

Доклад

Слайд 2. 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. Рис. I.7. описывает роль кластерных степеней свободы в стабильных и нейтронодефицитных ядрах, а рис. I.12 - в легких нейтроноизбыточных ядрах. Кластерная структура основных и возбужденных состояний легких ядер имеет несомненную и глубокую связь с процессами ядерной астрофизики.

Слайд 3. 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. Облучения слоев эмульсии проведены в пучках изотопов бериллия, бора, углерода и азота, в том числе радиоактивных, которые впервые формировались на нуклотроне ОИЯИ. На рис. В.2. представлена фотография слоя ядерной эмульсии на стеклянной подложке и микроскопа МБИ-9 с установленной фотокамерой НИКОН.

Пространственное разрешение ядерной эмульсии БР-2 (производство ГОСНИИХИМФОТОПРОЕКТ, Россия) имеет рекордную величину - 0.5 мкм, а ее чувствительность простирается от наиболее высокозарядных релятивистских ионов вплоть до релятивистских однозарядных частиц. Эти возможности можно интуитивно оценить по фотографии, на которой совмещены снимок взаимодействия релятивистского ядра серы в эмульсии и микрофотография человеческого волоса (рис. В.3).

Чтобы сделать результаты доступными для восприятия вне эмульсионного сообщества, в нашем исследовании получила продолжение начальная идея – демонстрация уникальных по полноте наблюдаемости ядерных взаимодействий. Создана коллекция видеоматериалов о периферических взаимодействиях релятивистских ядер от легчайших ядер до ядер свинца (сайт сотрудничества <http://becquerel.jinr.ru/>) с использованием современных технических средств. Образы событий в этой коллекции служат для ясного понимания и аргументации обсуждаемых процессов, а также мотивацией для будущего развития метода на основе автоматических сканирующих микроскопов.

Слайд 4. В последние годы особый интерес проявляется к периферическим ядро-ядерным взаимодействиям, как источнику сведений о кластерных особенностях легких ядер, в том числе радиоактивных. Конфигурационное перекрытие основных состояний легких 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. 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. Пороги детектирования фрагментов исчезают, а энергия, теряемая ими в веществе детекторов, минимальна. Инвариантное представление позволяет описать

характеристики ансамблей фрагментов и сохранить целостность с выводами физики низких энергий. В качестве центральной проблемы настоящего исследования было выдвинуто предложение единообразного изучения когерентной диссоциации возможно большего разнообразия ядер, соседствующих в начале таблицы изотопов, в том числе радиоактивных. В качестве иллюстрации представлена микрофотография (Рис. П.3) фрагментации релятивистского ядра $^{16}\text{O} \rightarrow \text{C} + \text{He}$ с импульсом 4.5 А ГэВ/с в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия пара фрагментов в очень узком угловом конусе; среднее и нижнее фото: при смещении от вершины взаимодействия по направлению движения следы фрагментов становятся различимыми

Слайд 5. 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. 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. Соответствует ли структура α -частичных возбуждений кластерных ядер $N\alpha$ -состояниям их периферической диссоциации? Проявляются ли другие типы нуклонной кластеризации - d , t и h ? Возможно ли заселение кластерных комбинаций с перегруппировкой нуклонов за пределы α -кластеризации? Как соотносятся дифракционный и электромагнитный механизмы когерентной диссоциации релятивистских ядер? Для ответа на них в диссертации решены следующие экспериментальные задачи. Исследована диссоциация релятивистских ядер ^{14}N и ^9Be . Исследована диссоциация релятивистских изотопов бора $^{10,11}\text{B}$. Исследована диссоциация радиоактивных ядер ^6He , ^7Be , ^8B и ^9C .

Слайд 6. Структура диссертации основана на введении, 7 главах, заключении, списках цитируемых работ (165 наименований) и публикаций по теме диссертации (22). 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 «Кластеризация нуклонов в легких ядрах» представлены проблемы ядерной кластеризации, лежащие в основе вопросов настоящего исследования. В Главе II «Когерентная диссоциация релятивистских ядер» представлены подходы к анализу взаимодействий релятивистских ядер в ядерной эмульсии, а также принципиальные результаты по когерентной диссоциации легких стабильных ядер. Их комбинированное использование стало основой проекта БЕККЕРЕЛЬ. В Главе III представлена серия первых экспериментов, выполненных по проекту БЕККЕРЕЛЬ. В Главе IV описан эксперимент по исследованию кластерных особенностей фрагментации ядер ^9Be . В Главе V описано исследование фрагментации релятивистских ядер ^{14}N . В Главе VI рассмотрен эксперимент, ориентированный на поиск электромагнитной диссоциации релятивистского ядра ^8B , являющегося наиболее чувствительным к электромагнитному взаимодействию с ядром мишени. В Главе VII рассмотрены эксперименты по диссоциации нейтронодефицитных ядер, формируемых во фрагментации или перезарядке первичных ядер ^{12}C . В Заключении сформулированы главные достижения и основные выводы представленного цикла исследований:

Слайд 7. 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. На рис. В.4. представлен пример центрального соударения ядра Au с энергией $10.7A$ ГэВ с ядром из состава ядерной эмульсии. Весьма трудоемкий анализ событий такого типа 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.

Слайд 8. 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 . На рис. В.4. представлен пример периферического соударения ядра Au с энергией $10.7A$ ГэВ с ядром из состава ядерной эмульсии. 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.

Слайд 9. Развитие релятивистской ядерной физики создало методологическую и методическую основу для углубленного исследования ядерной кластеризации. 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. В качестве иллюстрации разнообразия и сложности физических явлений приведена Фотография (Рис. В.1.) взаимодействия ядра ^{12}C с импульсом $4.5A$ ГэВ/с в пропановой пузырьковой камере (ЛВЭ ОИЯИ, 1974 г.).

Слайд 10. 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} , 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.

Слайд 11. Качественно разнообразить кластерную спектроскопию позволяют пучки радиоактивных ядер. С развитием исследований по релятивистской ядерной физике на ускорительном комплексе синхрофазотрон - нуклотрон была создана целая система магнитооптических каналов транспортировки пучков. Эти каналы также могут служить для формирования вторичных пучков релятивистских радиоактивных ядер, позволяя расширить эксперименты по ядерной физике. На слайде приведена схема ускорительного комплекса и каналов и иллюстративное фото работы лазерного источника ионов.

Слайд 12. Данная работа развивалась в русле основной мировой тенденции физики атомного ядра – использование пучков ускоренных ядер. Исследования ядер, лежащих в области границы нейтронной стабильности, сформировали в последние годы актуальное направление исследований – физика ядер с экзотической структурой. Здесь установлены новые явления в структуре легких ядер и протекании ядерных реакций. В этой области наблюдаются аномально большие радиусы ядер, образование разделенных в пространстве нуклонных ядерных кластеров. Малые энергии связи ядерных кластеров позволяют определить структуру таких ядер как молекулярно-подобную. Большие успехи достигнуты в изучении структуры 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. Выводы о структуре релятивистской фрагментации стабильных ядер и ядер с дефицитом нейтронов позволяют по-новому взглянуть на кластерную структуру нейтроно-избыточных ядер.

Слайд 13. Основной целью исследования нами 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. На слайде приведена диаграмма, иллюстрирующая свойства распада возбужденных несвязанных состояний ядра ${}^{10}\text{C}$; справа показаны четыре пересекающихся кольца супербороминской (или брунниановской) системы.

Слайд 14. На слайде приведена схема магнитной оптики, использованной для облучения эмульсионных стопок и спектры мониторов пучка при облучениях на ядрах ${}^6\text{He}$ и ${}^3\text{H}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ и C . При облучении эмульсии было необходимо обеспечить соблюдение условий, обеспечивающих эффективность последующего просмотра и измерения. Прежде всего, с помощью сцинтилляционных счетчиков и профилометров следует обеспечить равномерность и достаточность облучения слоев вдоль широкого входного габарита стопки (≈ 10 см). Это условие особенно актуально из-за ограниченности и высокой стоимости материала эмульсии. Кроме того, для облучения во вторичном пучке следует использовать первичные ядра с наименьшим зарядом и весом. Такой выбор упрощает последующую идентификацию следов вторичных ядер и их фрагментов, снижает нежелательные примеси. Вторичные ядра-фрагменты образуются с импульсным разбросом, относительная величина которого возрастает с уменьшением их веса. При относительном импульсном захвате магнитного канала $\approx 2 - 3\%$, в него неизбежно попадает примесь ядер, имеющих близкие значения магнитной жесткости или Z_{pr}/A_{pr} (так называемый «пучковый коктейль»).

Слайд 15. Этапы настоящего исследования, суммированные на данном слайде, 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 2А ГэВ/с, формируемых во фрагментации или перезарядке первичных ядер ${}^{12}\text{C}$ (2005-6 гг.).

Слайд 16. В Главе I Представлены современные проблемы ядерной кластеризации, лежащие в основе вопросов настоящего исследования (§I.1). 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. Кластеризация нуклонов в легчайшие ядра-кластеры ${}^4\text{He}$, d , t и ${}^3\text{He}$ при низких температурах $T < 10$ МэВ может вести к неизученным состояниям разреженной ядерной материи. Поскольку макроскопические кластерные состояния могут играть роль промежуточной фазы в астрофизических процессах, эти исследования приобретают значение, выходящее за рамки проблем ядерной структуры. Возможно, что релятивистская фрагментация окажется лучшей «лабораторией» для генерации и наблюдения столь сложных состояний по сравнению с ядерными реакциями при низких энергиях. Приведена диаграмма соотношения долей кластерных состояний и нуклонов в зависимости от барионной плотности симметричной ядерной материи и фазовая диаграмма ядерной материи в астрофизике.

Слайд 17. 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. Существование α -конденсатной формации симметричной ядерной материи возможно в астрофизике при малых плотностях и температурах. Такой квантовый α -конденсат мог бы быть аналогичен конденсации Бозе-Эйнштейна бозонных атомов в магнито-оптических ловушках. Роль простейших α -конденсатных состояний придается основному 0^+ и первому возбужденному 2^+ состоянию ядра ${}^8\text{Be}$. Конденсация может происходить в условиях, когда α -кластеры являются хорошо определенными конститuentами ядерной материи. Своим возникновением такой конденсат обязан квартетной конденсации фермионов. Для α -конденсации критическая плотность от нормальной равна примерно $\rho_0/5$. Обсуждается кластеризация нуклонов в ядрах легче ${}^{12}\text{C}$ (§I.2). 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 ${}^3\text{He}$. На диаграмме 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).

Слайд 18. В главе представлены принятые подходы к анализу взаимодействий релятивистских ядер в эмульсии и принципиальные экспериментальные результаты по периферической диссоциации легких стабильных ядер. Их комбинированное использование стало основой для формулирования предложения эксперимента БЕККЕРЕЛЬ в направлении исследования радиоактивных ядер. Обсуждаемые наблюдения, выполненные с помощью ядерной эмульсии, были проведены уже достаточно давно. Однако из-за трудностей принципиального характера они так и не были повторены с помощью электронных методов. В этом отношении ядерная эмульсия сохраняет исключительное положение, так как другие существующие методики пока не могут приблизиться к подобным наблюдениям. 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. Событие такого типа иллюстрируется микрофотографией «белой» звезды, порожденной ядром ${}^{28}\text{Si}$. 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 $A_{pr} = \sum A_{fr}$. 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 .

Слайд 19. Представлены исследования когерентной диссоциации релятивистских ядер ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$ (§II.2). В начале 70-х годов на синхрофазотроне ОИЯИ был впервые получен пучок ядер ${}^{12}\text{C}$ 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. На слайде даны примеры обсуждаемых событий.

В диссертации писаны 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 ${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$ и ${}^{32}\text{S}$. Основная особенность – доминирование «белых» звезд в статистике периферических взаимодействий, что позволяет выделить их в класс взаимодействий, имеющий перспективы детального исследования.

Слайд 20. В образовании $N\alpha$ -частичных ансамблей могло проявиться ядерное состояние, аналогичное разреженному Бозе газу, обсуждавшемуся в Главе I. Предсказанное свойство таких систем состоит в узком распределении по скоростям в системе центра масс. В случае генерации релятивистскими ядрами они могли бы проявиться как узкие $N\alpha$ -струи. реди событий ${}^{22}\text{Ne} \rightarrow 5\alpha$ обнаружены 3 «белых звезды». Из них в двух «золотых» событиях α -частичные треки содержатся внутри конуса 1° . Для этих двух событий значения Q оцениваются как весьма малые – 400 кэВ и 600 кэВ на нуклон. Детектирование таких «холодных» 5α -состояний является серьезным аргументом в пользу поисков фазового перехода α -кластерных состояний в разреженный Бозе-газ методом релятивистской фрагментации, мотивирующим исследования более легких $N\alpha$ -систем как потенциальных «кирпичиков» этого квантового состояния.

Слайд 21. В релятивистской фрагментации проявляется кластерная структура 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. В ядерной эмульсии, облученной в пучке ядер ${}^6\text{Li}$ с импульсом $4.5A$ ГэВ/с на синхрофазотроне ОИЯИ интригующей особенностью оказался резко уменьшенный средний пробег ядер ${}^6\text{Li}$ по сравнению с ожидавшимся значением. Представлены данные по пробегам легких ядер в эмульсии, включая измерения настоящей работы (${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^{10,11}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$).

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 $50 < P_T < 400$ МэВ/с, а второй, существенно более узкий с $P_T < 50$ МэВ/с.

Слайд 22. В главе III описана серия первых экспериментов, выполненных по проекту БЕККЕРЕЛЬ. На начальном этапе был получен опыт анализа ядерной эмульсии, облученной в пучковом «коктейле» в виде смеси радиоактивных релятивистских ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^3\text{H}$. Этот эксперимент был проведен в завершающий период работы синхрофазотрона (1999 г.) и опирался на предшествующую работу по формированию пучка ${}^3\text{H}$. Он стал прототипом для постановки новых экспериментов на нуклотроне ОИЯИ, на котором начала с 2001 г. функционировать система вывода пучка.

В 2002 г. выполнено облучение эмульсии ядрами ${}^{10}\text{B}$, что оказалось весьма продуктивным шагом к проекту БЕККЕРЕЛЬ. В диссоциации этого ядра была

установлена лидирующая роль кластеризации на основе дейтрона $2\alpha + d$. Опыт ускорения ядер ^{10}B позволил поставить задачи получения вторичных пучков изотопов ^9Be и ^8B в оптимальных условиях для облучения эмульсии. Выводы, сделанные о фрагментации ядра ^{10}B , мотивировали облучения ядрами ^{14}N , а также ядрами ^{11}B для поиска кластеризации на основе тритона $2\alpha + t$. Интерес к ядру ^{11}B ускорил уже представленный выше анализ кластеризации $\alpha + t$ на материале предшествующих облучений ядрами ^7Li . Для развития представлений о кластеризации на основе ^3He в 2004-5 гг. выполнено облучение во вторичном пучке ядер ^7Be . Таким образом, исследование кластеризации расширилось на легкие ядра с нечетным числом протонов или нейтронов. Эта серия облучений оказалась ценной и потому, что после продолжительной паузы возобновилось использование ядерной эмульсии - это было важно для того, чтобы не утратить технологию, опыт анализа и специалистов, привлечь молодых исследователей.

Слайд 23. Получено указание на узкое распределение по $P_{\alpha T}$ для диссоциации ^6He , в котором проявляется структурная особенность этого ядра – нейтронное гало. Вклад когерентного взаимодействия в сечение диссоциации составляет не менее 20%. Представлено попутное исследование взаимодействий ядер ^3H и зарядово-обменного процесса $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$, ставшее возможным из-за доминирующего вклада в состав пучка ядер ^3H (§III.2). На слайде приведены в качестве примеров событие фрагментации $^6\text{He} \rightarrow ^4\text{He}$ и релятивистской перезарядки $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$ без образования мезона и с образованием пары осколков.

Слайд 24. Следующим шагом стало исследование периферических взаимодействий релятивистских ядер ^7Be , пучок которых был получен в реакции перезарядки $^7\text{Li} \rightarrow ^7\text{Be}$ (§III.3). В табл. 2 приведены числа событий, зарегистрированных в различных каналах фрагментации ядер ^7Be . 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 ^7Be определяется кластерной конфигурацией $^4\text{He} + ^3\text{He}$. Представлены примеры событий периферической диссоциации ядра ^7Be в эмульсии; на верхней фотографии – расщепление на два фрагмента He с образованием двух осколков ядра мишени; ниже – «белые звезды» с расщеплением на 2He , $\text{He} + 2\text{H}$, $\text{Li} + \text{H}$ и 4H .

Слайд 25. Изучены особенности периферической фрагментации ядра ^{10}B (§III.4), пороги отделения нуклонов и легчайших ядер для которого различаются слабо: $^6\text{Li} + \alpha - 4.5 \text{ МэВ}$, $^8\text{Be} + d - 6.0 \text{ МэВ}$, $^9\text{Be} + p - 6.6 \text{ МэВ}$. В 65% периферических взаимодействий развал ядра ^{10}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 ^9Be 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 ^6Li и указывает на обильный выход дейтронов. На слайде приведены события диссоциации по каналам $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ и $^{10}\text{B} \rightarrow \text{Li} + \text{He}$.

Слайд 26. Эксперимент по фрагментации ядра ^{11}B также был нацелен на то, чтобы выявить относительную роль каналов с наиболее низкими порогами отделения фрагментов, а именно, $^7\text{Li} + \alpha$ (8.663 МэВ), $2\alpha + t$ (11.224 МэВ) и $^{10}\text{Be} + p$ (11.228 МэВ) (§III.5). Установлено лидерство канала $2\text{He} + \text{H}$ ($\approx 50\%$), как и в случае ядра ^{10}B . Канал $\text{Be} + \text{H} \approx 12\%$. Большая доля тритонов в «белых» звездах говорит в пользу его существования в качестве кластера в ^{11}B . Наблюдались события неупругой перезарядки ядра ^{11}B в возбужденные состояния ядра $^{11}\text{C}^* \rightarrow ^7\text{Be} + ^4\text{He}$ (т. е., $\sum Z_{fr} = 6$ при $Z_{pr} = 5$). На слайде микрофотография фрагментации с перезарядкой $^{11}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Be}$. Среди «белых звезд» перезарядки ядра ^{11}B диссоциацией по другим каналам не наблюдалось. Даже на ограниченной статистике можно отметить очевидное отличие развала ядра ^{11}C от развала

ядер ^{10}B и ^{11}B : для ядер ^{10}B и ^{11}B отмечается лидирующее значение трехтельного канала распада, в то время как для ядра $^{11}\text{C}^*$ доминируют двухтельные развалы, а трехтельные на нашей статистике не наблюдались. В основе этого различия может лежать несколько более высокое значение кулоновского барьера для ядра ^{11}C . Эти обстоятельства указывают на чувствительность релятивистского механизма диссоциации к структурным особенностям ядер.

Слайд 27. В Главе IV описано исследование 2α -частичной фрагментации ядра ^9Be . Для обоснованного применения метода релятивистской фрагментации к исследованию $N\alpha$ -систем необходимо исследовать динамику образования пар α -частиц на высоком уровне статистической обеспеченности и в наиболее простых условиях (без комбинаторного фона). Эта информация позволит ответить на следующие вопросы. Прежде всего, имеет ли фрагментация релятивистских ядер отношение к их низкоэнергетическим кластерным возбуждениям? И является ли адекватным для исследования кластерных степеней свободы ядер использование эмульсионного метода, возможности которого ограничиваются наилучшими измерениями углов вылета фрагментов? Экспериментальные ответы на эти вопросы было предложено получить при анализе релятивистской фрагментации ядра ^9Be на пару α -частиц. Продолжение исследования структуры ядра ^9Be представляет ценность как одного из ключевых объектов для ядерной физики нескольких тел и ядерной астрофизики.

Ядро ^9Be демонстрирует свойства слабосвязанной системы $2\alpha + n$, что делает его источником генерации α -частичных пар без комбинаторных усложнений. В этой модели вес основного состояния равен $\omega_{0+} = 0.535$, а первого возбужденного $\omega_{2+} = 0.465$ – весовые коэффициенты двухтельной модели, использованной для вычисления магнитного момента ядра ^9Be . В результате ускоренного сканирования найдено 362 события фрагментации ядра ^9Be при с образованием двух α -частиц в конусе с углом раствора до 0.1 рад. На слайде приведены примеры событий фрагментации ядра ^9Be с образованием двух α -частиц в переднем конусе фрагментации – «белая» звезда, развал на протоне мишени и тяжелом ядре эмульсии с образованием одиночного фрагмента.

Слайд 28. Первоочередной интерес представляли углы разлета Θ α -частиц. Значение Θ определялось как угол одного из треков по отношению ко второму. Такой подход позволяет существенно повысить точность определения угла Θ и уменьшить влияние искажений эмульсионных слоев. Представлено распределение Θ для найденных событий. Очевидная особенность этого распределения состоит в формировании двух пиков. Таким образом, парное рождение α -частиц оказывается сильно коррелированным по углу разлета Θ . Около 81 % событий по величине угла разлета Θ образуют две примерно равные группы – это «узкие» α -пары в интервале $0 < \Theta_{n(\text{arrow})} < 10.5$ мрад и «широкие» – $15.0 < \Theta_{w(\text{ide})} < 45.0$ мрад. Образование «узких» пар Θ_n сопоставляется распадам ядер ^8Be 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 .

Слайд 29. Для когерентной диссоциации $^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ на тяжелых ядрах наблюдается уменьшение среднего значения поперечного импульса P_{Tsum} α -пары по сравнению с взаимодействиями на протонах мишени. Для основной части событий когерентной диссоциации распределение величин суммарного поперечного импульса P_{Tsum} пар α -частиц может быть объяснено в рамках статистической модели недостающим поперечным импульсом нейтрона – фрагмента ядра ^9Be . Отсутствует значимое различие распределений по P_{Tsum} для событий когерентной диссоциации через состояния 0^+ и 2^+ ядра ^8Be . Это обстоятельство указывает на схожий механизм возникновения α -пар и их одновременное присутствие с близкими весами в основном состоянии ядра ^9Be . Представленные данные можно рассматривать как доказательство того, что в структуре ядра ^9Be с высокой вероятностью имеется кор в виде двух состояний ядра ^8Be и внешнего нейтрона. Полученные результаты согласуются с теоретическими работами по описанию

структуры ядра ${}^9\text{Be}$, предполагающими присутствие в его основном состоянии состояний 0^+ и 2^+ ядра ${}^8\text{Be}$ приблизительно с одинаковыми весами.

Слайд 30. В главе V Изучается множественная фрагментация ядер ${}^{14}\text{N}$. Представлен анализ периферических взаимодействий ядер ${}^{14}\text{N}$ (§V.1). Основной вклад (77%) вносят каналы $C + H$, $3\text{He} + H$ и $2\text{He} + 3H$. На слайде приведены примеры этих событий. 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%).

Слайд 31. 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 ${}^{10}\text{B}$. Впервые для ядра ${}^{14}\text{N}$ были идентифицированы процессы релятивистской диссоциации ${}^{11}\text{C} + {}^3\text{H}$, ${}^6\text{He} + {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + p$, ${}^4\text{He} + 2{}^3\text{He} + d$, для которых характерны глубокая перегруппировка α -частичной структуры этого ядра и преодоление высоких энергетических порогов. Кроме того, обнаружены процессы неупругой перезарядки ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + 2H$, ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He}$, ${}^{14}\text{N} \rightarrow 2\text{He} + 2H$. 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 порогом 3α -частичных связей.

Слайд 32. В Главе VI представлен эксперимент, ориентированный на поиск электромагнитной диссоциации релятивистского ядра ${}^8\text{B}$, являющегося наиболее чувствительным к электромагнитному взаимодействию с ядром мишени (рис. 10). Полученные данные позволяют оценить перспективы исследования состояний ядра ${}^8\text{B}$ как систем кластеров ${}^{1,2}\text{H}$, ${}^{3,4}\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$ методом релятивистской диссоциации. Представлены особенности электромагнитных взаимодействий релятивистских ядер и их экспериментальное исследование (§VI.1). Обсуждаются вклады кулоновской, ядерной диссоциации и реакций срыва (стриппинга) в сечение реакции ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$ и предсказания зависимости сечения от энергии ядра ${}^8\text{B}$ 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 ${}^8\text{B}$ 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 ${}^8\text{B}$ на нуклотроне ОИЯИ был использован процесс фрагментации первичного пучка релятивистских ядер ${}^{10}\text{B}$ с энергией $1.2A$ ГэВ.

Слайд 33. 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_{mf} , и для «белых звезд» N_{ws} (примеры на рис. 12 и 13) проявляют качественное отличие (табл. 4).

Слайд 34. Выполнен анализ распределений фрагментов на основе угловых измерений (§VI.4). Переход в с. ц. м. ${}^7\text{Be} + p$ ведет к среднему значению $\langle P_T \rangle = 62 \pm 11$ МэВ/с ($RMS = 54$ МэВ/с). Его рекордно малая величина указывает на слабую связь протона и кора. Распределение векторной суммы поперечных импульсов фрагментов $P_T({}^8\text{B}^*)$ системы ${}^7\text{Be} + p$ отражает механизмы ее генерации (рис. 14). Распределение, соответствующее «белым» звездам, имеет среднее значение $\langle P_T({}^8\text{B}^*) \rangle = 95 \pm 15$ 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 область, характерную для образования «белых звезд» $^7\text{Be} + p$. Отобрана группа событий $^7\text{Be} + p$, отвечающих критериям электромагнитного образования (§VI.5). Из-за весьма сильной зависимости сечения от заряда ядра мишени вида Z_2 , можно предположить пропорциональный вклад ядер Ag и Br из состава эмульсии и пренебречь вкладом легких ядер. Полученные величины сечений составляют $\sigma_{Ag} = 81 \pm 21 \text{ мбн}$ и $\sigma_{Br} = 44 \pm 12 \text{ мбн}$. Для электромагнитной диссоциации на ядре Pb экстраполяция σ_{Ag} ведет к значению $\sigma_{Pb} = 230 \pm 60 \text{ мбн}$, которое близко к теоретическому значению $\approx 210 \text{ мбн}$, что указывает на правильность отбора событий

Слайд 35. В этом облучении впервые наблюдались события диссоциации ядер ^{10}C (§VI.6). Ядра ^{10}C могли рождаться путем перезарядки $^{10}\text{B} \rightarrow ^{10}\text{C}$ 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 $^{10}\text{C} \rightarrow ^8\text{Be} + 2p$. На слайде приведен пример такой диссоциации.

Слайд 36. В главе VII обсуждается развитие исследований нейтронодефицитных ядер, том числе результаты по диссоциации ядер ^9C , наблюдение событий $^9\text{C} \rightarrow 3^3\text{He}$ и облучение в смешанном пучке ядер $^{12}\text{N} - ^{10}\text{C} - ^7\text{Be}$.

Слайд 37. 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. Благодаря отсутствию стабильных изотопов ^9B и ^8Be события с фрагментами с $Z_{fr} = 5$ и 4 интерпретируются как $^9\text{C} \rightarrow ^8\text{B} + p$ и $^7\text{Be} + 2p$. Средние значения суммы поперечных импульсов составляют $\langle P_T(^8\text{B} + p) \rangle = 246 \pm 44 \text{ МэВ/с}$ и $\langle P_T(^7\text{Be} + 2p) \rangle = 219 \pm 38 \text{ МэВ/с}$ находятся в области, которая характерна для ядерной дифракционной диссоциации. Данные по топологии указывают на правильность формирования пучка. Обсуждаются наблюдение и идентификация событий $^9\text{C} \rightarrow 3^3\text{He}$. Распределение по полному переданному импульсу имеет среднее значение $\langle P_T(3^3\text{He}) \rangle = 335 \pm 79 \text{ МэВ/с}$. Приведена микрофотография одного из событий.

Слайд 38. Представлены первые результаты облучения в смешанном пучке релятивистских ядер $^{12}\text{N} - ^{10}\text{C} - ^7\text{Be}$ (§VII.3) [6]. Вторичный пучок с магнитной жесткостью оптимальной для селекции ядер ^{12}N был проведен по каналу транспортировки пучка, включавшему четыре 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 $\sum Z_{fr} > 5$. Благодаря дефициту нейтронов, в ряде случаев можно указать изотопный состав. Наиболее вероятный канал представлен событиями $2\text{He} + 2\text{H}$, что и следовало ожидать для изотопа ^{10}C . Канал $\text{He} + 4\text{H}$ 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 .

Слайд 39. В Заключение сформулированы главные достижения и основные выводы представленного цикла исследований:

1. Предложена программа изучения нуклонной кластеризации на основе α -частиц, дейтронов, тритонов и ядер ^3He 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 лидерование канала $2\text{He} + \text{H}$. Для когерентной диссоциации ядра ^{10}B по этому каналу установлена кластеризация на основе дейтронов, а для ядер ^{11}B - тритонов. Установлено, что диссоциация ядра ^7Be определяется кластеризацией на основе ядра ^3He .

3. Впервые установлено, что диссоциация ядра ^9Be по 2α -частичному каналу, в основном, протекает через основное и первое возбужденное состояния ядра ^8Be с близкими вкладами, что соответствует теоретическому описанию основного состояния ядра ^9Be .

4. Установлено лидерование диссоциации $3\text{He} + \text{H}$ для релятивистского ядра ^{14}N и ее соответствие области 3α -кластерных возбуждений ядра ^{12}C при вкладе основного состояния ядра ^8Be не менее 20%.

5. Установлены экспериментальные критерии электромагнитной диссоциации радиоактивного ядра ^8B 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 ^9C , в которой идентифицированы канал 3^3He , связанный с глубокой перестройкой основного состояния ядра ^9C .

Слайд 40. На защиту выносятся следующие результаты. Обнаружение доминирующего вклада распадов ядра ^8Be в диссоциации ядра ^9Be . Выводы о структурных особенностях диссоциации ядра ^{14}N и лидеровании множественного канала $3\text{He} + \text{H}$. Обнаружение лидерования зарядовой топологии $2\text{He} + \text{H}$ и установление для когерентных процессов типов кластеризации на основе дейтронов и тритонов в диссоциации изотопов $^{10,11}\text{B}$. Обнаружение лидерования кластеризации с образованием ядра 3He в диссоциации ядра ^7Be . Выводы о диссоциации ядра ^8B , обнаружение лидерования канала $^7\text{Be} + p$ в когерентных процессах и определение условий электромагнитной диссоциации. Структура когерентной диссоциации релятивистского ядра ^9C и идентификация состояний 3^3He .