ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

МАМАТКУЛОВ
КАХРАМОН ЗИЯДУЛЛАЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОЙ ДИССОЦИАЦИИ ЯДРА ^{10}C ПРИ ЭНЕРГИИ 1.2 ГЭВ НА НУКЛОН

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна, 2015 г.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:	кандидат физико-математических наук, с.н.с. **АРТЕМЕНКОВ Денис Александрович** доктор физико-математических наук, профессор, Джизакского государственного педагогического института, заведующий кафедрой «Общей физики» **БЕКМИРЗАЕВ Рахматулла Нурмуродович**
Официальные оппоненты:	**ЗЕЛЕНСКАЯ Наталья Семеновна** доктор физико-математических наук, профессор, НИИЯФ МГУ им. Д.В. Скобельцына, г.Москва, главный научный сотрудник **НЕДОРЕЗОВ Владимир Георгиевич** доктор физико-математических наук, профессор, Институт ядерных исследований РАН, г.Москва, заведующий ЛФЯР
Ведущее научно-исследовательское учреждение:	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий», г. Протвино.

Защита состоится « ____ » _____ 201_ г. в « ___ » часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 в Лаборатории физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина в Объединенном институте ядерных исследований по адресу: 141980, г. Дубна, Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований или на сайте http://wwwinfo.jinr.ru/ announce_disser.htm.

Автореферат разослан « ___ » _____ 201_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 720.001.02, к.ф.-м.н.	Арефьев Валентин Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Ядерная эмульсия (ЯЭ) обеспечивает непревзойденное пространственное разрешение следов заряженных частиц (0.5 μм), начиная с сильноионизирующих короткопробежных ионов и до однозарядных частиц с минимальной ионизацией. Применение ЯЭ на вновь создаваемых пучках ускорителей релятивистских ядер позволяет вести детальный анализ, недоступный электронным методам детектирования. В частности, измерение углов испускания фрагментов, рожденных в периферических взаимодействиях релятивистских ядер в ЯЭ, дает уникальные возможности изучения нуклонной кластеризации легких ядер. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей структуры радиоактивного ядра ^{10}C на основе ЯЭ, облученной на нуклотроне ОИЯИ.

Ключевым аспектом ядерной структуры является присутствие в ней степеней свободы, в которых виртуальные ассоциации нескольких нуклонов ведут себя как составляющие кластеры. Их проявлениями в конечных состояниях ядерных реакций являются легчайшие ядра, которые не имеют возбужденных состояний – это ядра ^{4}He (α-частица) и ^{3}He (*h*, гелион), тритон (*t*) и дейтрон (*d*). Особенно отчетливо кластеризация проявляется в легких ядрах, где разнообразие возможных конфигураций нуклонов невелико (Рис. 1). Например, пороги отделения кластеров для ядер ^{7}Be, ^{6,7}Li, ^{11,10}B, ^{11,12}C и ^{16}O меньше, чем для нуклонов. Ярко выраженную кластерную структуру проявляют распады несвязанных ядер ^{8}Be и ^{9}B. В свою очередь ядра ^{7}Be, ^{7}Li, ^{8}Be и ^{9}B выступают основами в изотопах бора и углерода. Легкие ядра представляются как разнообразные суперпозиции, состоящие из этих ядер-основ, легчайших ядер-кластеров и нуклонов, сосуществующих в динамическом равновесии. Информация об их вероятностях для всего разнообразия легких ядер, полученная в рамках единого эксперимента, представляет фундаментальную ценность для целостного понимания структуры легких ядер.

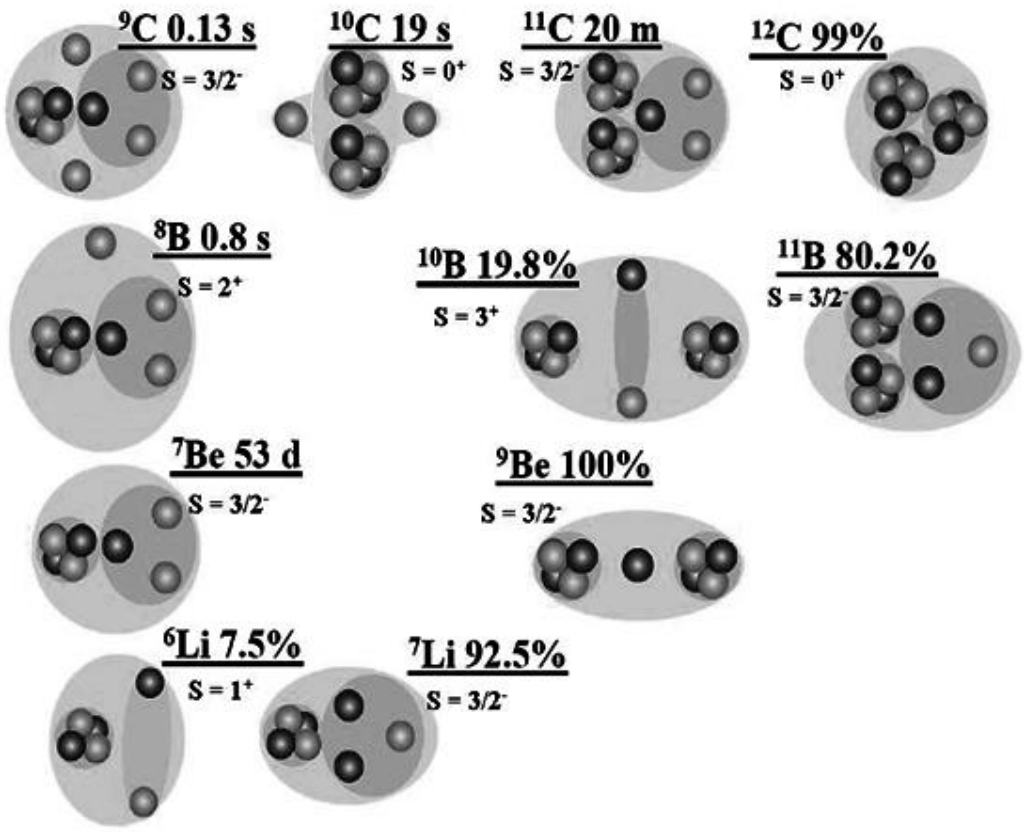

Рис. 1. Диаграмма кластерных степеней свободы в стабильных и нейтронодефицитных ядрах; указаны распространенности изотопов или времена жизни и значения спинов и четностей; светлые кружки соответствуют протонам, темные - нейтронам; темным фоном выделены кластеры.

Традиционно исследование кластеризации легких ядер рассматривается как прерогатива физики низких энергий. Эксперименты по кластеризации в пучках быстродвижущихся ядер дают как преимущества детектирования, так и позволяют включить радиоактивные изотопы в число изучаемых ядер. Кроме того, они позволяют отбирать периферические взаимодействия, что принципиально важно, поскольку в именно в таких взаимодействиях выявляется конфигурационное перекрытие структуры исследуемых ядер с конечными состояниями. Ориентация на периферические взаимодействия одновременно упрощает интерпретацию физического механизма реакции. Вместе с тем, она требует роста энергии ядер для преодоления порогов всех

возможных каналов диссоциации, а также детектирования быстрых фрагментов.

Переход в релятивистский масштаб энергии столкновения ядер делает энергию связи кластеров и нуклонов несущественной. Возрастающая коллимация фрагментов в периферической диссоциации релятивистских ядер позволяет одновременное детектирование возможного разнообразия кластерных ансамблей. Наряду с этими преимуществами, возникают сложности в применении магнитных спектрометров, заставляющие ограничиться регистрацией в них фрагментов с зарядами близкими к изучаемому ядру и, как развитие, одного или пары изотопов He или H. При этом пропускаются каналы с более высокой множественностью He и H. Однако их роль является ключевой, хотя бы в силу того обстоятельства, что изотопы ^{8}Be и ^{9}B не являются связанными. Этот пробел восполняет метод ЯЭ. Пороги детектирования релятивистских фрагментов в ЯЭ отсутствуют, а теряемая ими энергия в детекторах минимальна. Хотя ядерная эмульсия и не обеспечивает импульсного анализа, однако, это ограничение может компенсироваться привлечением сведений о фрагментации релятивистских ядер, полученных на основе магнитных спектрометров и пузырьковых камер.

Особенно ценными для кластерной физики являются события когерентной диссоциации релятивистских ядер в узкие струи из фрагментов, в которых тяжелые ядра мишени видимым образом не разрушаются. В таких событиях отсутствуют следы медленных фрагментов и мезонов (пример на Рис. 2). Следовательно, при таком «касательном» соударении ядро мишени взаимодействует когерентно. Кроме того, эта особенность указывает на минимальность возбуждения ядра, испытывающего диссоциацию. Доля таких событий, получивших краткое наименование «белые» звезды, составляет несколько процентов от неупругих взаимодействий, что достаточно для обзорного исследования методом ЯЭ.

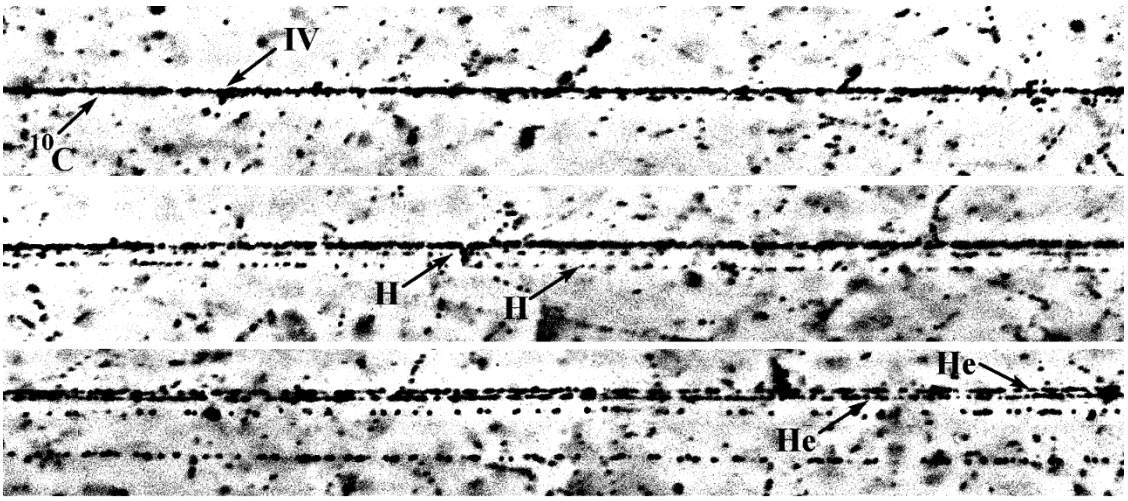

Рис. 2. Микрофотография «белых звезд» $^{10}C \rightarrow 2He + 2H$. Вершина взаимодействия – IV и вторичные фрагменты - H и He.

<u>Актуальность диссертационной работы.</u> В рамках проекта БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ проводятся облучения ЯЭ релятивистскими ядрами Be, B, C и N, в том числе радиоактивными изотопами (Рис. 1). Физическая программа проекта БЕККЕРЕЛЬ, ориентирована на систематическое изучение кластерной структуры легких ядер, и настоящее исследование ядра ^{10}C является одной из ее принципиальных частей. Анализ облученной ядерной эмульсии позволяет полно исследовать состав и кинематические характеристики всего разнообразия ансамблей релятивистских фрагментов ядра ^{10}C, включая соответствующие глубоко связанным конфигурациям кластеров. В случае ядра ^{10}C реконструкция распадов нестабильных релятивистских ядер ^{8}Be и ^{9}B является принципиальной, а ее решение в электронных экспериментах пока не просматривается.

Цель диссертационной работы состоит в экспериментальном изучении кластерной структуры ядра ^{10}C, проявляющейся в вероятностях образования возможных конфигураций фрагментов, включая нестабильные ядра ^{8}Be и ^{9}B.

Научная новизна и значимость диссертационной работы. Впервые получена информация о вероятностях каналов в когерентной диссоциации радиоактивного ядра ^{10}C с исчерпывающей полнотой наблюдения релятивистских фрагментов He и H, включая канал через распад нестабильного ядра ^{9}B. Обнаружены редкие события диссоциации, указывающие на существование в ядре ^{10}C примеси глубоко связанных кластерных состояний ^{7}Be + ^{3}He и 2^{3}He + ^{4}He. Уникальная детальность наблюдения, осуществленного при рекордном угловом разрешении, обеспечена применением ЯЭ на вторичном пучке релятивистских ядер нуклотрона ОИЯИ.

Научно-практическая ценность работы. В целом, изучение кластерной структуры ядер в процессах релятивистской диссоциации имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Вероятности кластерных состояний связаны с параметрами основных и возбужденных состояний. Знание вероятностей позволяет определить возможные начальные конфигурации ядерных кластеров, что важно для анализа всего разнообразия ядерных реакций. Кластеризация лежит в основе процессов, сопровождающих явления физики ядерных изобар, гиперядер, кварк-партонных степеней свободы. Представления о кластеризации ядер, полученные методами физики высоких энергий, важны для современных применений в ядерной астрофизике, физике космических лучей, ядерной медицине и, возможно, даже для ядерной геологии. В частности, вероятности конечных кластерных состояний могут указать на варианты синтеза ядер, не рассматривавшихся ранее. Во всех этих аспектах находят применения сведения о структуре ядра ^{10}C. Особая роль его

изучения состоит в удачной возможности надежно выявить роль ядра ^{9}B в эволюции ядерной структуры.

В практическом плане выполненный физический анализ событий когерентной диссоциации ядер углерода в ЯЭ дал подтверждение правильности формирования вторичного пучка, обогащенного именно изотопом ^{10}C, что дает основания для его применения в электронных экспериментах на нуклотроне ОИЯИ. Полученный массив угловых измерений событий диссоциации ядра ^{10}C, представляет ценность для планирования электронных экспериментов с большим разнообразием и сложностью детекторов на пучках релятивистских радиоактивных ядер нуклотрона ОИЯИ, ускорителя У-70 Института физики высоких энергий (г. Протвино) и проекте FAIR (ГСИ, г. Дармштадт, ФРГ). В целом, результаты исследования способствуют развитию исследований на пучках релятивистских радиоактивных ядер.

<u>Основные положения, выносимые автором на защиту</u>, состоят в следующем.

1. Впервые выполнен анализ ядерной эмульсии, облученной в смешанном пучке релятивистских ядер ^{12}N, ^{10}C и ^{7}Be. Доминирование в пучке среди ядер углерода ядер именно изотопа ^{10}C подтверждается комплексом измерений ионизации ядер углерода вторичного пучка, особенностями зарядовой топологии их когерентной диссоциации, а также измерениями импульсов релятивистских фрагментов H и He.
2. Для когерентной диссоциации ядра ^{10}C установлено доминирование канала на два ядра He и два ядра H, отражающее структуру основного состояния этого ядра как связного состояния пар α-частиц и протонов. Вместе с тем, полные измерения углов вылета релятивистских фраг-

ментов в событиях этого канала впервые позволили выявить значительную роль нестабильного ядра ^{9}B в структуре ^{10}C и определить его распады как источник ядер ^{8}Be.

3. Впервые обнаружены события диссоциации, указывающие на существование в ядре ^{10}C небольшой примеси глубоко связанных кластерных состояний ^{7}Be + ^{3}He и 2^{3}He + ^{4}He.

Апробация работы.

Результаты исследования, вошедшие в данную диссертационную работу, представлялись автором на следующих научных мероприятиях: 21-st European Conference on Few-Body Problems in Physics – EFB21, August 29 - September 3, (2010); 29th International workshop on nuclear theory. Rila mountains, Bulgaria, June 20-26, 2010); International A.M. Baldin Seminar of High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics & Quantum Chromodynamics», Dubna, Russia, October 4-9, (2010); VI International Symposium on Exotic Nuclei “EXON - 2012”, JINR, FEFU, Vladivostok, Russia, (2012); VI Eurasian conference nuclear science and its application and VIII international conference modern problems of nuclear physics and nuclear technologies. Institute of nuclear physics, Uzbekistan academy of sciences, Samarkand, Uzbekistan, (2012); The XIII International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei, EMIN-2012, Institute of Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, (2012); Девятая международная конференция “Ядерная и радиационная физика” (ICNRP ′2013), Алматы, Казахстан, Сентябрь 24 – 27, (2013); International A.M. Baldin Seminar of High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics & Quantum Chromodynamics», Dubna, Russia, September 15-20, (2014).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, приведенных в списке литературы (в том числе, в реферируемых научных журналах).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, содержащего 48 наименований. Работа изложена на 80 страницах машинописного текста, включающих 42 рисунка, 14 таблиц и 1 микрофотографию взаимодействий легких релятивистских ядер с ядрами фотоэмульсии.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении формулируются цели исследования кластеризации (В.1), представлена методология и даны ссылки предшествующие исследования в релятивистском подходе по этой проблеме (В.2). В этом контексте отмечены методы анализа периферических взаимодействий в ЯЭ, в том числе, методы поиска взаимодействий релятивистских ядер, измерения их зарядов и углов испускания фрагментов, определения поперечных импульсов и энергии кластерных ансамблей, сравнения со статистической моделью (В.3). Обсуждается структура возбуждений ядра ^{10}C. Оно является единственным примером устойчивой ядерной структуры, в которой удаление α-кластера или нуклона ведет к несвязанному состоянию, что делает его критичным предметом для исследования ядерной кластеризации в целом (В.4). Отмечено значение представлений о ядре ^{10}C для разработки альтернативных сценариев нуклеосинтеза в смесях изотопов водорода и гелия (В.4). Сформулирован практический план настоящего исследования, выполнению которого следует диссертация (В.5).

В **Главе 1** описан полученный материал о зарядовой топологии периферической фрагментации ядра ^{10}C, составляющего экспериментальную основу для исследования. При ускорении ядер ^{12}C до энергии 1.2·*A* ГэВ на нуклотроне ОИЯИ сформирован пучок, настроенный на сепарацию изотопа ^{12}N. В этом вторичном пучке, в состав которого основной вклад дали изотопы C и Be, облучена стопка из 15 слоев ЯЭ (§ 1.1). Идентификация изотопа ^{12}N по «белым» звездам, указывают на правильность настройки вторичного пучка (§ 1.2 Рис. 3). В результате просмотра на длине 1088.1 метров всех следов первичных ядер найдено 608 «белых» звезд (§ 1.3). В начале были идентифицированы заряды первичных ядер и более тяжелых фрагментов в тех событиях, которые содержат только фрагменты с визуально определимыми зарядами 1 и 2, а затем во всех найденных «белых» звездах. В результате их доля, относящаяся к изотопу N, составила 11%, C – 40%, Be – 49%. Зарядовую топологию 227 «белых» звезд, созданных ядрами углерода, отличает доминирование событий, содержащих только фрагменты с зарядами 1 и 2 (табл. 1). Их вероятность составила 96%, причем 82% в канале C → 2He + 2H, что указывает на изотоп ^{10}C, для которого ожидаем основной вклад распадов нестабильных ядер и резонансов. В «белых» звездах C → 2He + 2H идентификация случайной выборки фрагментов H и He демонстрирует их соответствие ^{4}He и *p* и подтверждает попутное формирование пучка изотопа ^{10}C (§ 1.4). Этот результат ожидаем, поскольку изотоп ^{10}C наиболее близок к ^{12}N по магнитной жесткости. Таким образом, зарядовая топология диссоциации изотопов N и C представляется непротиворечивой, а выполненное облучение эмульсии имеющим перспективы детального анализа, обеспеченного достаточной статистикой «белых» звезд ^{10}C (резюме в § 1.5).

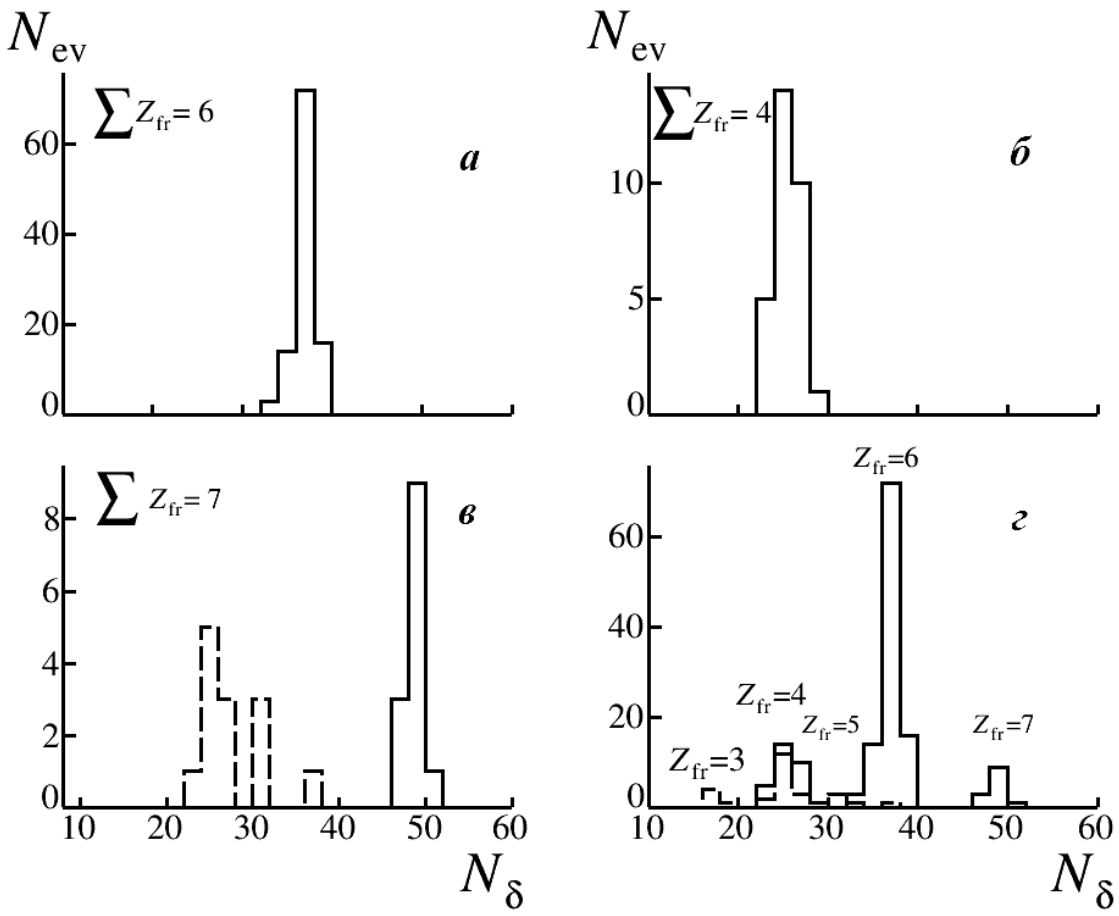

Рис. 3. Распределения числа N_{ev} следов пучковых частиц и вторичных фрагментов (пунктирная линия) по среднему числу δ-электронов на 1 мм длины N_δ в «белых» звездах 2He + 2H (а), 2He и He + 2H (б) и в событиях с фрагментами $Z_{fr} > 2$ (в); распределение N_{tr} по N_δ для всех измеренных событий (г).

Таблица 1. Распределение по каналам диссоциации числа «белых» звезд N_{ws} и событий с фрагментами мишени или рожденными мезонами N_{tf}.

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

Глава 2 посвящена измерениям углов релятивистских фрагментов He и H. Выполнены измерения полярных и азимутальных углов фрагментов (§§ 2.1 и 2.2), а также независимые измерения углов разлета фрагментов в 184 «белых» звездах ^{10}C → 2α + 2p и проведено их сравнение с данными для «белых» звезд ^{9}Be → 2α, играющими в данном случае роль репера (Рис. 4). Как и в случае ^{9}Be, доминируют α-пары с узкими и широкими углами разлета, соответствующими распадам ядра ^{8}Be из 0^{+} и 2^{+} состояний с равными вероятностями. Зарегистрированы 10 случаев рассеяния узких α-пар как целого на «большие углы», которые интерпретируются как образование и рассеяние ядер ^{8}Be. Корреляции α-пар по азимутальному углу разлета имеют тот же характер, что и для ^{9}Be и определяются в основном распадами ядер ^{8}Be из 0^{+} и 2^{+} состояний.

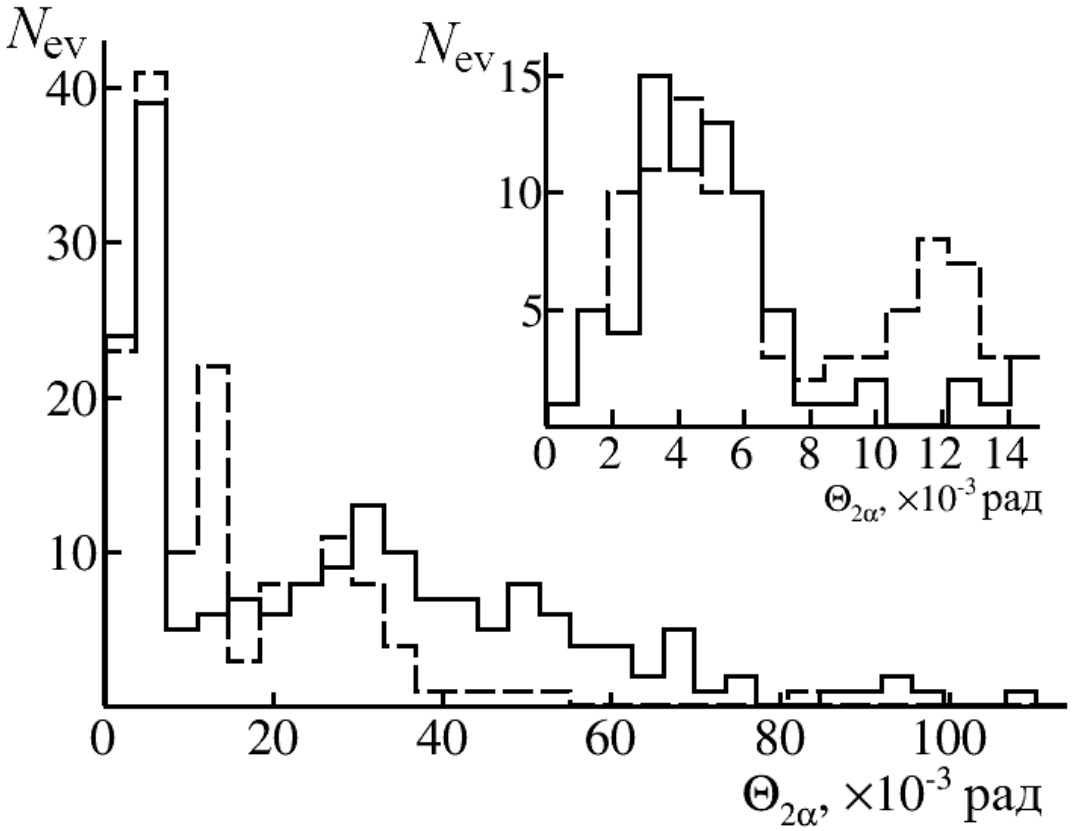

Рис. 4. Распределения «белых» звезд $^{10}C \rightarrow 2\alpha + 2p$ (сплошная гистограмма) и $^{9}Be \rightarrow 2\alpha$ (пунктирная гистограмма) по величине угла $\Theta_{2\alpha}$. На вставке – распределения событий в области Θ_n.

Распределение по полному переданному импульсу в «белых» звездах $^{10}C \rightarrow 2\alpha + 2p$ имеет параметры, характерные для дифракционной диссоциации (§ 2.3 и Рис. 5). Описание распределений по поперечному импульсу α-частиц в рамках статистической модели, как и в случае ^{9}Be, требуется раздельное описание распадов состояний 0^+ и 2^+ ядра ^{8}Be (§ 2.3). Таким образом, в части α-пар накопленный для ^{10}C массив угловых измерений демонстрирует соответствие данным для ^{9}Be и может быть использован для представления анализа в более сложных переменных.

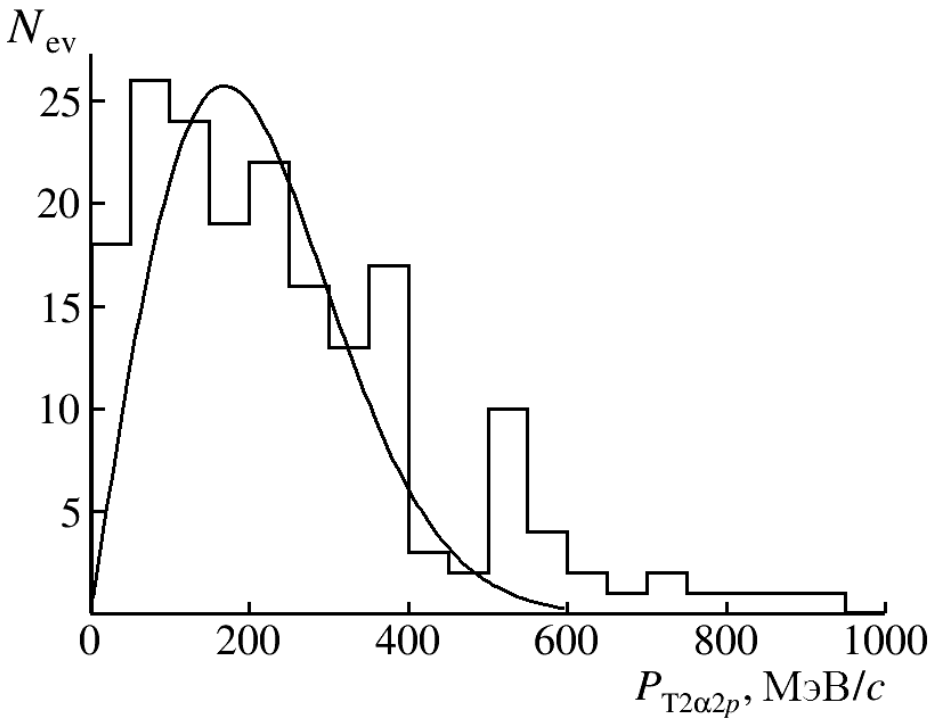

Рис. 5. Распределение по суммарному поперечному импульсу $P_{T2\alpha 2p}$ «белых» звезд $^{10}C \rightarrow 2\alpha + 2p$.

Глава 3 посвящена реконструкции распадов нестабильных ядер и редким событиям. Выполнен анализ распределений по инвариантной массе троек и пар фрагментов из 184 «белых» звезд $^{10}C \rightarrow 2\alpha + 2p$ (§ 3.1 и Рис. 6). Для 57 троек $2\alpha + p$ установлено их образование через распады ядер ^{9}B. Реконструкция идентификация релятивистского ядра ^{9}B выполнена впервые. Случаи образования ядер ^{8}Be полностью соответствуют каскадному процессу $^{10}C \rightarrow {}^{9}B \rightarrow {}^{8}Be_{g.s.}$. Сделан вывод о том, что в структуре ядра ^{10}C с вероятностью около (30 ± 4) % проявляется ядро ^{9}B, а ядро ^{8}Be в основном состоянии 0^{+} проявляет себя только как компонента ^{9}B. Распределение по поперечному импульсу ядер ^{9}B описывается распределением Релея с параметром (92 ± 15) МэВ/c. Эта величина соответствует статистической модели. 10 случаев образования ядер ^{9}B фрагментации ^{10}C интерпретируются как рассеяние ядра ^{9}B (§ 3.2.) на тяжелом ядре мишени.

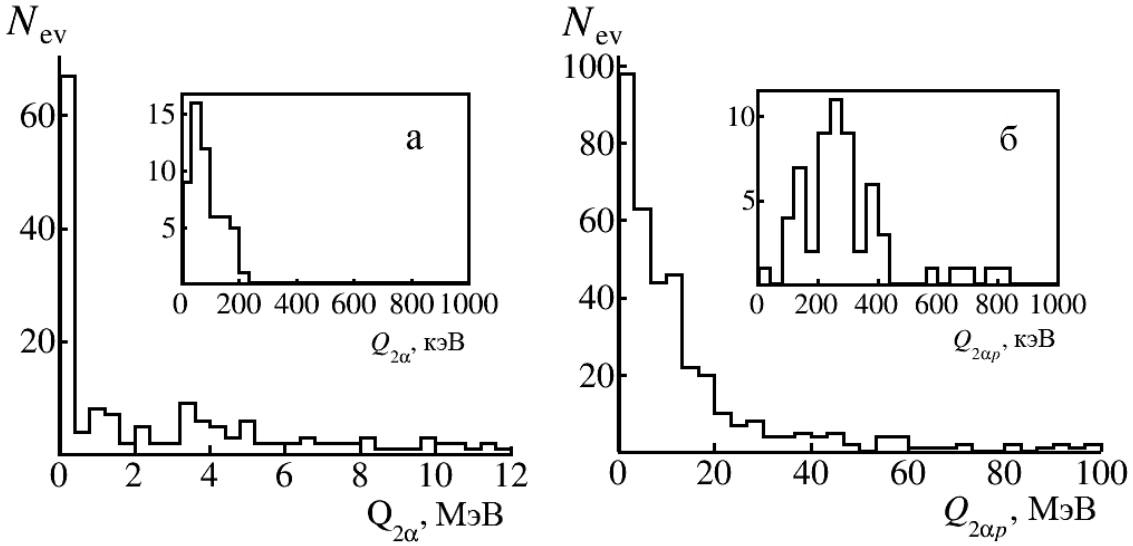

Рис. 6. Распределение «белых» звезд $^{10}C \rightarrow 2\alpha + 2p$ по энергии возбуждения $Q_{2\alpha}$ пар α-частиц; на вставке – увеличенное распределение $Q_{2\alpha}$ (a); распределение событий $Q_{2\alpha p}$ троек $2\alpha + p$; на вставке – увеличенное распределение $Q_{2\alpha p}$ (b).

«Оставшаяся» статистика «белых» звезд $^{10}C \rightarrow 2\alpha + 2p$ может иметь двоякую интерпретацию (§ 3.3). В основном она должна соответствовать распадам основы ^{10}C в виде ядра ^{8}Be в состоянии 2^{+}, а, кроме того, определяться распадами резонансов ^{5}Li и ^{6}Be. Интерпретация пар αp и троек $\alpha 2p$, как связанных с резонансами ^{5}Li и ^{6}Be, носит ориентировочный характер и может служить в качестве верхних оценок. Для обоснованного разделения этих долей необходимо прямое определение параметров этих резонансов в когерентной диссоциации ядра ^{7}Be.

Обнаружены редкие события диссоциации, указывающие на существование в ядре ^{10}C глубоко связанных кластерных состояний $^{7}Be + {}^{3}He$ и $2{}^{3}He + {}^{4}He$ с весом 8% (§ 3.4). С вероятностью 4% наблюдались события полной когерентной диссоциации ядер ^{10}C на шесть ядер водорода.

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые состоят в следующем:

В представленном исследовании изучены особенности структуры радиоактивного ядра ^{10}C в процессах его когерентной диссоциации при энергии 1.2 ГэВ на нуклон. Оригинальность сделанных наблюдений, их уникальная детальность и рекордное угловое разрешение обеспечены применением ядерной эмульсии на вторичном пучке релятивистских ядер нуклотрона ОИЯИ. Основные выводы состоят в следующем:

1. Обеспечен поиск ядерных взаимодействий на длине порядка 1088 метров в слоях ядерной эмульсии, облученной в смешанном пучке, релятивистских ядер ^{12}N, ^{10}C и ^{7}Be. Сканирование позволило отобрать 227 событий когерентной диссоциации ядер углерода ^{10}C, не сопровождаемых образованием фрагментов мишени и рождением мезонов.

2. Установлено, что число событий в канале диссоциации с двумя ядрами гелия и двумя ядрами водорода составляют 82% от общего числа найденных событий когерентной диссоциации ядра ^{10}C. Лидирование этого канала соответствует представлениям о структуре изотопа ^{10}C и подтверждает правильность формирования пучка. Среди изотопов He и H, в канале $^{10}C \rightarrow 2He + 2H$ присутствуют в основном изотопы ^{4}He и ^{1}H, что подтверждается методом идентификации по многократному кулоновскому рассеянию.

3. Для массива из 184 событий когерентной диссоциации ядер $^{10}C \rightarrow 2\alpha + 2p$ осуществлены измерения полярных и азимутальных углов вылета фрагментов, а также относительных пространственных углов разлета фрагментов.

4.Установлено, что в распределении по инвариантной массе приблизительно 60 событий в канале два альфа и два протона соответствуют каскадному распаду ядра ^{9}B через ядро ^{8}Be. Таким образом, в структуре ядра ^{10}C с вероятностью не менее чем (30 ± 4) % проявляется нестабильное ядро ^{9}B, а

нестабильное ядро ^{8}Be проявляет себя только как компонента ^{9}B. Этот вывод подтверждается распределением по полному поперечному импульсу ядер ^{9}B, которое в основной части описывается распределением Релея с параметром (92 ± 15) МэВ/*c*, соответствующим статистической модели. Обнаружены 10 событий рассеяния ядра ^{9}B за пределы конуса фрагментации.

5. Обнаружены редкие события диссоциации, указывающие на существование в ядре ^{10}C глубоко связанных кластерных состояний ^{7}Be + ^{3}He и 2^{3}He + ^{4}He с весом порядка 8%. Для 4% от общей статистики наблюдались события полной диссоциации ядер ^{10}C на шесть однозарядных фрагментов и нейтроны.

Полученные результаты указывают на перспективность дальнейших исследований многочастичных систем легчайших ядер методом релятивистской фрагментации в экспериментах с более высокой статистической обеспеченностью.

Список работ по теме диссертации

1. К. З. Маматкулов и др. «Диссоциация ядер ^{10}C с энергией 1.2 *A* ГэВ в ядерной фотографической эмульсии». *Ядерная физика*, т. **76**, № 10, с. 1286–1291 (2013). [*Phys. At. Nucl*. Vol. **76**, No. 10, pp. 1224–1229 (2013)]; arXiv: 1309.4241 [nucl-ex].

2. D. A. Artemenkov, … K. Z. Mamatkulov et al. «Dissociation of relativistic ^{10}C nuclei in nuclear track emulsion». *Few-Body Systems*, Vol. **50**, Issue 1–4, pp 259–261 (2011); arXiv: 1105.2374 [nucl-ex].

3. D. A. Artemenkov, … K. Z. Mamatkulov et al. «Clustering in relativistic dissociation of ^{9}Be, ^{9}C, ^{10}C and ^{12}N nuclei». *International Journal of Modern Physics E*. Vol. **20**, No. 4, pp 993–998 (2011); arXiv: 1106.1748 [nucl-ex].

4. Р. Р. Каттабеков, К. З. Маматкулов и др. «Облучение ядерной эмульсии в смешанном пучке релятивистских ядер ^{12}N, ^{10}C и ^{7}Be». *Ядерная физика*, т. **73**, № 12, с. 2166–2171 (2010). [*Phys. At. Nucl*. Vol. **73**, 2110 (2010)]; arXiv: 1104.5320 [nucl-ex].

5. К. З. Маматкулов и др. «Кластеризация в диссоциация релятивистских ядер ^{10}C». *Доклады Академии наук Республики Узбекистан*. № 1, с. 43–46 (2013).

6. С. С. Аликулов, … К. З. Маматкулов и др. «Диссоциация релятивистских ядер ^{10}C в ядерной фотоэмульсии в $^{10}C \rightarrow {}^{9}C + n$». *Доклады Академии наук Республики Узбекистан*. № 3, с. 33–36 (2013).

7. К. З. Маматкулов и др. «Диссоциация релятивистских ядер ^{10}C в ядерной фотоэмульсии». *Доклады Академии наук Республики Узбекистан*. № 5, с. 43–47 (2011).

8. R.Sh. Stanoeva, ... K.Z. Mamatkulov et al. «Clustering in relativistic dissociation of ^{9}C, ^{10}C and ^{12}N nuclei». *Nuclear theory*. Heron Press, Sofia. Vol. **29**, pp. 250–256 (2010).