

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П. Н. Лебедева

Российской академии наук

На правах рукописи

Зайцев Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССОЦИАЦИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР
 ^{10}B , ^{11}C И ^{12}C МЕТОДОМ ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ**

Специальность

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2019

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина (ЛФВЭ) Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
ЗАРУБИН Павел Игоревич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ДЕМЬЯНОВА Алла Сергеевна
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Национальный исследовательский
центр «Курчатовский институт»
начальник лаборатории ядерных структур.

кандидат физико-математических наук
ЧЕРНЫШЕВ Борис Андреевич
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
доцент кафедры № 40.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Государственный научный центр
Российской Федерации «Институт физики высоких
энергий» имени А.А. Логунова, Национального
исследовательского центра «Курчатовский
институт», г. Протвино.

Защита состоится «10» июня 2019 г. в 12 час. 00мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 по защите докторских и кандидатских диссертаций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, конференц-зал, по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект 53, ФИАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического Института им. П.Н. Лебедева РАН и на сайте института: www.lebedev.ru, с авторефератом – на сайте ФИАН www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.023.04, д.ф.-м.н.

БАРАНОВ
Сергей Павлович

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию особенностей диссоциации релятивистских ядер ^{10}B (1.6 А ГэВ/с), ^{11}C (2.0 А ГэВ/с) и ^{12}C (1 и 4.5 А ГэВ/с) методом ядерных фотоэмульсий (ЯЭ). Материалом исследования служат слои ЯЭ, облученные в пучках релятивистских стабильных и радиоактивных ядер на ускорительных установках ОИЯИ (нуклотрон) и ИФВЭ (бустер ускорителя У-70). **Цель** работы заключается в прослеживании кластерной эволюции легких ядер ^{10}B и ^{11}C , установление роли нестабильных ядер ^8Be и ^9B в изучаемых ядрах и идентификации событий с образованием троек α -частиц в состоянии Хойла (СХ) в диссоциации релятивистских ядер ^{12}C . **Задача** исследования состоит в определении особенностей структуры ядер ^{10}B и ^{11}C по вероятностям образования возможных конфигураций заряженных фрагментов, что включает в себя определение кинематических характеристик вылета вторичных фрагментов, в том числе изотопная идентификация ядер He и H. В объединении с данными по соседним ядрам, эта информация позволит получить целостную картину кластеризации в семействе ядер в начале таблицы изотопов.

Актуальность темы исследования. Данное исследование является логическим продолжением исследовательских работ, выполняемых в рамках эксперимента Беккерель на нуклотроне ОИЯИ, основная задача которого заключается в изучении кластерной эволюции легких стабильных и радиоактивных ядер. В качестве структурного элемента (кластера) в легких ядрах выступают виртуальные малонуклонные ассоциации, не имеющие возбужденных состояний, такие как: ^4He (α , α -частица), ^3He (h , гелион), ^3H (t , тритон) и ^2H (d , дейтрон). Возможные комбинации нуклонов и кластеров образуют группу легких ядер в начале таблицы изотопов, в числе которых нестабильные ядра. В свою очередь легкие ядра, такие как ^5He , ^5Li , ^8Be , могут

играть роль ядра-основы в структуре более тяжелых ядер. В диссоциации ядра ^{10}B природа каналов с образованием двух фрагментов He и одного H не была изучена ранее. Источником таких мод диссоциации могут быть распады ядер $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ и $^9\text{B} \rightarrow 2\alpha + p$. Такой эффект был установлен ранее при исследовании диссоциации релятивистского ядра ^{10}C , причем ^9B проявлялся как единственный источник ядра ^8Be в основном состоянии. Предположение о возможном присутствии нестабильных ядер ^8Be и ^9B в ядерной структуре было распространено на ближайший изотоп – ^{11}C , в котором также наблюдаются каналы с большой множественностью фрагментов He и H. Полученный опыт реконструкции распадов нестабильных ядер ^8Be и ^9B в ультра узкие струи фрагментов при фрагментации ядер ^{10}B и ^{11}C был расширен для поиска распадов релятивистских ядер ^{12}C из второго возбужденного состояния, состояния Хойла.

Традиционно исследования кластерных степеней свобод относятся к физике низких энергий, однако при продвижении в релятивистский масштаб энергий возникает ряд преимуществ детектирования, в том числе возможность изучения целого класса радиоактивных ядер. В диссоциации релятивистского ядра кластерные особенности проявляются в наиболее периферических взаимодействиях (так называемые «белые» звезды), протекающих без перекрытия ядерных плотностей сталкивающихся ядер (Рисунок 1). В экспериментальном плане диссоциация релятивистского ядра представляет собой узкую струю вторичных фрагментов, сосредоточенных в переднем конусе фрагментации, угол раствора которого составляет несколько миллирадиан. Применение магнитных спектрометров с электронным методом детектирования заставляет ограничиться регистрацией 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 фрагментов He и H. Однако роль таких каналов является ключевой в силу того обстоятельства, что

фрагменты He и H являются продуктами распадов нестабильных изотопов ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$. Идентификация релятивистских ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ возможна по вычислению инвариантной массы системы фрагментов, по углу разлета в них. Такой подход требует наилучшего пространственного и углового разрешения, что обеспечивается в релятивистском случае только методом ядерной фотоэмульсии. Рекордное угловое разрешение (вплоть до 0.1 мрад) ядерной фотоэмульсии также позволяет реконструировать релятивистские распады короткоживущих ядерных резонансов в предельно узкие струи фрагментов, в том числе распады ядер ${}^{12}\text{C}$ из состояния Хойла.

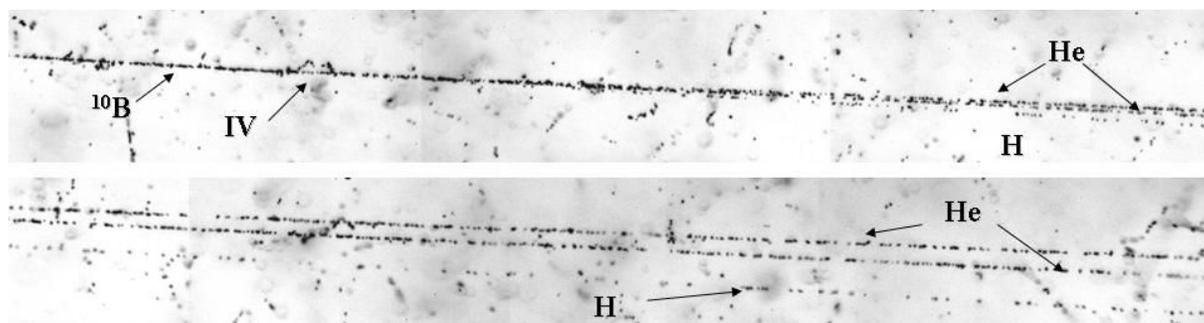


Рис. 1. Последовательные фотографии «белой» звезды события фрагментации ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$. IV – положение вершины события. Идентифицированные методом многократного рассеяния изотопы H и He соответствуют протону (p) и двум α -частицам. Основные характеристики события: $\Theta_{2\alpha} = 5.3$ мрад, $Q_{2\alpha} = 87$ кэВ, $\Theta_{2\alpha p} = 10$ мрад, $Q_{2\alpha p} = 352$ кэВ. Увеличение изображения $45\times$.

Научная новизна и практическая значимость работы

Новизна диссертационной работы заключается в получении новых экспериментальных данных по диссоциации релятивистских ядер ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11,12}\text{C}$, что включает в себя получение распределения по вероятностям образования каналов диссоциации (зарядовая топология), измерение углов эмиссии треков фрагментов с высокой точностью. Анализ угловых распределений треков ядер He и H в каналах ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ и ${}^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ позволил впервые оценить

вклад распадов нестабильных ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ в диссоциации изучаемых ядер. В диссоциации релятивистских ядер ${}^{12}\text{C}$ впервые идентифицированы события с образованием ансамблей из троек альфа-частиц, отвечающих состоянию Хойла (второе возбужденное и первое несвязанное состояние ядра ${}^{12}\text{C}$). Уникальность полученных результатов основана на рекордном пространственном, угловом и энергетическом разрешении ядерной фотоэмульсии.

Проведенный в работе физический анализ стал возможным во многом благодаря возможности формирования, транспортировки и сепарации пучков стабильных и радиоактивных ядер на ускорительном комплексе нуклотрон ОИЯИ. Результаты, полученные в исследовании диссоциации релятивистских ядер ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11,12}\text{C}$, будут востребованы при планировании экспериментов с высокой статистикой событий и разнообразием детекторов на ядерных пучках нуклотрона ОИЯИ (и как развитие, на коллайдере NICA), ускорителя У-70 ИФВЭ, а также в зарубежных исследовательских центрах. Кластерная картина диссоциации релятивистских ядер важна в исследованиях физики космических лучей, физики промежуточных энергий. В частности, детальная информация о конечных кластерных состояниях ядер может быть полезна для интерпретации данных в экспериментах по кумулятивному рождению частиц, направленных на исследование кварк-партоновых степеней свободы в легких ядрах. В астрофизическом аспекте, вероятности по конечным кластерным состояниям могут указать на возможно новые сценарии синтеза ядер, которые не были рассмотрены ранее. Фундаментальные представления о релятивистской фрагментации ядра ${}^{11}\text{C}$ необходимы для применения интенсивных пучков этих ядер в ядерной медицине. Можно рассчитывать, что полученный опыт реконструкции распадов ядер ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{B}$ и ${}^{12}\text{C}$ в состоянии Хойла, станут ориентирами для поиска методом ядерных фотоэмульсий конденсатных

состояний с большим числом кластеров и нуклонов в диссоциации более тяжелых ядер в ультра узкие струи легчайших ядер.

В прикладном плане анализ облучения опытных образцов слоев ядерной эмульсии возобновленного производства (единственного производителя ядерной эмульсии в России ОАО «Компания Славич») позволил продемонстрировать её абсолютную идентичность старым образцам эмульсии типа БР-2. Сохранение всех физических и химических свойств вновь воссозданной ядерной эмульсии позволит сохранить и развить традицию применения методики ядерной эмульсии в высокопрецизионных экспериментах (SHiP, NICA), а также в прикладных задачах (например, эксперимент Беккерель).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые изучены особенности диссоциации релятивистских ядер ^{10}B и ^{11}C и установлено лидирование в этом процессе каналов $2\text{He} + \text{H}$ и $2\text{He} + 2\text{H}$, соответственно.
2. Впервые идентифицирован и установлен вклад нестабильных ядер ^8Be и ^9B в диссоциацию релятивистских ядер ^{10}B и ^{11}C .
3. Впервые идентифицировано образование троек α -частиц в состоянии Хойла и установлены особенности их образования в диссоциации релятивистских ядер ^{12}C .

Достоверность полученных результатов основана на применении слоев ядерной фотоэмульсии, обладающих рекордным пространственным и угловым разрешением, недоступным в настоящем для электронных методов детектирования. Точность восстановления углов испускания фрагментов обеспечена высокопрецизионным измерительным микроскопом KSM-1, разрешающая способность которого позволяет различать узко расходящиеся

треки с углом разлета не менее 0.1 мрад. Полученные в диссертации результаты сравниваются со статистической моделью релятивистской фрагментации ядер, а также с данными более ранних работ, выполненных в сотрудничестве эксперимента Беккерель на нуклотроне ОИЯИ.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации. Автором был лично организован процесс сканирования облученных слоев ядерной эмульсии, как в ручном режиме (с помощью поисковых микроскопов), так и с использованием полуавтоматических комплексов. Сканирование обеспечило большую для эмульсионного метода статистику из 4500 событий неупругого взаимодействия ядер ^{10}B и $^{11,12}\text{C}$ в ядерной эмульсии. Автором проведена адаптация измерительных и вычислительных процедур, необходимых для исследования релятивистской диссоциации изучаемых ядер.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы неоднократно представлялись на международных и российских конференциях, среди которых наиболее значимые: European Nuclear Physics Conference EuNPC 2018, (г. Болонья, Италия, 2018 г.); New Trends in High-Energy Physics (г. Будва, Черногория, 2016 г.); New Trends in High-Energy Physics (г. Будва, Черногория, 2016 г.); International Session-Conference of the Section of Nuclear Physics of PSD RAS (г. Нальчик, Россия, 2017 г.); LXVIII INTERNATIONAL CONFERENCE "NUCLEUS 2018" (г. Воронеж, Россия, 2018 г.); VIII International Symposium on EXOtic Nuclei 2016 (г. Казань, Россия, 2016 г.); XXIV International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems 2018 (г. Дубна, Россия, 2018 г.); Международная Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, (г. Дубна, Россия, 2017 г.); X и XII Черенковские чтения (г. Москва, Россия, 2016 и 2018 гг.).

По материалам диссертационной работы были опубликованы 11 статей в российских и зарубежных журналах, индексируемых по базе Scopus (56799871300) и Web of Science (E-1282-2016), в том числе из рекомендованного списка ВАК (см. приложение Список опубликованных работ).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы, содержащего 58 наименований. Работа изложена на 100 страницах машинописного текста, включающих 49 рисунков, 15 таблиц и 10 микрофотографий примеров событий ядер в ядерной фотоэмульсии.

Основное содержание работы

Во **Введении** формулируется цель и задача излагаемой работы (В.1). Обосновывается актуальность исследования (В.2) с привлечением данных по ранее изученным ядрам. Приводятся известные структурные свойства изучаемых ядер и их взаимосвязь с ближайшими ядрами Ве, В и С. Описывается методика эксперимента (В.3) с подробным описанием основных способов сканирования ядерной эмульсии, измерения зарядов и углов испускания заряженных фрагментов, процедура изотопной идентификации ядер. Излагается суть статистической модели фрагментации ядер, в рамках которой проводится анализ угловых и импульсных распределений (В.4).

Первая глава посвящена анализу облучения ядерной эмульсии в пучке релятивистских ядер ^{10}B (1.6 А ГэВ/с). Облучение стопки ЯЭ было выполнено на одном из первых сеансов работы ускорительного комплекса нуклотрон ОИЯИ на выведенном пучке в 2002 году (§ I.1.). Пучок формировался в канале по магнитной жесткости $Z/A = 1/2$. Вклад ядер ^{10}B составил около 67%, α -частиц – 27% и дейтронов – 6%. Отсутствие примесей других ядер позволил провести процесс сканирование ЯЭ в более комфортных условиях. Сканирование

проявленных слоев ЯЭ (§ 1.2.) проводилось методом просмотра «по следу» с помощью микроскопа МБИ-9. Суть метода заключается в последовательном прослеживании входящих треков в слой ЯЭ до вершины взаимодействия, что позволяет регистрировать все типы событий без дискриминации. На суммарной длине просмотра 242 метра было найдено 1664 неупругих взаимодействий ^{10}B с ядрами в ЯЭ. Таким образом, величина среднего пробега для ядер ^{10}B в ядерной эмульсии составила $\lambda = (14.5 \pm 0.5)$ см. Полученное значение согласуется с зависимостью величины среднего свободного пробега от атомного номера ядра-снаряда для легких ядер, имеющих однородную нуклонную плотность, и имеет хорошее соответствие с расчётной величиной ($\lambda = 14.2$ см).

При сканировании 10 слоев ядерной эмульсии было получено распределение каналов по вероятностям образования вторичных фрагментов при диссоциации ядер ^{10}B (Таблица 1). Для сравнения статистика представлена событиями типа «белая» звезда и событиями с образованием фрагментов мишени. Отличительной особенностью событий типа «белая» звезда является отсутствие в вершине взаимодействия следов фрагментов ядра-мишени и рожденных заряженных мезонов (см. Рисунок 1). В подавляющем большинстве случаев события типа «белая» звезда интерпретированы как взаимодействие налетающего ядра с тяжелой компонентой (группа ядер AgBr) из состава ЯЭ. Распределение каналов диссоциации представлено в трех группах событий, отличающихся суммарным зарядом фрагментов в конусе фрагментации, ограниченным углом 9° . В каналах, с суммарным зарядом фрагментов равным первичному заряду ядра ^{10}B , установлено доминирование событий, содержащих только фрагменты ядер He и H (90%). Отмечено преобладание канала $2\text{He} + \text{H}$, вероятность наблюдения которого составляет 76%. Наличие каналов с большой множественностью фрагментов He и H может указывать на диссоциацию одного или нескольких кластеров в ядре ^{10}B , в том числе распад нестабильных ядер ^8Be и ^9B . Присутствие таких событий, как и $\text{Li} + 2\text{H}$ (4%), может быть

обусловлено диссоциацией ядра-основы ${}^7\text{Be}$. Каналы ${}^{10}\text{B} \rightarrow \text{Li} + \text{фрагменты}$ наблюдаются с вероятностью на уровне 8%. Такие события можно рассматривать как корреляцию α -частичного и дейтронного кластеров. В канале ${}^{10}\text{B} \rightarrow \text{Be} + \text{H}$ (1%) фрагмент Be отождествлен изотопу ${}^9\text{Be}$, поскольку отсутствует стабильное ядро ${}^8\text{Be}$. Установлено, что наряду с каналами с суммарным зарядом фрагментов в конусе фрагментации равным 5 наблюдаются каналы с суммарным зарядом 4 и 6. Такие события могут указывать на наличие каналов перезарядки $\text{B} \rightarrow \text{C}$ (12%) и $\text{B} \rightarrow \text{Be}$ (6%). Было отмечено, что каналы перезарядки $\text{B} \rightarrow \text{C}$ находятся в соотношении, установленном ранее при исследовании диссоциации релятивистского ядра ${}^{10}\text{C}$.

Таблица 1. Распределение каналов диссоциации релятивистских ядер ${}^{10}\text{B}$ при энергии 1 А ГэВ в ядерной фотоэмульсии.

ΣZ_{fr}	Канал	С фрагментами мишени	«Белые» звезды
6	$2\text{He} + 2\text{H}$	35 (65%)	18 (90%)
	$\text{He} + 4\text{H}$	19 (35%)	2 (10%)
5	$\text{Li} + \text{He}$	21 (5%)	5 (4%)
	$\text{Li} + 2\text{H}$	32 (8%)	5 (4%)
	$\text{He} + 3\text{H}$	120 (32%)	18 (13%)
	$2\text{He} + \text{H}$	182 (48%)	103 (76%)
	5H	24 (6%)	2 (1%)
	$\text{Be} + \text{H}$	1 (< 1%)	2 (1%)
4	2He	89 (100%)	10 (100%)

Механизм образования канала ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ был исследован на основании углового анализа вылета вторичных заряженных фрагментов He и H (§ I.3). Достоверность полученных результатов основывается на точности

измерений угла погружения и планарного угла вылета вторичного фрагмента относительно родительского трека (Рисунок 2). Для выполнения процедуры измерения углов (§ I.4) эмиссии фрагментов были отобраны 318 событий $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$, имеющие для измерений благоприятные геометрические условия. Одночастичные распределения поперечных импульсов для фрагментов He и H описываются параметрами $\sigma_{\text{Pt}(\text{H})} = (61 \pm 3) \text{ МэВ}/c$ для α -частиц $\sigma_{\text{Pt}(\text{He})} = (140 \pm 4) \text{ МэВ}/c$. Для двухзарядного фрагмента параметр распределения имеет хорошее согласование с параметром, извлеченным в рамках статистической модели для α -частиц $\sigma_{\text{Pt}(\alpha)} = 136 \text{ МэВ}/c$. В случае однозарядного фрагмента есть расхождение, которое объясняется наличием вклада в канал $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ дейтронной компоненты.

В распределении по величине относительного пространственного угла Θ в парах α -частиц наблюдаются узкие струи треки фрагментов в области $\Theta_{2\alpha} < 10.5$ мрад (вставка, Рисунок 3а). Статистика таких событий в канале $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ составила $(24 \pm 3) \%$ от числа событий типа «белая» звезда и $(20 \pm 4) \%$ в событиях с образованием фрагментов ядра-мишени. В распределении по величине пространственного угла между направлением вылета узкой парой α -частиц ($\Theta_{2\alpha} < 10.5$ мрад) и однозарядного фрагмента (вставка, Рисунок 4а) выделяется группа событий с предельно малыми углами разлета ($\Theta_{2\alpha\text{H}} < 25$ мрад), с вероятностью $(12 \pm 2) \%$ от статистики «белых» звезд и $(8 \pm 2) \%$ в событиях с образованием фрагментов ядра-мишени. Отмеченная особенность в распределении по относительному пространственному углу $\Theta_{2\alpha\text{H}}$ и $\Theta_{2\alpha}$ была установлена ранее при изучении диссоциации релятивистского ядра ^{10}C .

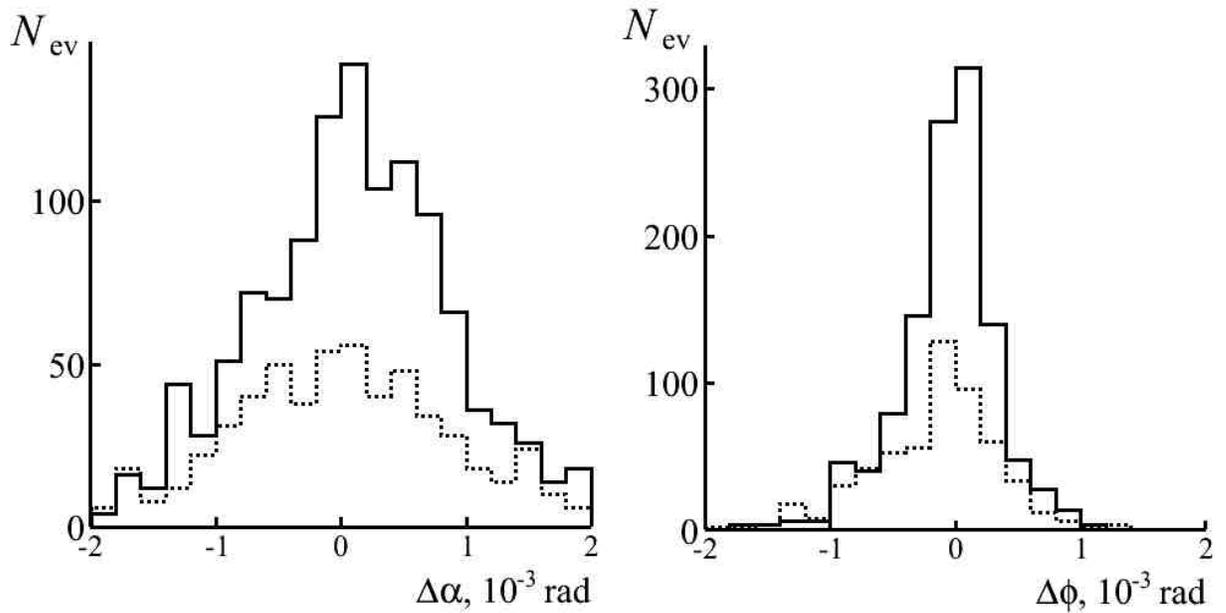


Рис. 2 Ошибки в определении угла погружения (α) и планарного угла (ϕ) для треков фрагментов He (сплошная) и H (точечная) в событиях $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$. $\langle \Delta\alpha \rangle = 0.08 \pm 0.02$ (0.78) мрад и $\langle \Delta\phi \rangle = 0.06 \pm 0.01$ (0.39) мрад.

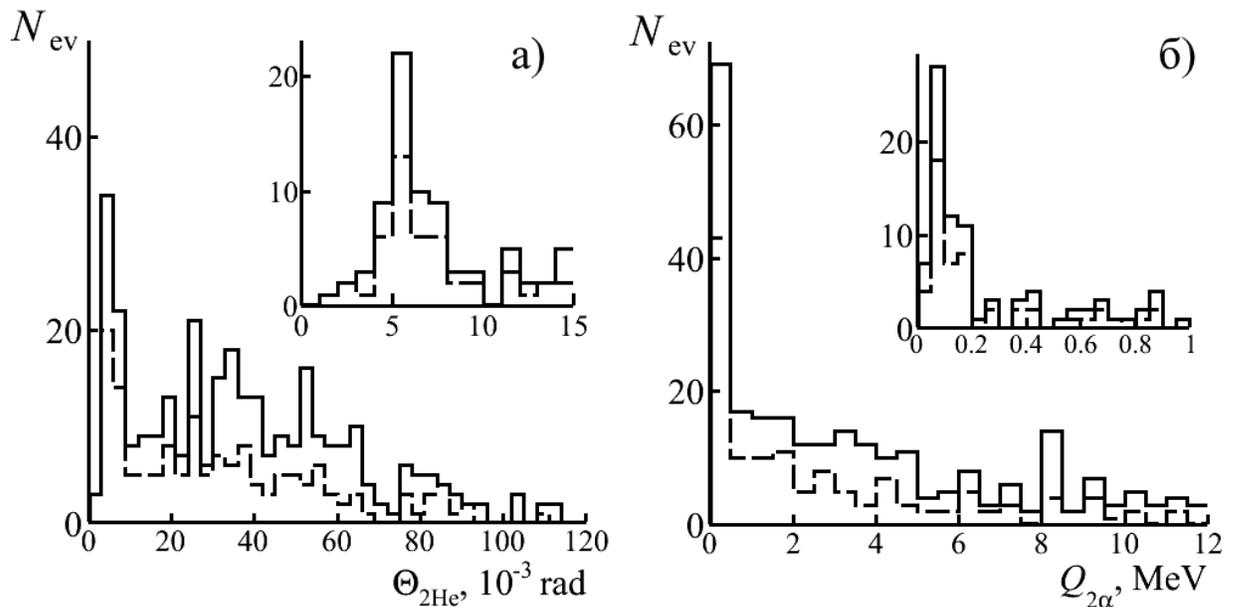


Рис 3. Распределение событий по пространственному углу Θ между двумя фрагментами He (а) и по энергии возбуждения $Q_{2\alpha}$ пар α -частиц (б) в событиях $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$. Сплошная линия – вся статистика, пунктир – «белые» звезды.

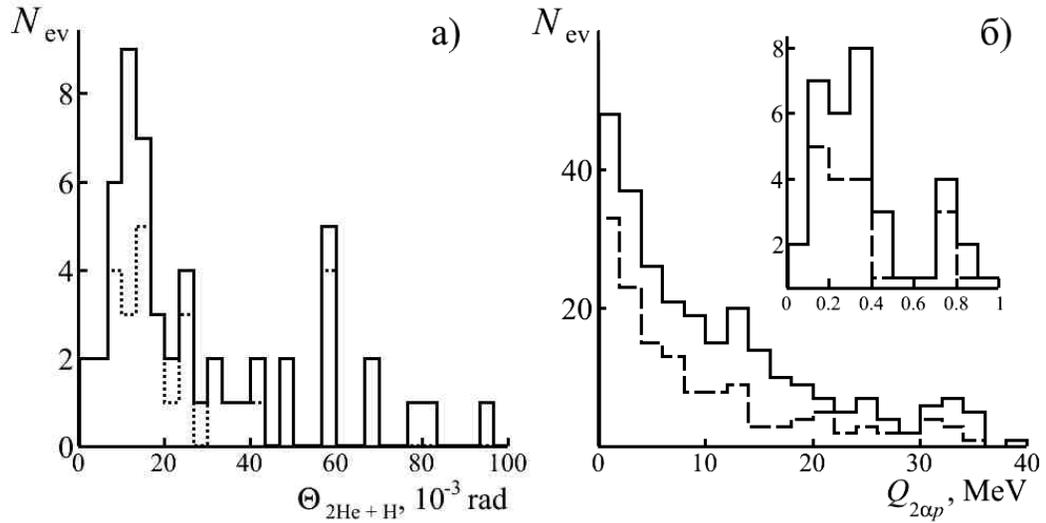


Рис 4. Распределение событий по пространственному углу Θ между направлением узкой α -парой ($\Theta_{2\alpha} < 10.5$ мрад) и фрагментом H (а) и по энергии возбуждения $Q_{2\alpha p}$ троек $2\alpha p$ (б) в событиях $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$. Сплошная линия для всей статистики, пунктир – «белые» звезды.

Механизм образования узких струй фрагментов (§ I.5) отражен в распределении по переменной эффективной инвариантной массе фрагментирующих частиц. Эффективная инвариантная масса релятивистских фрагментов Q определяется как разница между инвариантной массой фрагментирующей системы M^* и суммарной массой фрагментов ΣM_i , т. е. $Q = M^* - \Sigma M_i$. M^* определяется как сумма всех произведений 4-импульсов $P_{i,k}$ фрагментов $M^{*2} = (\Sigma P_j)^2 = \Sigma (P_i \cdot P_k)$. 4-импульсы $P_{i,k}$ определяются в приближении сохранения фрагментами начального импульса на нуклон. В распределении по переменной $Q_{2\alpha}$ 62 (включая 39 в «белых» звездах) пары α -частиц расположены в области $Q_{2\alpha} < 200$ кэВ (вставка, Рисунок 3б). Среднее значение величины $Q_{2\alpha}$ в этой области характерно для энергии распада нестабильного ядра ^8Be из основного состояния 0^+ ($Q_{\text{Be} \rightarrow 2\alpha} = 92$ кэВ). Доля событий с образованием ядер ^8Be составила (24 ± 3) % для событий типа «белая» звезда. Часть событий с образованием ядра ^8Be могут быть обусловлены

распадами нестабильного ядра ${}^9\text{B}$. Анализ распределения по эффективной инвариантной массе Q в тройках $2\alpha + p$ указал на группу событий, ограниченных величиной $Q < 400$ кэВ. Величина среднего значения $Q_{2\alpha p}$, в указанной области событий, характерна для энергии распада ядра ${}^9\text{B}$ из основного состояния ($Q_{B \rightarrow Be + p} = 185$ кэВ) (вставка, Рисунок 4б). Вклад таких событий в канал ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ оценен на уровне (12 ± 2) %. Таким образом, установлено, что в канале диссоциации ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ распад ядра ${}^8\text{Be}_{g.s.}$ проявляется только в 50% событий образования ядер ${}^9\text{B}$. Отмечено, что для ядер ${}^{10}\text{C}$ такое соответствие было полным. Вклад распадов ядер ${}^8\text{Be}$ из второго возбужденного состояния 2^+ определен по каналу с образованием дейтронного фрагмента ${}^8\text{Be}_{2^+} + d$. Анализ многократного рассеяния (§ I.6) позволил определить соотношение протонной и дейтронной компоненты на уровне (2 ± 0.25) . Неожиданным представился тот факт, что число «белых» звезд ${}^9\text{B} + n$ в 6 раз превысило ${}^9\text{Be} + p$. Это наблюдение может указывать на более широкое пространственное распределение нейтронов в ядре ${}^{10}\text{B}$ по сравнению с протонами, что приводит большему сечению канала ${}^9\text{B} + n$ по сравнению с зеркальным каналом. В целом детальное понимание диссоциации ядра ${}^{10}\text{B}$ послужило основой для интерпретации данных для следующего изотопа – ${}^{11}\text{C}$.

Во второй главе описывается исследование диссоциации релятивистского ядра ${}^{11}\text{C}$. Облучение новых образцов ядерной эмульсии проводилось (§ II.1) на выводном канале нуклотрона в пучке релятивистских ядер ${}^{11}\text{C}$ с импульсом 2 A ГэВ/с . Ядра ${}^{11}\text{C}$ рождались при фрагментации ядер ${}^{12}\text{C}$ с энергией 1.2 A ГэВ на полиэтиленовой мишени. Вторичный пучок ядер был сформирован путем сепарации в магнитооптическом канале транспортировки пучка с жесткостью $Z/A = 6/11$ и импульсным аксептансом около 2%. Основной вклад во вторичный пучок дали ядра ${}^{11}\text{C}$ и несущественная примесь ядер В, Ве, Li и He.

Поиск событий в проявленных слоях ЯЭ проводился методом просмотра «по полоскам». При сканировании 10 облученных слоев ЯЭ было найдено 2301 неупругое взаимодействие ^{11}C с ядрами из состава ЯЭ (Рисунок 5). Для анализа были отобраны (§ II.2) только те события, в которых треки фрагментов ядра-снаряда сосредоточены в узком фрагментационном конусе 6° , а суммарный заряд фрагментов равен 6. Таким образом, была получена информация о вероятностях образования каналов диссоциации ядер ^{11}C в ядерной эмульсии (Таблица 2). Показано, что, как и в случае диссоциации ядра ^{10}B наблюдаются каналы с преобладанием вторичных фрагментов He и H в конусе фрагментации. Отмеченный эффект послужил основанием для последующего анализа с целью установления событий распадов ядер ^8Be и ^9B в эти каналы. Канал 3He вероятно соответствует конфигурации $2^4\text{He} + ^3\text{He}$, которая может возникать как от распада ядер-остовов ^8Be и ^7Be , так и трехтельных состояний. Дополнительный вклад во множественные каналы, содержащие фрагменты He и H , может быть связан с диссоциацией кластера ^6Li , как самостоятельного элемента ^{11}C , в соответствии с его виртуальной структурой $\alpha + d$. Отмечено появление канала диссоциации $\text{Li} + \text{He} + \text{H}$. Сравнение с зарядовыми топологиями каналов диссоциации соседних изотопов углерода указало на индивидуальный характер диссоциации для ядер ^{11}C . В целом картина диссоциации ядра ^{11}C отражает вклад в ее структуру ядер-основ ^{10}B и ^7Be .

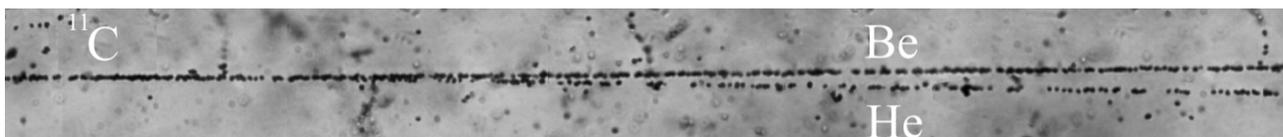


Рис. 5. Пример события диссоциации релятивистского ядра ^{11}C по каналу $^{11}\text{C} \rightarrow \text{Be} + \text{He}$. Вторичный фрагмент Be соответствует ядру ^7Be , а фрагмент He – α -частице. Увеличение изображения 45^\times .

Таблица 2. Распределение по каналам диссоциации релятивистских ядер ^{11}C с энергией 2 А ГэВ в ядерной фотоэмульсии.

Канал	События «белая» звезда	События с фрагментами мишени
6H	3 (2%)	10 (4%)
B + H	6 (4%)	7 (3%)
He + 4H	15 (10%)	44 (17%)
Li + He + H	5 (4%)	17 (6%)
Be + He	18 (12%)	26 (10%)
2He + 2H	72 (50%)	140 (53%)
3He	25 (17%)	19 (7%)

Прецизионные измерения углов вылета фрагментов ядер He и H (§ П.3) в событиях $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ и $^{11}\text{C} \rightarrow 3\text{He}$ обеспечены статистикой из 154 событий, обладающих благоприятными геометрическими условиями. В распределениях по относительному пространственному углу между двумя α -частицами (вставка, Рисунок 6а) отмечены события, ограниченные углом $\Theta_{2\alpha} < 8$ мрад. В распределении по углу между узкой парой α -частиц и однозарядной частицей (Рисунок 7а) выражена область до 20 мрад с наиболее узкими струями фрагментов. Распределения по эффективной инвариантной массе (§ П.3) системы двух α -частиц (вставка, Рисунок 6б) в событиях $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ указывают на распад ^8Be из основного состояния в (20 ± 3) % событий с образованием фрагментов мишени и в (24 ± 2) % в «белых» звездах. В канале $^{11}\text{C} \rightarrow 3\text{He}$ образование α -пар в распадах ядра ^8Be наблюдаются с вероятностью (25 ± 2) %.

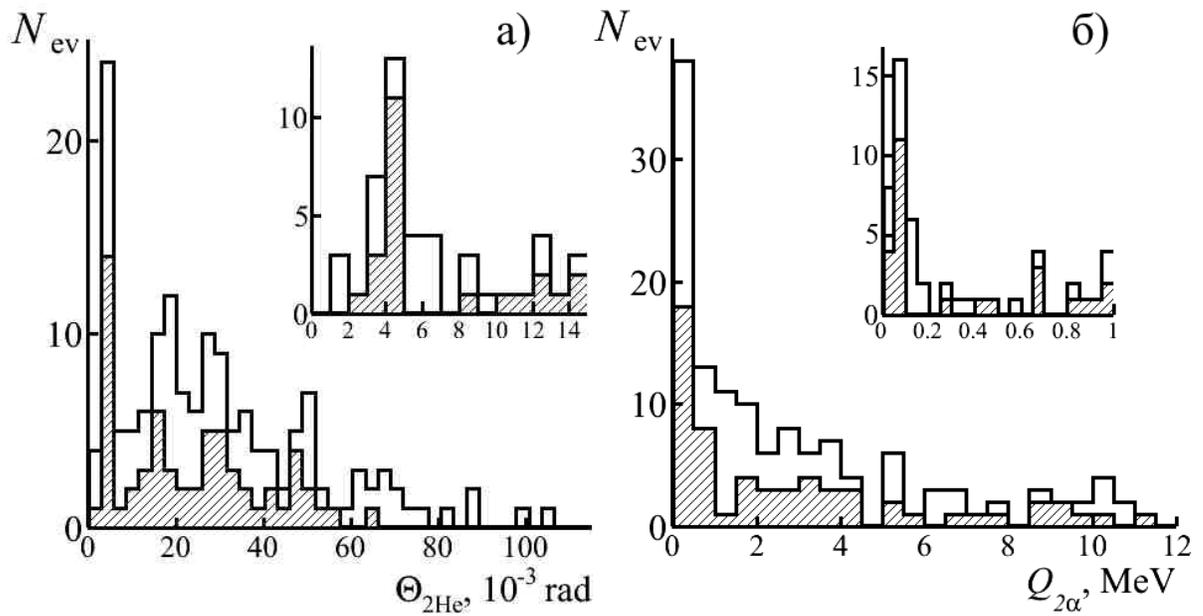


Рис. 6. Распределение событий по пространственному углу Θ между двумя фрагментами He (а) и по энергии возбуждения $Q_{2\alpha}$ пар α -частиц (б) в событиях $^{12}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$. Сплошная линия – вся статистика, пунктир – события типа «белая» звезда.

Идентифицированы распады нестабильного ядра ^9B из основного состояния (вставка, Рисунок 7б) в $(13 \pm 1)\%$ «белых» звезд $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$. Таким образом, во фрагментации ядер ^{11}C в 66% распадов ^8Be возникают из распадов ^9B . В случае ядра ^{10}B 50% событий с образованием ядер ^8Be проходит через распад ^9B , а для ^{10}C такое соответствие было полным. Был сделан вывод, что ядро ^9B может существовать в ^{11}C как самостоятельный виртуальный компонент или как составная часть виртуальной основы ^{10}B .

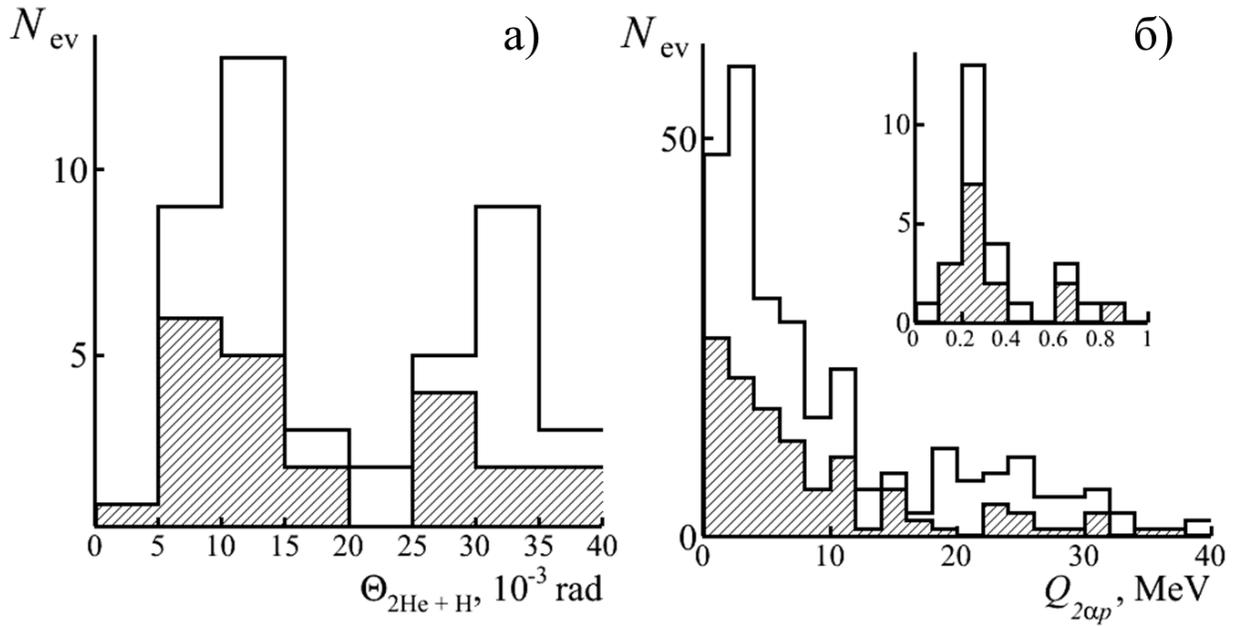


Рис. 7. Распределение событий по пространственному углу Θ между направлением узкой α -парой ($\Theta_{2\alpha} < 10.5$ мрад) и фрагментом Н (а) и по энергии возбуждения $Q_{2\alpha p}$ троек $2\alpha p$ (б) в событиях $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$. Сплошная линия для всей статистики, пунктир – события типа «белая» звезда.

В третьей главе представлен анализ событий диссоциации релятивистских ядер ^{12}C . Материалом исследования послужили слои ядерной эмульсии толщиной 200 мкм на стекле, облученные продольно в медико-биологическом пучке ядер ^{12}C (1 А ГэВ/с) бустера ускорительной установки У-70 (ИФВЭ, г. Протвино) (§ III.1). С целью выявить эффект состояния Хойла (СХ), анализ был сконцентрирован на событиях с образованием троек α -частиц в диссоциации релятивистского ядра ^{12}C (Рисунок 8). Процедура угловых измерений основана на статистике 86 событий $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$, включая 36 «белых» звезд. Имеющаяся статистика была дополнена угловыми измерениями для 186 событий $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ из раннего облучения слоев ЯЭ, выполненного в 90-е года на синхрофазотроне ОИЯИ при импульсе 4.5 А ГэВ/с. Таким образом охват по энергии от сотен МэВ до нескольких ГэВ на нуклон позволил проверить универсальность идентификации СХ в переменной $Q_{3\alpha}$.

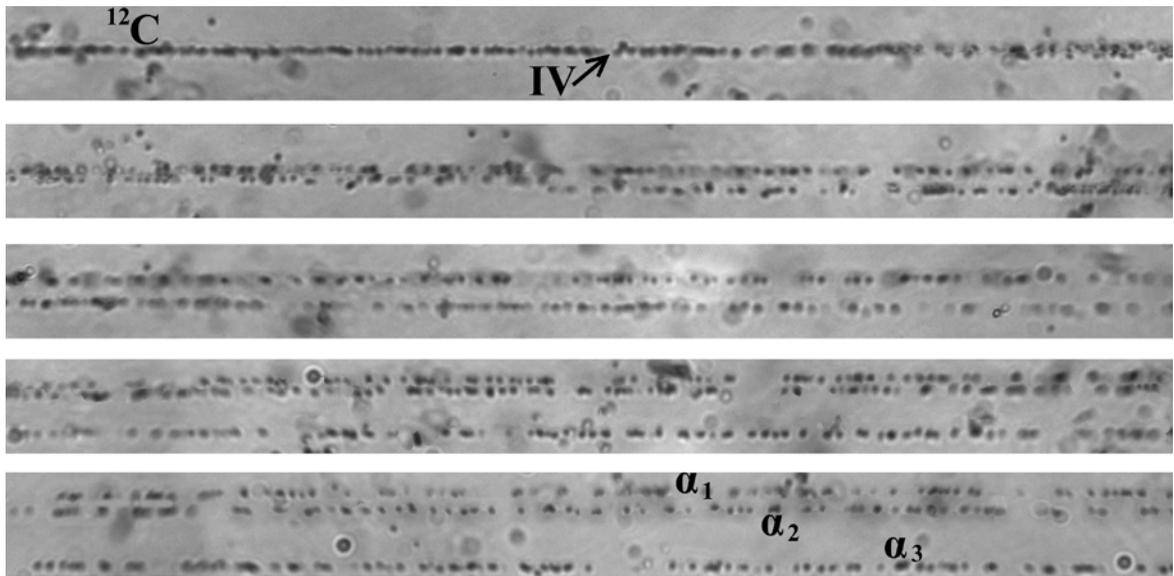


Рис. 8. Последовательная фотография события $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ ($P_0 = 1$ А ГэВ/с), IV – положение вершины взаимодействия. Основные характеристики события: $\theta_{\alpha_1\alpha_2} = 8$ мрад, $\theta_{\alpha_1\alpha_3} = 15$ мрад, $\theta_{\alpha_2\alpha_3} = 8$ мрад, $Q_{\alpha_1\alpha_2} = 57$ кэВ, $Q_{\alpha_1\alpha_3} = 227$ кэВ, $Q_{\alpha_2\alpha_3} = 61$ кэВ, $Q_{3\alpha} = 230$ кэВ. Характерный размер зерна 0.5 мкм.

Угловой анализ (§ III.2) испускания α -частиц указал на возможный вклад (20 ± 2) % распада ядер ^8Be (0^+) во фрагментацию ядер ^{12}C . Однако было замечено, что распределение по переменной эффективной инвариантной массы пар α -частиц (вставка, Рисунок 9а) становится более широким (вплоть до 500 кэВ). Такое изменение вызвано возросшим вкладом нерезонансных α -пар. В связи с этим, оценить вклад прямого и последовательно каналов образования СХ на имеющейся статистике не представляется возможным.

Полученный опыт реконструкции ядер ^8Be и ^9B был применен для поиска релятивистских распадов состояния Хойла. Впервые с помощью методики ядерной эмульсии идентифицированы события в состоянии Хойла (§ III.3) в диссоциации релятивистского ядра ^{12}C на 3 α -частицы с импульсом 1 и 4.5 А ГэВ/с. Важной особенностью идентификации СХ, как и в случае идентификации распадов ядер ^8Be , является то, что уровень СХ по энергии также достаточно отделено от ближайших порогов возбуждений ядра ^{12}C . В

связи с этим подход, использованный при идентификации ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ в диссоциации ядер ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{C}$, был применен и к идентификации СХ по эффективной инвариантной массе α -троек $Q_{3\alpha}$. В распределении по эффективной инвариантной массе α -троек $Q_{3\alpha}$, представленном на Рисунке 9(б) выражен пик в области $Q_{3\alpha} < 1$ МэВ, где и должны отражаться распады СХ. Для событий при 4.5 А ГэВ/с среднее значение для событий в пике $\langle Q_{3\alpha} \rangle$ (RMS) равно 441 ± 34 (190) кэВ, а при 1 А ГэВ/с соответственно 346 ± 28 (85) кэВ. Согласно “мягкому” условию $Q_{3\alpha} < 1$ МэВ в облучении 4.5 А ГэВ/с 30 (из 186) событий могут быть отнесены к СХ, а при 1 А ГэВ/с – 9 (из 86), включая 5 “белых” звезд (из 36). В обоих облучениях установлен вклад СХ на уровне $(11 \pm 3)\%$ от общей статистики. Установлено, что события с состоянием Хойла образуются с поперечным импульсом P_{Tsum} (Рисунок 10), характерным для ядерно-дифракционного механизма реакции. Аналогичные события наблюдались и в случаях ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}$ и ${}^{10}\text{C} \rightarrow {}^9\text{B}$. Возможно, что СХ не сводится к только возбуждению ${}^{12}\text{C}$, а может проявляться как универсальный объект во фрагментации более тяжелых ядер, аналогично ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$.

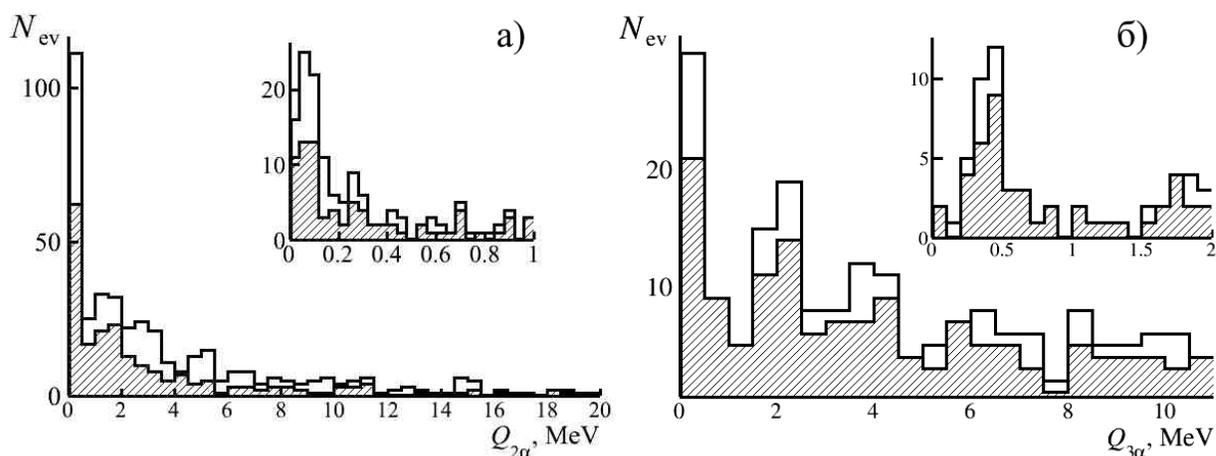


Рис. 9. Распределение по эффективной инвариантной массе α -пар $Q_{2\alpha}$ (а) и по энергии возбуждения α -троек $Q_{3\alpha}$ (б) в диссоциации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ при импульсе 4.5 А ГэВ/с (заштриховано) и 1 А ГэВ/с (добавлено).

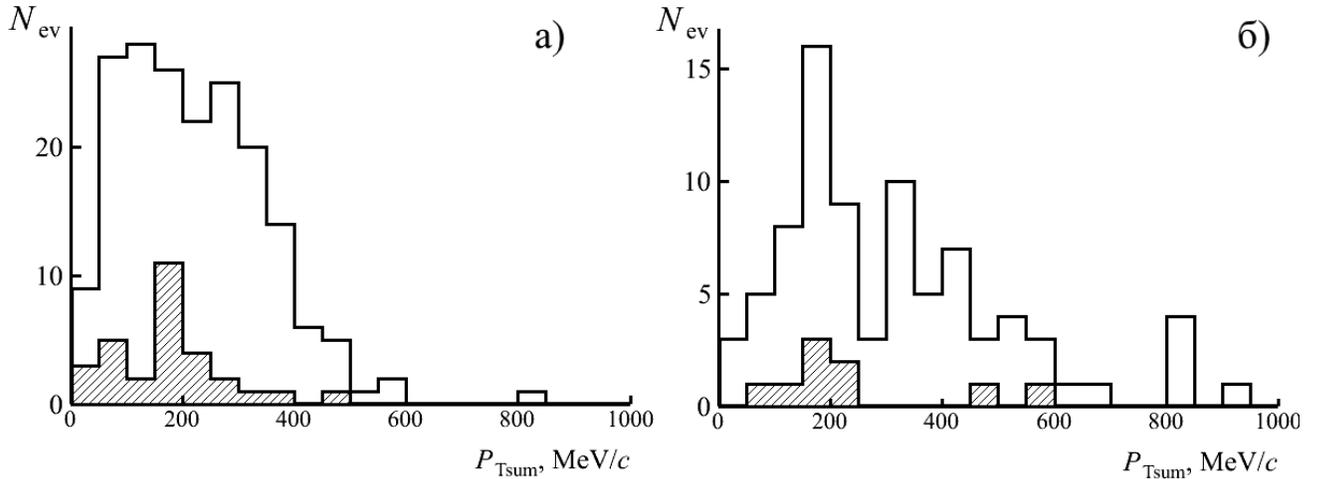


Рис. 10. Распределение по полному поперечному импульсу P_{Tsum} троек α -частиц в событиях диссоциации ядер ^{12}C при импульсе 4.5 А ГэВ/с (а) и 1 А ГэВ/с (б); события $Q_{3\alpha} < 1$ МэВ отмечены штриховкой.

В **закл^ючении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые состоят в следующем:

1. Получен экспериментальный материал по взаимодействиям релятивистских ядер ^{10}B на ядрах в слоях ЯЭ. На суммарной длине 241 метр найдено 1664 неупругих событий, в том числе 163 события периферической диссоциации. Исследовано распределение каналов по вероятностям образования комбинаций заряженных фрагментов в диссоциации релятивистских ядер ^{10}B . Установлено доминирование каналов, содержащих только треки ядер He и H (90%), при лидировании канала $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ с вероятностью 76%. Обнаружены события перезарядки $\text{B} \rightarrow \text{C}$ и $\text{B} \rightarrow \text{Be}$. Материалом для исследования явились слои ядерной эмульсии типа БР-2, облученные в первичном пучке ядер ^{10}B на установке нуклотрон ОИЯИ.

2. Установлено, что в (24 ± 3) % событий в канале источником образования пары α -частиц является нестабильное ядро ^8Be в основном состоянии. Определен вклад распада ядра ^9B из основного состояния $3/2^-$ в

канале $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ на уровне $(12 \pm 2) \%$. Идентификация дейтронов в событиях $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ свидетельствует о присутствии распадов ядер ^8Be из первого возбужденного состояния 2^+ .

3. Получена зарядовая топология каналов диссоциации релятивистских ядер ^{11}C с импульсом 2 A ГэВ/с. Установлено, что события с образованием пар фрагментов He и H доминируют в топологии с вероятностью наблюдения 53%. Отмечено появление характерного для ядра ^{11}C канала диссоциации $\text{Li} + \text{He} + \text{H}$. Материалом для исследования послужили новые образцы слоев ЯЭ, облученные во вторичном пучке ядер ^{11}C на нуклотроне ОИЯИ.

4. В распределении по эффективной инвариантной массе системы из 2α -частиц установлен вклад ядер $^8\text{Be}_{gs}$ на уровне $(20 \pm 3) \%$ в событиях $^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ и в $(25 \pm 2) \%$ событий в канале $^{11}\text{C} \rightarrow 3\text{He}$. В распределении по параметру эффективной инвариантной массы троек $2\alpha p$ выявлены $(13 \pm 1) \%$ событий с распадами ядер ^9B из основного состояния.

5. Проведено исследование событий диссоциации релятивистских ядер $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ с импульсом 1 A ГэВ/с (бустер У-70, ИФВЭ) и 4.5 A ГэВ/с (синхрофазотрон, ОИЯИ). Анализ угловых распределений указал на образование пар α -частиц из распада $^8\text{Be}_{gs}$ в $(20 \pm 2) \%$ событий. В распределении по инвариантной массе α -троек идентифицированы распады релятивистских ядер ^{12}C из состояния Хойла на 3 α -частицы. Установлено, что события в состоянии Хойла наблюдаются с вероятностью $(11 \pm 3) \%$ в двух облучениях. На основе измерений полных поперечных импульсов установлен ядерно-дифракционный механизм образования состояния Хойла в событиях $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$.

В целом результат проведенного экспериментального исследования состоит в следующем: представления о существенной роли нестабильных ядер ^8Be и ^9B в ядерной структуре, ранее установленные для ядра ^{10}C , были

распространены на ядра ^{10}B и ^{11}C . Накопленный опыт реконструкции распадов нестабильных ядер ^8Be и ^9B в релятивистской диссоциации легких ядер, позволил идентифицировать релятивистские распады ядер ^{12}C в состоянии Хойла с помощью ядерной фотоэмульсии. Идентификация таких событий в электронных экспериментах пока не доступна, что делает результаты проведенного исследования, в данной области, уникальными.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Zaitsev A. A. et al. Dissociation of relativistic ^{10}B nuclei in nuclear track emulsion // *Physics of Particles and Nuclei*, – 2017. – V.**48**. – №.6. – pp. 960-963; Зайцев А.А. и др. Диссоциация релятивистских ядер ^{10}B в ядерной эмульсии // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 2017. – Т.**48** – №6. – С. 919-924.
2. Artemenkov D. A. ... Zaitsev A. A. et al. Recent Findings in Relativistic Dissociation of ^{10}B and ^{12}C Nuclei // *Few-Body Systems*, – 2017 – V.**58**. – №.2. – pp. 89-92.
3. Artemenkov D. A. ... Zaitsev A. A. et al. Charge topology of the coherent dissociation of relativistic ^{11}C and ^{12}N nuclei // *Physics of Atomic Nuclei*, – 2015. – V.**78**. – №.6. – pp. 794-799; Артеменков Д. А., Зайцев А.А. и др. Зарядовая топология когерентной диссоциации релятивистских ядер ^{11}C и ^{12}N // *Ядерная физика*, – 2015. – Т.**78**. – №.9. – С. 845-850.
4. Artemenkov D. A. ... Zaitsev A. A. et al. Study of the Involvement of ^8Be and ^9B Nuclei in the Dissociation of Relativistic ^{10}C , ^{10}B , and ^{12}C // *Phys. Atom. Nuclei*, – 2017. – V.**80**. – №6. – pp. 1126-1132; Артеменков Д. А., Зайцев А.А. и др. Исследование диссоциации релятивистских ядер ^{10}C , ^{10}B и ^{12}C , сопровождаемой ядрами ^8Be и ^9B // *Ядерная физика*, – 2017. – Т.**80**. – №.6. – С. 645-651.
5. Artemenkov D. A., Zaitsev A. A., Zarubin P. I. Search for the Hoyle State in Dissociation of Relativistic ^{12}C Nuclei // *Physics of Particles and Nuclei*, – 2018. – V.**49**. – №.4. – pp. 530-539; Артеменков Д.А., Зайцев А.А., Зарубин П.И. Поиск состояния Хойла в диссоциации релятивистских ядер ^{12}C // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 2018. – Т.**49**. – №4. – С. 929-945.

6. Zaitsev A. A., Zarubin P. I. Application of Nuclear Track Emulsion in Search for the Hoyle State in Dissociation of Relativistic ^{12}C Nuclei // *Physics of Atomic Nuclei*, – 2018. – V.**81**. – №.9. – pp. 1237-1243; Зайцев А. А., Зарубин П. И. Применение ядерной эмульсии для поиска состояния Хойла в диссоциации релятивистских ядер ^{12}C // *Ядерная физика и инжиниринг*, – 2017. – Т.**8**. – №5. – С. 425-431.
7. Artemenkov D. A. ... Zaitsev A. A. et al. Nuclear track emulsion in search for the Hoyle-state in dissociation of relativistic ^{12}C nuclei // *Radiation Measurements*, – 2018. – V.**119**. – pp. 199-203.
8. Artemenkov D. A., Zaitsev A. A., Zarubin P. I. Unstable nuclei in dissociation of light stable and radioactive nuclei in nuclear track emulsion // *Physics of Particles and Nuclei*, – 2017. – V.**48**. – №.1. – pp. 147-157.
9. Artemenkov D. A. ... Zaitsev A. A. et al. Progress of analysis of dissociation of ^{10}C , ^{10}B and ^{12}C nuclei in nuclear track emulsion // *EPJ Web of Conferences*. – EDP Sciences, – 2017. – V.**138**. – pp. 01030.
10. Artemenkov D. A. ... Zaitsev A. A. et al. Unstable nuclei in coherent dissociation of relativistic nuclei $^{7,9}\text{Be}$, ^{10}B and $^{10,11}\text{C}$ // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, – 2016. – V.**724**. – №.1. – pp. 012055.
11. Artemenkov D. A. ... Zaitsev A. A. et al. ^8Be and ^9B nuclei in dissociation of relativistic ^{10}B and ^{11}C nuclei // *Journal of Physics: Conference Series*, – 2016. – V.**675**. – pp. 022003.

Зайцев Андрей Александрович

Исследование диссоциации релятивистских ядер ^{10}B , ^{11}C и ^{12}C
методом ядерной фотоэмульсии

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать 00.00.2000. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____