путем перезарядки $^{10}B \rightarrow ^{10}C$ в мишени, предназначенной для генерации 8B , и захватываться во вторичный пучок из-за малой разницы по магнитной жесткости. Идентификация зарядов первичных следов позволила выделить события с $Z_{pr} = 6$. «Белые» звезды с $\sum Z_{fr} = 6$ не содержат фрагментов с $Z_{fr} > 2$. Их топология соответствует диссоциации ядра ^{10}C , имеющего основу в виде 8Be , по наиболее вероятному каналу $^{10}C \rightarrow ^8Be + 2p$.

Главу VI завершает резюме (§VI.7). Совокупность данных по измерению зарядов пучковых следов, зарядовой топологии периферических столкновений, по угловым характеристикам, а также по идентификации релятивистских фрагментов p , 3He и 4He указывает на то, что в

использованной эмульсии доминируют пучковые следы именно ядер 8B . Таким образом, получено подтверждение того, что на нуклотроне ОИЯИ впервые успешно решена задача облучения эмульсии ядрами 8B . Получена систематическая картина распределения по зарядовым комбинациям фрагментов в периферических взаимодействиях ядер 8B в ядерной эмульсии. Главный вывод состоит в том, что в событиях без образования фрагментов ядер мишени и мезонов вклад канала диссоциации ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ является лидирующим.

Анализ угловых корреляций в событиях с фрагментами мишени и без них позволил обосновать отбор событий электромагнитной диссоциации ${}^8B \rightarrow {}^7Be + p$ по суммарному поперечному импульсу фрагментов $P_T({}^8B^*) < 150$ МэВ/с, энергии возбуждения $Q_{pBe} < 5$ МэВ и азимутальному углу $\varepsilon_{pBe} > \pi/2$ разлета фрагментов 7Be и p . Для событий ${}^7Be + p$ без образования фрагментов ядер мишени и рожденных мезонов впервые получена оценка сечения электромагнитной диссоциации на ядрах из состава эмульсии. Экстраполяция этого значения на ядро свинца указывает на согласие с теоретическими расчетами. Впервые наблюдались события периферической диссоциации ядра ${}^{10}C$. Получено указание на то, что канал диссоциации ${}^{10}C \rightarrow 2He + 2H$ преобладает в событиях без образования фрагментов ядер мишени и заряженных мезонов. Идентификация изотопа ${}^{10}C$ указывает на перспективность формирования пучка ${}^{10}C$ в реакции перезарядки ${}^{10}B \rightarrow {}^{10}C$ в условиях, удобных для исследований в эмульсии. Выводы этой главы представляют ценность как основы для анализа результатов по облучениям эмульсии ядрами 9C и ${}^{12}N$.

В Главе VII рассмотрены эксперименты по диссоциации нейтронодефицитных ядер, формируемых во фрагментации или перезарядке первичных ядер ${}^{12}C$ с энергией $1.2A$ ГэВ [6,10,22]. Представлены первые результаты по когерентной диссоциации релятивистских ядер 9C (§VII.1). Был сформирован вторичный пучок, оптимизированный для селекции ядер 9C . На общей длине следов 253.7 м было найдено 1746 взаимодействий (в основном ядер C). Отношение интенсивностей ядер $Z_{pr} > 2$ и $Z_{pr} = 2$ составило примерно $1 : 10$. Распределение «белых» звезд суммой зарядов релятивистских фрагментов $\sum Z_{fr} = 6$ представлено в табл. 5.

Таблица 5. Распределение числа «белых» звезд N_{ws} по конфигурациям фрагментов с суммарным зарядом $Z_{fr} = 6$ в облучении ядрами 9C

| $\sum Z_{fr}$ | $B+H$ | $Be+2H$ | $3He$ | $C+He$ | $Li+He+H$ | $Li+3H$ | $2He+2H$ | $He+4H$ | $6H$ |
|---------------|-------|---------|-------|--------|-----------|---------|----------|---------|------|
| N_{ws} | 15 | 16 | 16 | 4 | 2 | 2 | 24 | 28 | 6 |

Благодаря отсутствию стабильных изотопов 9B и 8Be события с фрагментами с $Z_{fr} = 5$ и 4 и идентифицированными зарядами $Z_{pr} = 6$, интерпретируются как ${}^9C \rightarrow {}^8B + p$ и ${}^7Be + 2p$. Средние значения суммы поперечных импульсов составляют $\langle P_T({}^8B + p) \rangle = 246 \pm 44$ МэВ/с и $\langle P_T({}^7Be$

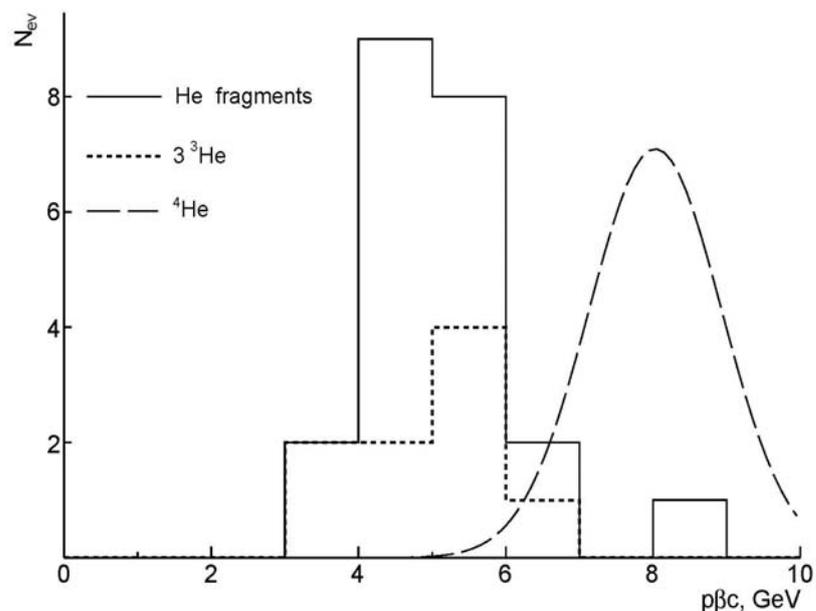


Рис. 15. Распределение измеренных величин $p\beta c$ для двухзарядных фрагментов из «белых» звезд $3He$ (сплошная гистограмма) и из полностью идентифицированных события 3^3He (точки); штрихами условно представлено ожидаемое распределение для 4He

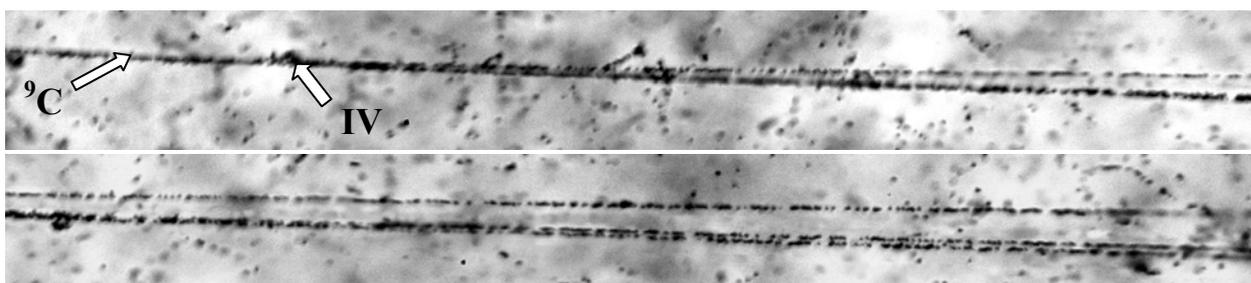


Рис. 16. Микрофотография «белой звезды» $^9C \rightarrow 3^3He$ при энергии $1.2A$ ГэВ. На верхней фотографии видна вершина диссоциации и струя фрагментов в узком конусе; при продвижении вдоль струи различаются три релятивистских фрагмента He (нижняя фотография)

$+ 2p) > = 219 \pm 38$ МэВ/с. Можно заключить, что оба распределения по P_T находятся в области, которая характерна для ядерной дифракционной диссоциации. Данные по топологии указывают на правильность формирования пучка. Обсуждаются наблюдение и идентификация событий $^9C \rightarrow 3^3He$ (§VII.3, рис. 15 и 16). Распределение по полному переданному импульсу имеет значение $\langle P_T(3^3He) \rangle = 335 \pm 79$ МэВ/с.

Представлены первые результаты облучения в смешанном пучке релятивистских ядер $^{12}N - ^{10}C - ^7Be$ (§VII.3) [6]. Вторичный пучок с магнитной жесткостью оптимальной для селекции ядер ^{12}N был проведен по каналу транспортировки пучка, включавшему 4 отклоняющих магнита на базе 70 м, до места облучения эмульсионной стопки. В табл. 6 приведено распределение по каналам диссоциации «белых» звезд N_{ws} , для которых выполняется условие $Z_{pr} = \sum Z_{fr}$ и $\sum Z_{fr} > 5$.

Таблица 6. Распределение по каналам диссоциации «белых» звезд N_{ws} в облучении ядрами $^{12}N - ^{10}C - ^7Be$

| Канал | $C + H$ | $^8B + He$ | $^8B + 2H$ | $^7Be + 3H$ | $2He + 2H$ | $He + 4H$ | $^8B + H$ | $^7Be + He$ | $^7Be + 2H$ |
|----------|---------|------------|------------|-------------|------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| N_{ws} | 1 | 1 | 2 | 6 | 49 | 9 | 1 | 4 | 2 |

Благодаря дефициту нейтронов, в ряде случаев можно указать изотопный состав. Наиболее вероятный канал представлен событиями $2He + 2H$, что и следовало ожидать для изотопа ^{10}C . Канал $He + 4H$ оказался подавленным. Действительно, для периферической диссоциации ^{10}C требуется преодоление высокого порога развала α -кластера. События, отвечающие диссоциации ^{12}N , сопровождаются фрагментом $Z_{fr} > 2$, что резко отличается от случая ядра ^{14}N . Таким образом, ядро 7Be проявляет себя в качестве кора ядра ^{12}N . Сделан вывод, что облучение эмульсии выполнено корректно, и оно содержит перспективы наращивания статистики «белых» звезд ^{12}N и ^{10}C .

В целом, данные этой Главы (§VII.4) указывают на то, что задачи облучения ядерной эмульсии в смешанных пучках релятивистских ядер 9C и $^{12}N - ^{10}C - ^7Be$ решены успешно, что открывает перспективы нового физического анализа. Впервые изучалась фрагментация релятивистских ядер 9C и идентифицированы события в каналах когерентной диссоциации 9C на $^8B + p$ и $^7Be + 2p$. Схожее соотношение каналов, содержащих $2He$ и $He + 2H$, при диссоциации ядер 7Be , 8B и 9C указывает на проявление ядра 7Be как основы (кора) в ядре 9C . Впервые идентифицированы события когерентной диссоциации ядра 9C в 3^3He . Для протекания такого процесса необходима перегруппировка нейтрона из α -кластера в коре 7Be и образование кластера 3He с преодолением высокого энергетического порога. Это наблюдение указывает на перспективность исследования более сложных конфигураций кластеров 3He и 4He в релятивистской фрагментации.

В **Заключении** сформулированы главные достижения и основные выводы представленного цикла исследований:

1. Предложена программа изучения нуклонной кластеризации на основе α -частиц, дейтронов, тритонов и ядер ${}^3\text{He}$ при диссоциации легких релятивистских ядер в ядерной эмульсии. Ядерная эмульсия была облучена на нуклотроне ОИЯИ целым семейством кластерных ядер, включая радиоактивные изотопы, и получен обзорный материал об образовании кластерных ансамблей.
2. Впервые исследована периферическая фрагментация релятивистских изотопов ${}^{10,11}\text{B}$, для которой обнаружено лидирование канала $2\text{He} + \text{H}$. Для когерентной диссоциации ядра ${}^{10}\text{B}$ по этому каналу установлена кластеризация на основе дейтронов, а для ядер ${}^{11}\text{B}$ - тритонов. Установлено, что диссоциация ядра ${}^7\text{Be}$ определяется кластеризацией на основе ядра ${}^3\text{He}$.
3. Впервые установлено, что диссоциация ядра ${}^9\text{Be}$ по 2α -частичному каналу, в основном, протекает через основное и первое возбужденное состояния ядра ${}^8\text{Be}$ с близкими вкладами, что соответствует теоретическому описанию основного состояния ядра ${}^9\text{Be}$.
4. Установлено лидирование диссоциации $3\text{He} + \text{H}$ для релятивистского ядра ${}^{14}\text{N}$ и ее соответствие области 3α -кластерных возбуждений ядра ${}^{12}\text{C}$ при вкладе основного состояния ядра ${}^8\text{Be}$ не менее 20%.
5. Установлены экспериментальные критерии электромагнитной диссоциации радиоактивного ядра ${}^8\text{B}$ по лидирующему каналу ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$ и получена оценка сечения электромагнитной диссоциации, экстраполяция которого на ядро свинца указывает на согласие с теоретическими расчетами.
6. Впервые изучена когерентная диссоциация радиоактивных ядер ${}^9\text{C}$, в которой идентифицированы канал $3{}^3\text{He}$, связанный с глубокой перестройкой основного состояния ядра ${}^9\text{C}$.

Публикации по теме диссертации

1. «Перспективы экспериментов на ускорительном комплексе синхрофазотрон – нуклотрон», П. И. Зарубин, Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ), 26, 523-561, 1995; «Suggested Experiments at the Dubna Synchrophasotron - Nuclotron accelerator complex», P. I. Zarubin, Physics of Particles and Nuclei, 26, 221-238, 1995.
2. «Irradiation of nuclear emulsions in relativistic beams of ${}^6\text{He}$ and ${}^3\text{H}$ nuclei» M. I. Adamovich, A. M. Baldin, V. Bradnova, M. M. Chernyavsky, V. A. Dronov, S. P. Kharlamov, A. D. Kovalenko, V. A. Krasnov, V. G. Larionova, G. I. Orlova, N. G. Peresadko, P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, N. A. Salmanova, P. I. Zarubin, Письма в ЭЧАЯ, Particles and Nuclei, Letters, 110, 29-38, 2002; nucl-ex/0206013.
3. «Nuclear Clustering Quest in Relativistic Multifragmentation» V. Bradnova, M. M. Chernyavsky, A. Sh. Gaitinov, L. A. Goncharova, L. Just, S. P.

- Kharlamov, A. D. Kovalenko, M. Haiduc, V. G. Larionova, F. G. Lepekhin, A. I. Malakhov, N. G. Peresadko, N. G. Polukhina, P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, N. A. Salmanova, B. B. Simonov, S. Vokál, P. I. Zarubin, *Few Body Systems Supplement*, 14, 241-244.
4. «Nuclear Clustering in Processes of Relativistic Multifragmentation» V. Bradnova, M. M. Chernyavsky, A. Sh. Gaitinov, L. A. Goncharova, L. Just, S. P. Kharlamov, A. D. Kovalenko, M. Haiduc, V. G. Larionova, F. G. Lepekhin, A. I. Malakhov, N. G. Peresadko, N. G. Polukhina, P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, N. A. Salmanova, B. B. Simonov, S. Vokál, P. I. Zarubin, I. G. Zarubina, *Nuclear Physics*, A734, E92-E95, 2004.
 5. «Beryllium (Boron) Clustering Quest in Relativistic Multifragmentation» V. Bradnova, M. M. Chernyavsky, A. Sh. Gaitinov, L. A. Goncharova, L. Just, S. P. Kharlamov, A. D. Kovalenko, M. Haiduc, V. G. Larionova, F. G. Lepekhin, A. I. Malakhov, N. G. Peresadko, N. G. Polukhina, P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, N. A. Salmanova, B. B. Simonov, S. Vokál, P. I. Zarubin, *Ядерная физика*, 66, 1694-1698, 2003; *Physics of Atomic Nuclei*, 66, 1646 - 1650, 2003.
 6. «Clustering Pattern of Light Nuclei in Dissociation above 1A GeV» P. I. Zarubin, *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 768, 404-406, 2005.
 7. «Secondary Nuclear Fragment Beams for Investigations of Relativistic Fragmentation of Light Radioactive Nuclei using Nuclear Photoemulsion at Nuclotron» P. A. Rukoyatkin, L. N. Komolov, R. I. Kukushkina, V. N. Ramzhin, P. I. Zarubin, *The European Physical Journal ST*, 162, 267-274, 2008.
 8. «Исследование кластеризации легких ядер в процессах релятивистской мультифрагментации», М. И. Адамович, В. Баднова, С. Вокал, С. Г. Герасимов, В. А. Дронов, П. И. Зарубин, А. Д. Коваленко, К. А. Котельников, В. А. Краснов, В. Г. Ларионова, Ф. Г. Лепехин, А. И. Малахов и др., *Ядерная физика*, 67, 533-536, 2004; «Investigation of Clustering in Light Nuclei by Means of Relativistic Multifragmentation Processes» M. I. Adamovich et al., *Physics of Atomic Nuclei*, 67, 514-517, 2004; arXiv:nucl-ex/0301003.
 9. «Топология «белых» звезд в релятивистской фрагментации легких ядер» Н. П. Андреева, В. Баднова, С. Вокал, А. Вокалова, А. Ш. Гайтинов, С. Г. Герасимов, Л. А. Гончарова, В. А. Дронов, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, А. Д. Коваленко, А. Кравчакова, В. Г. Ларионова, О. В. Левицкая, Ф. Г. Лепехин, А. И. Малахов, Г. И. Орлова Н. Г. Пересадько, Н. Г. Полухина, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, Н. А. Салманова, В. Р. Саркисян, Б. Б. Симонов, Е. Стан, Р. Станоева, М. М. Чернявский, М. Хайдук, С. П. Харламов, И. Цаков, Т. В. Щедрина, *Ядерная физика*, 68, 484-494, 2005; «Topology of "White Stars" in the Relativistic Fragmentation of Light Nuclei» N. P. Andreeva et al., *Physics of Atomic Nuclei*, 68, 455 - 465, 2005; arXiv:nucl-ex/0605015.

10. «Clustering in Light Nuclei in Fragmentation above 1A GeV» 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. Vokál, A. Vokálová, P. I. Zarubin, I. G. Zarubina, *The European Physical Journal*, A27, s1, 295-300, 2006; nucl-ex/0604003.
11. «Периферические взаимодействия релятивистских ядер ^{14}N с ядрами фотоэмульсии» Т. В. Щедрина, В. Баднова, 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, *Ядерная физика*, 70, 7, 1271-1275, 2007; «Peripheral Interactions of Relativistic ^{14}N nuclei with Emulsion Nuclei», T. V. Shchedrina et al., *Physics of Atomic Nuclei*, 70, 7, 1230-1234, 2007; arXiv:nucl-ex/0605022.
12. «Clustering Features of ^9Be , ^{14}N , ^7Be , and ^8B Nuclei in Relativistic Fragmentation» D. A. Artemenkov, T. V. Shchedrina, R. Stanoeva, and P. I. Zarubin, *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 912, 78-87, 2007; arXiv:0704.0384.
13. «Clustering Features of ^{14}N in Relativistic Multifragmentation Process» T. V. Shchedrina, P. I. Zarubin, *Ядерна фізика та енергетика*, 10, 1, 50-54, 2009; arXiv:0902.4546.
14. «Периферическая фрагментация релятивистских ядер ^{11}B в ядерной эмульсии» М. Карабова, Д. А. Артеменков, В. Баднова, С. Вокал, А. Вокалова, Я. Врлакова, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, А. Д. Коваленко, А. И. Малахов, Г. И. Орлова, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, С. П. Харламов, Т. В. Щедрина, *Ядерная физика*, 72, 2, 329-333, 2009; *Peripheral Fragmentation of Relativistic Nuclei ^{11}B in Nuclear Track Emulsion*, M. Karabova et al., *Physics of Atomic Nuclei* 72, 2, 300-304, 2009, arXiv:nucl-ex/0610023.
15. «Каналы фрагментации релятивистских ядер ^7Be в периферических взаимодействиях» Н. Г. Пересадко, Ю. А. Александров, В. Баднова, 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, *Ядерная физика*, 70, 7, 1266-1270, 2007; «Fragmentation Channels of Relativistic ^7Be Nuclei in Peripheral Interactions», N. G. Peresadko et al., *Physics of Atomic Nuclei*, 70, 7, 1226-1229, 2007; arXiv:nucl-ex/0605014.
16. «Особенности фрагментации $^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ в ядерной эмульсии при энергии 1.2A ГэВ» Д. А. Артеменков, В. Баднова, 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, М. Хайдук, Е. Стан, Р. Станоева, С. П. Харламов, М. М. Чернявский, Т. В. Щедрина, *Ядерная физика*, 70, 7, 1261-1265, 2007;

- «Features of the ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ Fragmentation in an Nuclear Track Emulsion for an Energy of 1.2 A GeV». D. A. Artemenkov et al., *Physics of Atomic Nuclei*, 70, 7, 1222-1225, 2007; arXiv:nucl-ex/0605018.
17. «Detailed Study of Relativistic ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ Fragmentation in Peripheral Collisions in a Nuclear Track Emulsion» D. A. Artemenkov, D. O. Krivenkov, T. V. Shchedrina, R. Stanoeva, and P. I. Zarubin, *Few Body Systems*, 273-276, 2008.
 18. «Dissociation of Relativistic Nuclei in Peripheral Interactions in Nuclear Track Emulsion» P. I. Zarubin, D. A. Artemenkov, G. I Orlova, *Nuclear Science and Safety in Europe*, Springer, 189-200, 2006; nucl-ex/0604007.
 19. «Fragmentation of Relativistic Nuclei in Peripheral Interactions in Nuclear Track Emulsion» D. A. Artemenkov, V. Bradnova, M. M. Chernyavsky, L. A. Goncharova, M. Haiduc, N. A. Kachalova, S. P. Kharlamov, A. D. Kovalenko, A. I. Malakhov, A. A. Moiseenko, G. I. Orlova, N. G. Peresadko, N.G. Polukhina, P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, V. R. Sarkisyan, R. Stanoeva, T.V. Shchedrina, S. Vokál, A. Vokálová, P. I. Zarubin, I.G. Zarubina, *Ядерная физика*, 71, 9, 1595-1601, 2008; D. A. Artemenkov et al. *Physics of Atomic Nuclei*, 71, 9, 1565-1571, 2008; arXiv:0907.0569.
 20. «Периферическая фрагментация ядер ${}^8\text{B}$ с энергией 1.2A ГэВ в ядерной эмульсии» Р. Станоева, В. Баднова, 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, *Ядерная физика*, 70, 7, 1261-1265, 2007; «Peripheral Fragmentation of ${}^8\text{B}$ Nuclei in Nuclear Emulsion at an Energy of 1.2 GeV per Nucleon», R. Stanoeva, et al., *Physics of Atomic Nuclei*, 70, 7, 1216-1221, 2007; arXiv:nucl-ex/0605013.
 21. «Электромагнитная диссоциация релятивистских ядер ${}^8\text{B}$ в ядерной эмульсии» Р. Станоева, Д. А. Артеменков, В. Баднова, С. Вокал, Л. А. Гончарова, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, Н. А. Качалова, А. Д. Коваленко, Д. О. Кривенков, А. И. Малахов, Г. И. Орлова, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, Н. Г. Полухина, Н. Г. Пересадько, М. Хайдук, С. П. Харламов, М. М. Чернявский, Т. В. Щедрина, *Ядерная физика*, 72, 4, 731-742, 2009, «Electromagnetic Dissociation of Relativistic ${}^8\text{B}$ Nuclei in Nuclear Track Emulsion», R. Stanoeva et al., *Physics of Atomic Nuclei*, 72, 4, 690-701, 2009; arXiv:0906.4220.
 22. «First results on the interactions of relativistic ${}^9\text{C}$ nuclei in nuclear track emulsion» D. O. Krivenkov, D. A. Artemenkov, V. Bradnova, M. Haiduc, S. P. Kharlamov, N. V. Kondratieva, A. I. Malakhov, A. A. Moiseenko, G. I. Orlova, N. G. Peresadko, N. G. Polukhina, P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, V. R. Sarkisyan, R. Stanoeva, T. V. Shchedrina, S. Vokál, P. I. Zarubin, I. G. Zarubina. *Progress in High Energy Physics Nuclear Safety*, Springer, 149-156, 2006 e-Print: arXiv:0811.1880.