

Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/NICA

Проект БЕККЕРЕЛЬ-2020

ШИФР ТЕМЫ: 02-1-1087-2009 / 2023

Тема: Исследования по физике релятивистских тяжелых и легких ионов. Эксперименты на ускорительном комплексе Нуклотрон / NICA в ОИЯИ и ЦЕРН SPS

Д. А. Артеменков^a, В. Браднова^a, Е. Фиру^b, М. Хайдук^b, Н. В. Кондратьева^a, Н. К. Корнегруца^a, Э. Мицова^{a,c}, А. Неагу^b, В.В. Русакова^a, Р. Станоева^{c,d}, А.А. Зайцев^a, И.Г. Зарубина^a, П.И. Зарубин^{a*}

^a)Лаборатория физики высоких энергий Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия

^b)Институт космических исследований, Мэгуреле, Румыния

^c)Юго-Западный университет, Благоевград, Болгария

^d)Институт ядерных исследований и ядерной энергии, София, Болгария

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

Зарубин П. И.

ЗАМЕСТИТЕЛЬ РУКОВОДИТЕЛЯ

Зайцев А. А.

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В НОО _____

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ _____ НОМЕР ДОКУМЕНТА _____

ДАТА НАЧАЛА ПРОЕКТА _____

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/НИСА
Проект БЕККЕРЕЛЬ-2020

ШИФР ТЕМЫ: 02-1-1087-2009 / 2023

Тема: Исследования по физике релятивистских тяжелых и легких ионов. Эксперименты на ускорительном комплексе Нуклотрон / НИСА в ОИЯИ и ЦЕРН SPS

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

Зарубин П. И.

УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

НАЧАЛЬНИК НОО

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

ЗАМ. РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА

ОДОБРЕН

ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

Содержание

	Стр.
Форма №24	1
Форма №25	2
Содержание	3
Аннотация	4
Введение	5
1. Статус и перспективы исследования нестабильных состояний	9
2. Описание предлагаемого исследования	11
2.1.1 Метод исследования	11
2.1.2 Идентификация ^8Be	14
2.1.3 Идентификация ^9B	16
2.1.4 Идентификация состояния Хойла	17
2.1.5 Поиск нестабильных состояний во фрагментации ядер Si и Au	19
2.1.6 Долгосрочные задачи	20
2.1.7 Обновление микроскопов и технологии ЯЭ	22
2.1.8 Заключение	24
2.2 Список литературы	26
2.3 Ожидаемые результаты и их значимость	27
2.4 Запрос ускорительного времени	28
2.5 Определение ответственности	28
2.6 Научный опыт авторов	29
2.7 Публикации, диссертации и презентации на конференциях	29
3. Человеческие ресурсы	30
4. Сильные и слабые стороны, возможности, угрозы	30
5. Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы (Форма №26)	32
6. Смета затрат (Форма № 29)	33
7. Приложения	
7.1 Отзыв В. А. Никитина	34
7.2 Отзыв С. Н. Ершова	35
7.3 Письмо поддержки Дж. Натовица	36

Аннотация

Явление диссоциации релятивистских ядер, наблюдаемое с уникальной полнотой в ядерной эмульсии (ЯЭ), позволяет изучать ансамбли нуклонов и легчайших ядер, представляющие интерес для ядерной физики и астрофизики. Индивидуальные особенности изучаемых ядер проявляются в вероятностях каналов диссоциации. Достоинства методики ЯЭ включают рекордное разрешение в определении углов вылета релятивистских фрагментов и возможность идентификации среди них изотопов He и H путем измерения многократного рассеяния.

На этой основе в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ изучается кластерная структура легких стабильных и радиоактивных изотопов. В частности, по инвариантной массе пар и троек релятивистских фрагментов He и H в диссоциации изотопов ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{10}\text{C}$ и ${}^{11}\text{C}$ идентифицированы нестабильные ядра ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$, а в диссоциации ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{16}\text{O}$ — состояние Хойла. При решении этих задач подготовлены молодые исследователи, осовременены методы анализа и восстановлено производство ЯЭ. По результатам эксперимента подготовлены докторская диссертация и шесть кандидатских диссертаций и опубликованы обзоры. Следующей проблемой является поиск в диссоциации ядер ${}^{14}\text{N}$, ${}^{22}\text{Ne}$ и ${}^{28}\text{Si}$ состояния Хойла, а также более сложных ядерно-молекулярных состояний.

Главной задачей проект БЕККЕРЕЛЬ-2020 станет применение метода ЯЭ для изучения разреженной барионной материи, возникающей при диссоциации тяжелых ядер. Температура и плотность этого короткоживущего состояния определяются по соотношению релятивистских изотопов H и He и нейтронов и углам их испускания. Слои ЯЭ, облученные в пучках NICA послужат исследовательским материалом, позволяющим исследовать ядерные ансамбли беспрецедентной множественности и разнообразия. Для понимания механизма множественной диссоциации ядер предлагается провести анализ фрагментации ядер из состава ЯЭ вплоть до их полного разрушения под действием релятивистских мюонов. Облучения ЯЭ мюонами будут выполнены в ЦЕРН.

Эффективное решение поставленных задач требует инвестиций в автоматизированные и компьютеризированные микроскопы, а также совершенствование технологии ЯЭ. Проект послужит основой для обновления традиционного сотрудничества по использованию ЯЭ.

ВВЕДЕНИЕ

Коллективные степени свободы, в которых группы из нескольких нуклонов ведут себя как составляющие кластеры, являются одним из ключевых аспектов ядерной структуры. Основными «строительными кирпичами» кластеризации являются легчайшие ядра, не имеющие возбужденных состояний – прежде всего это ядра ${}^4\text{He}$ (α -частицы), а также дейтроны (d), тритоны (t) и ядра ${}^3\text{He}$ или *гелионы* (h). Эта особенность отчетливо проявляется в легких ядрах, где число возможных кластерных конфигураций невелико. В кластерной картине легкие ядра представляются как суперпозиции различных конфигураций кластеров и нуклонов. Интерес к кластерным состояниям сразу над порогами связи связан с предсказанием их свойств, как молекулярно-подобных. Рассматриваемые в макроскопическом масштабе, когерентные ансамбли кластеров могут играть промежуточную роль в нуклеосинтезе, что придает изучению ядерной кластеризации значение, существенно выходящее за рамки проблем ядерной структуры. На первый взгляд исследования ядерных систем многих тел кажутся невозможными в лабораторных условиях. Тем не менее, они могут быть исследованы непрямым образом в процессах развала ядер при возбуждении несколько выше соответствующего порога. Ядерная кластеризация традиционно считается прерогативой физики ядерных реакций при низких энергиях. Предназначением проекта БЕККЕРЕЛЬ-2020 является применение потенциала одного из разделов физики высоких энергий – релятивистской ядерной физики – для развития концепций ядерной кластеризации.

Генерация ансамблей, состоящих из ядер He и H возможна в периферической диссоциации релятивистских ядер. Углубленное изучение их особенностей может пролить свет на актуальные вопросы ядерной физики нескольких тел. В фокусе современных теоретических разработок находится возможность существования состояний, обладающих выраженной α -конденсатной и ядерно-молекулярной структурой. В свою очередь находки соответствующих лабораторных поисков могли бы быть привлечены для развития многотельных сценариев ядерной астрофизики.

Будучи гибким и недорогим, метод ядерной эмульсии ЯЭ отвечает на соответствующие экспериментальные вызовы, по крайней мере, на этапе поисков. В слоях ЯЭ, продольно облученных релятивистскими ядрами, следы фрагментов могут наблюдаться с исчерпывающей полнотой, а их направления определяться с наилучшим разрешением. Определение инвариантной массы групп релятивистских фрагментов в приближении сохранения скорости начального ядра позволяет спроецировать угловые корреляции фрагментов на энергетический масштаб ядерной физики. Тем самым, на основе релятивистски-инвариантного подхода возникает новая и вместе с тем наглядная

возможность экспериментального изучения ансамблей легчайших ядер сразу над порогом связи. Возможно как использование результатов, получаемых в рамках метода ЯЭ, при планировании экспериментов высокой сложности и разнообразием самых современных детекторов, так и широкомасштабное применение самого метода на основе достижений компьютеризованной микроскопии. В таком контексте на основе применения ЯЭ в отношении распадов нестабильных ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ сформулированы предложения по поиску связанных с ними более тяжелых состояний.

Технологические и аналитические основы метода ЯЭ в применении к релятивистским частицам были разработаны в тот начальный период, когда основополагающие открытия в физике высоких энергий делались при исследовании космических лучей. Эти достижения полно представлены в классической книге С.Н. Powell, Р.Н. Fowler and D.H. Perkins вместе с фотографиями характерных событий [1]. Ее последняя глава книги посвящена открытию релятивистских ядер в космической радиации.

Следы релятивистских ядер космического происхождения и созданные ими звезды были обнаружены в стопках ЯЭ, облучавшихся в стратосфере в конце 40-х годов [2]. Для описания сечения взаимодействия этих ядер с ядрами состава ЯЭ была предложена формула геометрического перекрытия, позже названная формулой Брэдта-Питерса. Среди прочих наблюдались звезды, содержащие по нескольку следов релятивистских α -частиц вблизи направлений следов родительских ядер. Определяемые как периферические, такие взаимодействия наглядно указали на α -частичную кластеризацию конечного состояния. Этот аспект ядерной структуры углубленно изучается в низкоэнергетических ядерных реакциях прецизионными спектроскопическими методами.

В 70-х гг. стартовали облучения стопок ЯЭ релятивистскими легкими ядрами с энергией несколько ГэВ на нуклон на Синхрофазотроне ОИЯИ и Бевалаке LBL, а в 90-х гг. средними и тяжелыми на AGS (BNL) и SPS (CERN) при существенно более высоких значениях энергии. Метод ЯЭ обеспечил с разрешением около 0.5 мкм эксклюзивные наблюдения следов от тяжелых релятивистских ядер и вплоть до однозарядных частиц и медленных осколков ядер мишени. Поиск звезд по первичным следам позволил сделать обзор всех возможных типов взаимодействия без выборки. Результаты, полученные с 70-х гг. по настоящее время этим методом, как и соответствующие файлы данных, сохраняют уникальность в отношении состава релятивистской фрагментации, а облученные слои ЯЭ могут применяться для целенаправленных исследований.

Особенности легких ядер проявились в конусе релятивистской фрагментации. К ним можно отнести универсальное образование пар α -частиц с предельно малыми углами

разлета - порядка несколько мрад (например, [3]). Такие узкие «вилки» соответствуют распадам нестабильного ядра ${}^8\text{Be}$. Они указывают на принципиальную возможность изучения в релятивистском подходе α -кластеризации, начиная с энергии распада ${}^8\text{Be}$.

До сих пор полное детектирование ансамблей легчайших релятивистских фрагментов продемонстрировано только методом ЯЭ. Однако, он не обеспечивает импульсного анализа. Это ограничение может компенсироваться привлечением сведений о фрагментации релятивистских ядер, полученных на основе магнитных спектрометров (например, [4,5]). Стоит отметить доступность данных по эксклюзивному изучению фрагментации релятивистских ядер кислорода на протонах, полученные с помощью водородной пузырьковой камеры ОИЯИ, помещавшейся в магнитное поле [6].

Эксперименты в пучках быстро движущихся ядер, посвященные ядерной структуре, дают как преимущества детектирования, так и позволяют включить радиоактивные изотопы, включая экзотические, в число изучаемых. Информация о структуре основных состояний и периферических взаимодействиях ядер извлекается из импульсных распределений релятивистских фрагментов с зарядами близкими к начальному ядру (например, [7-9]). Доказано образование релятивистского фрагмента ${}^7\text{Be}^*$ (${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$) [10] в единственном связанном возбуждении [11]. Исследования ядерных возбуждений с регистрацией совместно с фрагментом одного или пары протонов или нейтронов, требует перехода в область сотен МэВ на нуклон (например, [12] и недавно [13]). Тогда удастся развести достаточно отличающиеся по магнитной жесткости первичный пучок и заряженные фрагменты.

В случае легких ядер роль каналов с только с фрагментами He и H является ключевой, хотя бы в силу того факта, что изотопы ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$, присутствие которых в конусе фрагментации весьма вероятно, не являются связанными. Например, согласно данным ЯЭ каналы диссоциации ${}^{11}\text{C}$, содержащие только He и H, составляют 80% событий с сохранением первичного заряда в конусе фрагментации. Будучи интересна как часть картины фрагментации, реконструкция ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ необходима для последующих поисков нестабильных состояний, распадающихся с их участием.

В принципе коллимация релятивистских фрагментов, рожденных в периферическом столкновении, позволяет детектировать их все сразу в малом телесном угле, что представляет собой очевидную ценность. Однако электронные эксперименты в этом направлении натолкнулись на сложности, обусловленные квадратичной зависимостью ионизации от зарядов, крайне малой угловой расходимостью релятивистских фрагментов, и, зачастую, примерным совпадением по магнитной жесткости с ядрами пучка. Например, в эксперименте, посвященном изучению

диссоциации $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ при 2.1 А ГэВ, не удалось идентифицировать распады ^8Be , а основная часть энергетического спектра α -троек была реконструирована моделированием [14]. Представляется, что главная проблема состоит в том, что нарастание степени диссоциации ядра-снаряда ведет к стремительному снижению сигнала ионизации в детекторах и, по-видимому, неприемлемо возрастающим требованиям к их рабочему диапазону. Магнитный спектрометр с время-проекционной камерой, обладающей широким диапазоном чувствительности, развивается в ГСИ. Эксперимент нацелен на изучение изотопического состава и механизмов фрагментации тяжелых ядер при 1 А ГэВ в столкновениях с протонами [15]. В его рамках заслуживает рассмотрения возможность реконструкции диссоциации $^{12}\text{C} \rightarrow ^8\text{Be} + \alpha$.

Далее будут суммированы проблемы нестабильных состояний и, затем, результаты их поисков в релятивистской диссоциации нескольких легких ядер в ЯЭ. Будучи интересны в отношении структуры исследовавшихся ядер, эти наблюдения позволяют исследовать вопрос их универсальности, включая их проявление в диссоциации средних и тяжелых ядер, где возникает возможность поиска все более сложных нестабильных состояний. В качестве первого шага представлен анализ ЯЭ, облучавшейся в BNL ядрами ^{28}Si при 14.5 А ГэВ и Au при 10.7 А ГэВ.

Явление периферической диссоциации релятивистских ядер имеет скрытый потенциал «лаборатории» для проверки самых современных концепций ядерной физики и ядерной астрофизики. В диссоциации тяжелых ядер может воссоздаваться ядерная материя, сходная по термодинамике и изотопическому составу с взрывами сверхновых. Пучки ядер, формируемые для коллайдера NICA, откроют перспективу систематических исследований в этом направлении методом ЯЭ. Проект направлен на выявление состава фрагментных ансамблей, а также вклада нейтронов при фрагментации тяжелых ядер. Благодаря уникальному разрешению и чувствительности метода ЯЭ, будут обеспечены наиболее точные измерения углов испускания релятивистских изотопов H и He, идентифицируемых методом многократного рассеяния, а также нейтронов, идентифицируемых по вторичным вершинам. Будучи получены в обратной кинематике, данные о выходах нейтронов послужат ориентиром при проектировании гибридных систем «реактор + ускоритель».

1. Статус и перспективы исследования нестабильных состояний

С начала 2000-х гг. метод ЯЭ применяется в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ для изучения в релятивистском подходе состава фрагментации легких ядер, включая радиоактивные (обзоры [16-18]). Для этого эксперимента компания Славич (Переславль-Залесский, Россия) возобновила производство слоев ЯЭ толщиной от 50 до 200 мкм на стеклянной основе. В настоящее время осваивается производство слоев толщиной 500 мкм без подложки, что позволит продолжить применение методики, которая считалась практически утраченной.

Итак, известные и ранее не наблюдавшиеся особенности изотопов ${}^{7,9}\text{Be}$, ${}^{8,10,11}\text{B}$, ${}^{10,11}\text{C}$, ${}^{12,14}\text{N}$ выявились в вероятностях каналов их диссоциации в ЯЭ. В диссоциации ${}^{10}\text{B}$, ${}^{10}\text{C}$ и ${}^{11}\text{C}$ идентифицированы релятивистские распады ${}^9\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + p$. Ранее десятки распадов ${}^9\text{B}$ были обнаружены при фрагментации ядер ${}^{12}\text{C}$ с энергией 200–400 А МэВ в водной мишени, когда были реконструированы треки в поперечно расположенных пленках NTE [19].

По-видимому, отсутствие у ядра ${}^9\text{B}$ стабильного состояния не препятствует его присутствию в структуре этих ядер. Их синтез мог бы происходить через резонанс ${}^9\text{B} + p$ по цепи ${}^7\text{Be}({}^3\text{He}, p){}^9\text{B}(p, \gamma){}^{10}\text{C}(e^+, \nu){}^{10}\text{B}(p, \gamma){}^{11}\text{C}(e^+, \nu){}^{11}\text{B}$. В результате ${}^9\text{B}$ “запечатлевается” в образующихся ядрах, что и отражается в релятивистской диссоциации. Во фрагментации ${}^7\text{Be}$ идентифицированы распады ${}^6\text{Be} \rightarrow \alpha + 2p$. Вместе с тем, сигнал ${}^6\text{Be}$ в диссоциации ${}^{10}\text{C}$ выявлен не был.

При дальнейшем продвижении вдоль границы протонной стабильности сохраняется возможность эффективного изучения в ЯЭ множественных конечных состояний He и H. Вместе с тем, этот подход ограничен невозможностью изотопной идентификации фрагментов тяжелее He, вклад которых быстро нарастает с ростом массового числа исследуемого ядра. Их идентификация возможна в экспериментах с магнитным анализом.

Идентификация релятивистских распадов ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ в ЯЭ указала на возможность идентификации нестабильного состояния тройки α -частиц, именуемого состоянием Хойла (HS) в релятивистской диссоциации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ [20] и затем ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ [21]. Решение этой задачи позволяет использовать HS как «инструмент» поиска экзотических компонент в ядерной структуре и сложных нестабильных состояний, распадающихся с его участием. Заслуживает изучения возможность извлечения информации о размере HS на основе распределений по полному поперечному импульсу α -троек.

Напомним, что HS является вторым (и первым α -несвязанным) возбуждением 0^+_{2} ядра ${}^{12}\text{C}$ [11]. История открытия и статус исследования этого короткоживущего состояния трех реальных α -частиц обсуждаются в обзоре [22]. Синтез ${}^{12}\text{C}$ возможен через два

нестабильных состояния $3\alpha \rightarrow \alpha^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}(0^+_{22})$ или $\text{HS}) \rightarrow {}^{12}\text{C}$. В 3α -процессе HS проявляет себя как нестабильное ядро, пусть необычной ядерно-молекулярной структуры.

Ядро ${}^8\text{Be}$ является непрременным продуктом распада HS и ${}^9\text{B}$. Энергия распада ${}^8\text{Be}$ составляет 91.8 кэВ, а ширина 5.57 ± 0.25 эВ [11]. Обособленность HS среди возбуждений ${}^{12}\text{C}$, предельно малые значения энергии над 3α -порогом (378 кэВ) и ширины распада (9.3 ± 0.9 эВ) указывают на его сходство с ядром ${}^8\text{Be}$ [10]. Основное состояние ядра ${}^9\text{B}$ выше порога ${}^8\text{Be} + p$ на 185.1 кэВ, а его ширина 0.54 ± 0.21 кэВ [11]. Значимость HS не ограничивается ролью возбуждения ядра ${}^{12}\text{C}$. Вне зависимости от структурных особенностей HS проявляется в ядерных реакциях как универсальный объект подобный ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ [23-25].

Согласно ширинам, ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{B}$ и HS могут являться полноценными участниками в релятивистской фрагментации. Продукты их распада образуются при пробегах от нескольких тысяч (${}^8\text{Be}$ и HS) до нескольких десятков (${}^9\text{B}$) атомных размеров, т. е. за время на много порядков большее, чем время возникновения других фрагментов. Вследствие наименьшей энергии распада ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{B}$ и HS должны проявляться как пары и тройки релятивистских фрагментов He и H с наименьшими углами раскрытия, что их на фоне других продуктов фрагментации.

${}^8\text{Be}$ и HS рассматриваются как простейшие состояния α -частичного конденсата Бозе-Эйнштейна [26,27]. Как 4α -конденсат рассматривается 6-е возбужденное состояние 0^+_{66} ядра ${}^{16}\text{O}$ при 15.1 МэВ (или 660 кэВ над 4α -порогом). Его α -распад мог бы идти в последовательности ${}^{16}\text{O}(0^+_{66}) \rightarrow {}^{12}\text{C}(0^+_{22}) \rightarrow {}^8\text{Be}(0^+) \rightarrow 2\alpha$ или же ${}^{16}\text{O}(0^+_{66}) \rightarrow 2{}^8\text{Be}(0^+) \rightarrow 4\alpha$. Поиски в этом направлении активно ведутся [23-25]. Однако вклад 4α -ансамблей свыше 1 МэВ оказывается доминирующим. Предполагается возможность более сложных α -конденсатных состояний вплоть до 10α -частичного с энергией распада около 4.5 МэВ над 10α -порогом, что ведет к беспрецедентным требованиям к эксперименту, включая рост энергии родительского ядра.

Представляет интерес установить соотношение вероятностей распадов ${}^{13}\text{N}$ по каналам ${}^9\text{Be}\alpha$ и $\text{HS}p$. Кроме того, ${}^9\text{B}$ и HS могут служить основами в ядерных молекулах ${}^9\text{B}p$, ${}^9\text{Be}\alpha$ и $\text{HS}p$. Как и α -конденсатным состояниям, нестабильным состояниям с участием протонов могут отвечать возбуждения, имеющие электромагнитные ширины распадов. Кандидатом в такое состояние может служить возбуждение ${}^{13}\text{N}^*$ при 15.1 МэВ, имеющее ширину 0.86 ± 0.12 кэВ [11]. Эффективным источником для таких исследований может служить ядро ${}^{14}\text{N}$. В этой связи анализ диссоциации ${}^{14}\text{N}$ в ЯЭ по каналу $3\text{He} + \text{H}$ возобновлен.

Несколько изотопов имеют возбужденные состояния с ширинами порядка нескольких эВ или временами жизни несколько фемтосекунд, расположенные не выше примерно 1 МэВ над порогами разделения только α -частицы и стабильного остатка тяжелее He [11]. При образовании таких состояний во фрагментации продукты их распада также будут иметь минимальные углы раскрытия. Они будут даже более удобным предметом исследований, чем α -состояниями. В этой связи запланирован анализ зеркальных каналов $^{11}\text{C}(^{11}\text{B}) \rightarrow ^7\text{Be}(^7\text{Li}) + \alpha$. Имеется достаточный материал для подобного анализа по ядрам $^{10,11}\text{B}$, ^{11}C , ^{16}O , ^{22}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si .

В целом тема исследования нестабильных состояний представляется необычайно интригующей, а метод ЯЭ адекватным способом их поиска в периферических взаимодействиях релятивистских ядер. Могут быть поставлены вопросы о вкладе во фрагментацию распадов из более высоковозбужденных состояний с ширинами до 100 кэВ, которые также бы имели пробеги значительно превышающие характерных размеров ядер. Однако ответы находятся вне разрешения метода ЯЭ.

2. Описание предлагаемого исследования

2.1.1 Метод исследования

Облучаемые стопки собираются из слоев размером до 10x20 см² толщиной ЯЭ 200 мкм на стеклянной подложке и 550 мкм без нее. Если пучок направляется параллельно плоскости слоев, то следы всех релятивистских фрагментов остаются достаточно долго в одном слое для 3-мерной реконструкции их углов эмиссии. Подложка обеспечивает «жесткость» следов, а ее отсутствие позволяет более долгое их прослеживание, включая переходы в соседние слои. Факторами получения значительной статистики событий служат толщина стопки и полный телесный угол детектирования. В ЯЭ содержатся в близких концентрациях атомы Ag и Br и CNO, а также в трехкратно большем числе H. По плотности водорода материал ЯЭ близок к жидководородной мишени. Эта особенность позволяет сравнивать в одинаковых условиях развалы ядерснарядов как в результате дифракционной или электромагнитной диссоциации на тяжелом ядре-мишени, так и в результате столкновений с протонами.

Поиск в ЯЭ ядерных взаимодействий без выборки (или метод «по следу»), обеспечивает достаточно равномерную эффективность обнаружения всех возможных типов взаимодействий и позволяет определить длину свободного пробега для определенного типа взаимодействия. Этот метод реализуется в прослеживании пучковых треков исследуемых ядер от места входа в эмульсионный слой до взаимодействия либо до выхода следа из данного слоя ЯЭ. Будучи достаточно трудоемким, он обеспечивает

наилучшее качество и систематичность просмотра. Статистика в несколько сотен периферических взаимодействий с определенными конфигурациями релятивистских фрагментов достижима при поперечном сканировании.

Релятивистские фрагменты сосредоточены в конусе $\sin\theta_{fr} = p_{fr}/P_0$, где $p_{fr} = 0.2$ ГэВ/с – величина, характеризующая Ферми-импульс нуклонов в ядре-снаряде, а P_0 – его импульс на нуклон. Заряды релятивистских фрагментов $Z_{fr} = 1$ и 2 , наиболее важных в проблеме нестабильных состояний, определяются визуально благодаря явной разнице в ионизации. Заряды $Z_{fr} \geq 3$ определяются по плотности разрывов на следах или плотности δ электронов. Условием отбора периферических взаимодействий является сохранение релятивистскими фрагментами заряда ядер пучка Z_{pr} , т. е. $Z_{pr} = \sum Z_{fr}$. Такие взаимодействия составляют несколько процентов от числа неупругих взаимодействий.

При измерительной базе 1 мм разрешение для следов релятивистских фрагментов не хуже 10^{-3} рад. Поперечный импульс P_T фрагмента с массовым числом A_{fr} определяется как $P_T \approx A_{fr}P_0\sin\theta$ в приближении сохранения им скорости первичного ядра (или P_0). Во фрагментации ядер, составляющих ЯЭ, могут наблюдаться b -частицы (α -частицы и протоны с энергией ниже 26 МэВ), g -частицы (протоны с энергией свыше 26 МэВ), а также s -частицы (рожденные мезоны). Наиболее периферические взаимодействия, именуемые когерентной диссоциацией или “белыми” звездами, не сопровождаются фрагментацией ядер мишени и рождением мезонов (s -частиц). Доступны фотографии и видеозаписи характерных взаимодействий [16,28].

Массовые числа A_{fr} релятивистских фрагментов Н и Не определяются как $A_{fr} = P_{fr}\beta_{fr}c/(P_0\beta_0c)$, где P_0 – полный импульс, а β_0c – скорость. Величина $P\beta c$ извлекается из среднего угла кулоновского рассеяния, оцениваемого по смещениям следа в ЯЭ на длинах 2–5 см. Для достижения требуемой точности необходимо измерить смещения не менее чем в 100 точках. Применение этого метода оправдывается в важных случаях для ограниченного числа следов. Полный импульс может быть измерен от 2 до 50 ГэВ/с. Энергия 10 А ГэВ является предельной для идентификации ${}^4\text{He}$.

Присвоение массовых чисел трекам фрагментов Н и Не возможно по суммарным значениям импульса, полученным из среднего угла кулоновского рассеяния. Использование этого трудоемкого метода оправдано в особых случаях для ограниченного числа следов. В случае диссоциации стабильных ядер достаточно предположить соответствие Не - ${}^4\text{He}$ и Н - ${}^1\text{H}$, поскольку установленные вклады ${}^3\text{He}$ и ${}^2\text{H}$ не превышают 10%. Это упрощение особенно верно в случае чрезвычайно узких распадов ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ [6].

Инвариантная масса системы релятивистских фрагментов определяется как сумма всех произведений 4-импульсов $P_{i,k}$ фрагментов $M^{*2} = \sum(P_i \cdot P_k)$. Вычитание массы

начального ядра или суммы масс фрагментов $Q = M^* - M$ является вопросом удобства представления. Компоненты $P_{i,k}$ определяются в приближении сохранения фрагментами начального импульса на нуклон. Реконструкция по инвариантной массе распадов релятивистских нестабильных ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}$, освоенная в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ, подтвердила справедливость этого приближения.

Наиболее точные измерения углов обеспечиваются на микроскопах KSM-1 (Карл Цейсс, Иена) при применении координатного метода. Измерения проводятся в декартовой системе координат. Слой ЯЭ разворачивается таким образом, чтобы направление анализируемого первичного следа совпадало с осью OX столика микроскопа с отклонением до 0.1 - 0.2 мкм на 1 мм длины трека. Тогда ось OX системы совпадает с направлением проекции первичного следа на плоскость слоя, а ось OY на ней перпендикулярна первичному следу. Ось OZ перпендикулярна к плоскости слоя. По OX и OY измерения производятся микровинтами горизонтального перемещения, а по OZ – микровинтом глубины резкости. Координаты измеряются на первичных и вторичных следах на длинах от 1 до 4 мм с шагом 100 мкм, по линейной аппроксимации которых вычисляются углы. Подробности и иллюстрации измерений на плоскости слоя и его глубине недавно опубликованы [20].

Стоит отметить ценность ЯЭ в образовательном и практическом плане, основанную на наглядности и достоверности наблюдения. В поперечно облученном слое возможен компьютерный счет профиля пучка ионов и определение его зарядового состава по размерам пятен. Программа ImageJ (<https://imagej.nih.gov/>), широко используемая для распознавания объектов на оцифрованных изображениях, применялась для массированного определения направлений входа ионов и их пробега в ЯЭ [29]. Анализируемые облучения выполнялись на циклотронах ИЦ-100 и У-400М Лаборатории ядерных реакций имени Г. Н. Флерова. Подобный опыт был получен на нуклотроне при облучении релятивистскими ядрами Хе с энергией 1 А ГэВ. В декабре 2018 слои ЯЭ продольно облучались в эксперименте NA61 в пучке вторичных ядер с отношением веса к заряду равном 2. Этот пучок формировался путем фрагментации ядер Pb, ускоренных на SPS ЦЕРН до энергии 13 А ГэВ. Кроме того, слои ЯЭ облучались на большой поперечной площади за установкой NA61, что позволило определить область выхода пучка, а также область концентрации релятивистских нейтронов, рожденных при фрагментации ядер на мишени.

Таким образом, продольно и поперечно облученные слои ЯЭ могут применяться для офф-лайн диагностики пучков НИКА, начиная с инжектора.

2.1.2 Идентификация ${}^8\text{Be}$

Во фрагментации релятивистских ядер в ЯЭ достаточно часто наблюдаются интенсивные следы, которые при прослеживании постепенно раздваиваются на пары следов ядер He с минимальными углами разлета, приписываемые распадам ${}^8\text{Be}$. Очевидно, что такое определение неудобно при сравнении данных, полученных при отличающихся значениях первичной энергии. Универсальная идентификация ${}^8\text{Be}$ по инвариантной массе 2α -пар – первый “ключ” к проблеме нестабильных ядерных состояний.

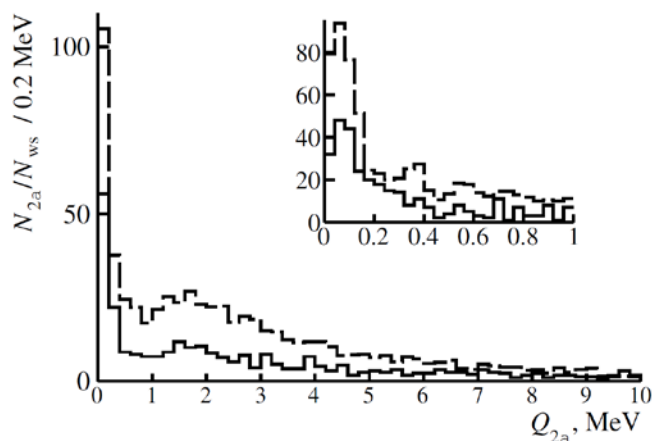


Рис. 1. Распределение числа 2α -пар $N_{2\alpha}$ по инвариантной массе $Q_{2\alpha}$ в когерентной диссоциации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (сплошная) и ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ (пунктир) при 3.65 A ГэВ ; на вставке увеличенная часть $Q_{2\alpha} < 1 \text{ МэВ}$ (шаг 40 кэВ); гистограммы нормированы на числа “белых” звезд N_{ws} .

Распределение по $Q_{2\alpha}$ представлено на рис. 1 для когерентной диссоциации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ при энергии 3.65 A ГэВ . В случае ${}^{12}\text{C}$ использованы измерения полярных и азимутальных углов α -частиц в 316 “белых” звезд, выполненные в 90-е гг группами Г. М. Чернова (Ташкент) [30] и А. Ш. Гайтинова (Алма-Ата) и дополненные недавно группами ФИАН и ОИЯИ. В случае ${}^{16}\text{O}$ доступны схожие данные для 641 “белой” звезды [31]. Для этих событий рис. 1 представлены распределения инвариантной массе в области $Q_{2\alpha} < 10 \text{ МэВ}$ всех комбинаций 2α -пар $N_{2\alpha}$, нормированные на соответствующее число “белых” звезд N_{ws} . На вставке рис. 1 эти данные приведены в области $Q_{2\alpha} < 0.5 \text{ МэВ}$ в увеличенном виде. Хотя в обоих случаях имеются пики, отвечающие ${}^8\text{Be}$, однако, из-за наличия “хвостов”, обусловленных отражениями $(3-4)\alpha$ -возбуждений условие отбора $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be})$ определено недостаточно.

Угловые измерения диссоциации ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ при 1.2 A ГэВ (обзор [15]) позволяют уточнить условие отбора ${}^8\text{Be}$ по инвариантной массе $Q_{2\alpha}$. Распределение по $Q_{2\alpha}$ 500 2α -пар, в том числе 198 “белых”, представленное на рис. 2, указывает на ограничение $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) \leq 0.2 \text{ МэВ}$. Имеются два “наплыва” вокруг значений $Q_{2\alpha}$ равных 0.6 и 3 МэВ . Первый отражает возбуждение ${}^9\text{Be}$ при 2.43 МэВ [11,32], а второй – состояние ${}^8\text{Be} 2^+$ [11].

Условие $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be})$ учитывает принятое приближение, кинематический эллипс распада ${}^8\text{Be}$ и разрешение угловых измерений. Его применение позволяет определить вклад распадов ${}^8\text{Be}$ в статистику “белых” звезд равным $45 \pm 4\%$ для ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и $62 \pm 3\%$ для ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$. Аналогичный отбор ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ при 0.42 A ГэВ дает $53 \pm 11\%$ [20]. Можно отметить, что условие $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) \leq 0.2 \text{ МэВ}$ совпадает с принятыми в электронных экспериментах [23-25,32].

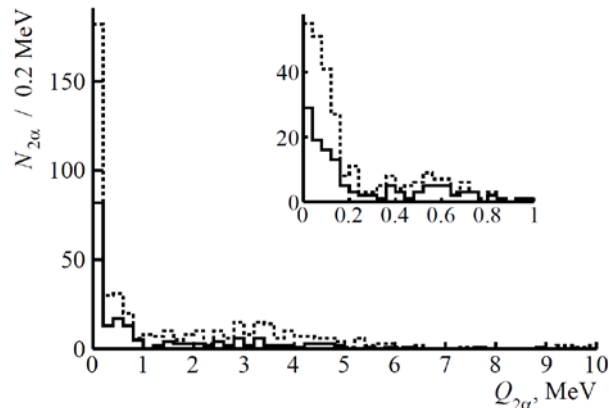


Рис. 2. Распределение числа 2α -пар $N_{2\alpha}$ по инвариантной массе $Q_{2\alpha}$ в 500 событиях диссоциации ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ (пунктир) при 1.2 A ГэВ и в 198 “белых” звездах из их числа (сплошная); на вставке увеличенная часть $Q_{2\alpha} < 1 \text{ МэВ}$.

Для оценки границ допущений при идентификации ${}^8\text{Be}$, связанных с приписыванием фрагментам He массового числа $A = 4$ и соответствующего импульса, проведено моделирование фрагментации ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He} + n$ в Geant4 [33] в рамках модели QMD [34] для 10^4 ядер ${}^9\text{Be}$ с энергией около 1.2 A ГэВ ($\sigma = 100 \text{ МэВ}$ в распределении Гаусса). Было получено 466 взаимодействий ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He} + n$, среди которых 59 пар ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ и 4 – ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$. Величина среднего импульса на нуклон фрагментов ${}^4\text{He}$ составила $1915 \text{ МэВ}/c$ при RMS $32 \text{ МэВ}/c$. В распределении $Q_{2\alpha}$ примерно $2/3$ событий фрагментации ${}^9\text{Be}$ отвечают образованию ${}^8\text{Be} 0^+$. Среднее значение относительной разности импульсов в парах ${}^4\text{He}$ при $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) - 0.8\%$, а вклад пар с участием ${}^3\text{He}$ в $Q_{2\alpha} \leq 0.2 \text{ МэВ}$ менее 2%. Все эти факты указывают на обоснованность сделанных предположений и достаточности прецизионных измерений углов. Более того, моделирование указывает на то, что включение импульсов для определения $Q_{2\alpha}$ имело бы смысл при точности их измерений порядка десятых процента при сохранении того же углового разрешения. Действительно, согласно данным водородной пузырьковой камеры имеется пик ${}^8\text{Be}$ в распределении по углу разлета [6], а, значит, и в $Q_{2\alpha}$. Включение в вычисление $Q_{2\alpha}$ импульсов, точность измерения которых оценивается в 1.5% на длине 40 см жидкого водорода, ведет к «рассыпанию» пика. Несомненно, что применение импульсного анализа ведет и к дополнительному

ухудшению и углового разрешения. Этот вывод стоит учитывать при планировании электронных версий подобных исследований.

2.1.3 Идентификация ${}^9\text{B}$

Следующий “ключ” в изучении нестабильных состояний – ядро ${}^9\text{B}$. При изучении когерентной диссоциации изотопа ${}^{10}\text{C}$ при энергии 1.2 А ГэВ канал диссоциации $2\text{He} + 2\text{H}$ проявился как лидирующий (обзор [15]). Статистика четверок $2\text{He} + 2\text{H}$ в нем составила 186 или 82% наблюдавшихся “белых” звезд. Распределение по инвариантной массе $2\alpha\text{p}$ -троек $Q_{2\alpha\text{p}}$, представленное на рис. 3, указывает на число распадов $N({}^9\text{B}) = 54$, удовлетворяющих условию $Q_{2\alpha\text{p}}({}^9\text{B}) < 0.5$ МэВ, что составляет $30 \pm 4\%$ событий $2\text{He} + 2\text{H}$. Во всех этих $2\alpha\text{p}$ -тройках и только в них согласно условию $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) < 0.2$ МэВ идентифицированы также распады ${}^8\text{Be}$. Этот факт указывает на доминирование последовательности ${}^9\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + p$ и ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$. Обильное образование ядер ${}^9\text{B}$ в диссоциации ${}^{10}\text{C}$ указывает на его важную роль в качестве структурной основы этого изотопа.

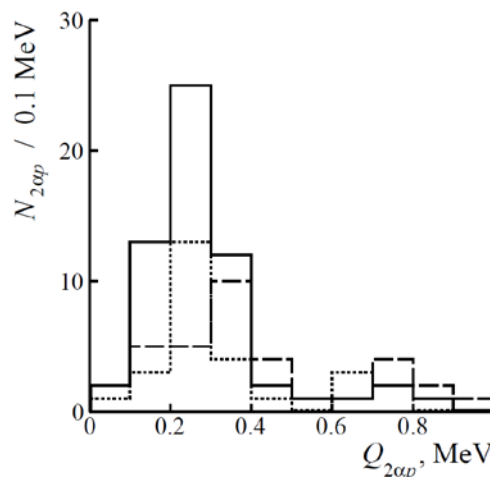


Рис. 3. Распределение числа $2\alpha\text{p}$ -троек $N_{2\alpha\text{p}}$ по инвариантной массе $Q_{2\alpha\text{p}} (< 1 \text{ МэВ})$ в событиях когерентной диссоциации ${}^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He}2\text{H}$ (сплошная) и диссоциации ${}^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He}2\text{H}$ (точки) и ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{HeH}$ (пунктир).

Уверенная идентификация ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$, в основе которой нуклонный состав ${}^{10}\text{C}$, позволяет обратиться к их вкладу в диссоциацию ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{C}$. Были выполнены угловые измерения в 318 событиях диссоциации ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$ при 1.0 А ГэВ, среди которых идентифицированы 20 распадов ${}^9\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + p$ удовлетворяющих условию $Q_{2\alpha\text{p}}({}^9\text{B}) < 0.5$ МэВ (рис. 3). Аналогично, в 154 событиях ${}^{11}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ при 1.2 А ГэВ найдено $N({}^9\text{B}) = 22$ (рис. 3). Таким образом, в диссоциации ${}^{10}\text{C}$, ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{C}$ установлено универсальное условие $Q_{2\alpha\text{p}}({}^9\text{B})$. Кроме того, при идентификации распадов ${}^9\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + p$ критерий $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be})$ подтвердился в наиболее чистых условиях.

2.1.4 Идентификация состояния Хойла

Используя угловые измерения “белых” звезд $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$, метод инвариантной массы несложно распространить на идентификацию релятивистских распадов состояния Хойла. В последнем случае распады HS могут проявиться в диссоциации $^{16}\text{O} \rightarrow ^{12}\text{C}^* (\rightarrow 3\alpha) + \alpha$. Оба распределения по инвариантной массе 3α -троек $Q_{3\alpha}$, представленные на рис. 4, демонстрируют сходство. Их основные части, в области $Q_{3\alpha} < 10$ МэВ, охватывающей α -частичных возбуждения ^{12}C до порога отделения нуклонов, описываются распределением Рэля с параметрами $\sigma_{Q_{3\alpha}}(^{12}\text{C}) = 3.9 \pm 0.4$ МэВ и $\sigma_{Q_{3\alpha}}(^{16}\text{O}) = 3.8 \pm 0.2$ МэВ.

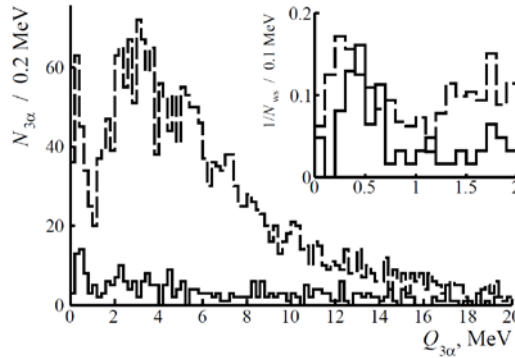


Рис. 4. Распределение числа 3α -троек $N_{3\alpha}$ по инвариантной массе $Q_{3\alpha}$ в 316 “белых” звезд $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (сплошная) и 641 “белой” звезде $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ (пунктир) при 3.65 А ГэВ; на вставке увеличенный часть $Q_{3\alpha} < 2$ МэВ нормированная на числа “белых” звезд N_{ws} .

В обоих случаях наблюдаются пики распределений в области $Q_{3\alpha} < 0.7$ МэВ, где ожидается сигнал HS. Статистика в пиках за вычетом фона составила $N_{\text{HS}}(^{12}\text{C}) = 37$ со средним значением $\langle Q_{3\alpha} \rangle$ (RMS) = 417 ± 27 (165) кэВ and $N_{\text{HS}}(^{16}\text{O}) = 139$ с $\langle Q_{3\alpha} \rangle$ (RMS) = 349 ± 14 (174) кэВ. На этой основе вклад распада HS в когерентную диссоциацию $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ составляет $11 \pm 3\%$, а случае $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ - $22 \pm 2\%$. Увеличение 3α -комбинаций в $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ приводит к заметному росту вклада распадов HS. Вместе с тем, отношение выходов ^8Be и HS проявляет приблизительное постоянство $N_{\text{HS}}(^{12}\text{C})/N_{8\text{Be}}(^{12}\text{C}) = 0.26 \pm 0.06$ и $N_{\text{HS}}(^{16}\text{O})/N_{8\text{Be}}(^{16}\text{O}) = 0.35 \pm 0.04$.

Существует возможность возникновения HS через α -распад возбуждения 0^+_6 ядра ^{16}O . Распределение “белых” звезд $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ по инвариантной массе 4α -квартетов $Q_{4\alpha}$ (рис. 5) в основной части описывается распределением Рэля с параметром $\sigma_{Q_{4\alpha}} = (6.1 \pm 0.2)$ МэВ. Условие на присутствие в 4α -событии (αHS) хотя бы одной 3α -тройки с $Q_{3\alpha}(\text{HS}) < 700$ кэВ смещает распределение по $Q_{4\alpha}$ в низкоэнергетическую сторону, а значение параметра к $\sigma_{Q_{4\alpha}} = 4.5 \pm 0.5$ МэВ (рис. 5). Увеличенный вид распределения по $Q_{4\alpha}$,

представленный на вставке рис. 5, указывает на 9 событий, удовлетворяющих $Q_{4\alpha} < 1$ МэВ и имеющих среднее значение $\langle Q_{4\alpha} \rangle$ (RMS) = 624 ± 84 (252) кэВ. Тогда оценка вклада распадов $^{16}\text{O}(0^+_6) \rightarrow \alpha + \text{HS}$ составляет $1.4 \pm 0.5\%$ при нормировке на $N_{\text{ws}}(^{16}\text{O})$ и $7 \pm 2\%$ при нормировке на $N_{\text{HS}}(^{16}\text{O})$.

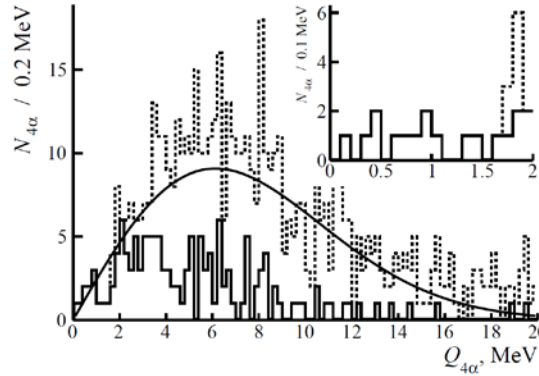


Рис. 5. Распределения по инвариантной массе $Q_{4\alpha}$ в 641 "белой" звезде $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ при 3.65 А ГэВ всех 4α -квартетов (точки) и событий αHS (сплошная); плавная линия - распределение Рэля; на вставке увеличенная часть $Q_{4\alpha} < 2$ MeV.

Идентифицированы 33 события $^{16}\text{O} \rightarrow 2^8\text{Be}$, что составляет $5 \pm 1\%$ "белых" звезд $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$. Тогда статистика когерентной диссоциации по каналам $^{16}\text{O} \rightarrow 2^8\text{Be}$ и $^{16}\text{O} \rightarrow \alpha\text{HS}$ имеет отношение 0.22 ± 0.02 . Распределение по инвариантной массе $Q_{4\alpha}$ событий $^{16}\text{O} \rightarrow 2^8\text{Be}$, представленное на рис. 6, указывает на два кандидата $^{16}\text{O}(0^+_6) \rightarrow 2^8\text{Be}$ в области $Q_{4\alpha} < 1.0$ МэВ. Таким образом, оценка отношения вероятности каналов $^{16}\text{O}(0^+_6) \rightarrow 2^8\text{Be}$ и $^{16}\text{O}(0^+_6) \rightarrow \alpha\text{HS}$ составляет 0.22 ± 0.17 .

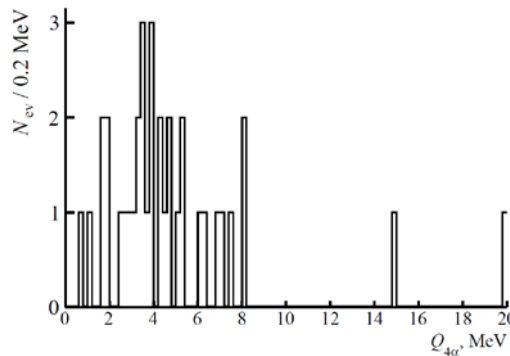


Рис. 6. Распределение событий $^{16}\text{O} \rightarrow 2^8\text{Be}$ по инвариантной массе $Q_{4\alpha}$.

Можно заключить, что хотя при образовании HS доминирует прямая диссоциация, поиск его 4α "предшественника" возможен в релятивистской диссоциации ядер. Вместе с тем наращивание статистики событий $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ традиционным способом можно считать исчерпанным. Остается возможность изучения (3-4) α -ансамблей во фрагментации более тяжелых ядер.

2.1.5 Поиск нестабильных состояний во фрагментации ядер Si и Au

Доступны данные сотрудничества EMU по 1093 взаимодействиям ядер ^{28}Si при 14.6 А ГэВ [35] и 1316 ^{197}Au при 10.7 А ГэВ [36], содержащим измерения углов испускания релятивистских фрагментов. Тогда поиск событий велся по первичным следам без выборки. Число событий с множественностью релятивистских α -частиц $N_\alpha > 2$ в случае Si составило 118, а Au – 843. Недавно возобновлен поиск событий взаимодействий $N_\alpha > 2$ Si сканированием по полосам поперек направления входа первичных следов. Измерения углов ограничиваются конусом 2° . Тем самым радикально ускорен анализ в интересующей области малых инвариантных масс. В сравнительно короткое время к статистике Si добавлено 133 событий $N_\alpha > 2$. Распределения по инвариантным массам $Q_{2\alpha}$, $Q_{2\alpha p}$, $Q_{3\alpha}$ и $Q_{4\alpha}$ в областях малых значений, полученные на основе этих данных, представлены на рис. 7 и 8. Согласно описанным выше критериям по ним определены числа ^8Be ($N_{8\text{Be}}$), ^9B ($N_{9\text{B}}$) и HS (N_{HS}).

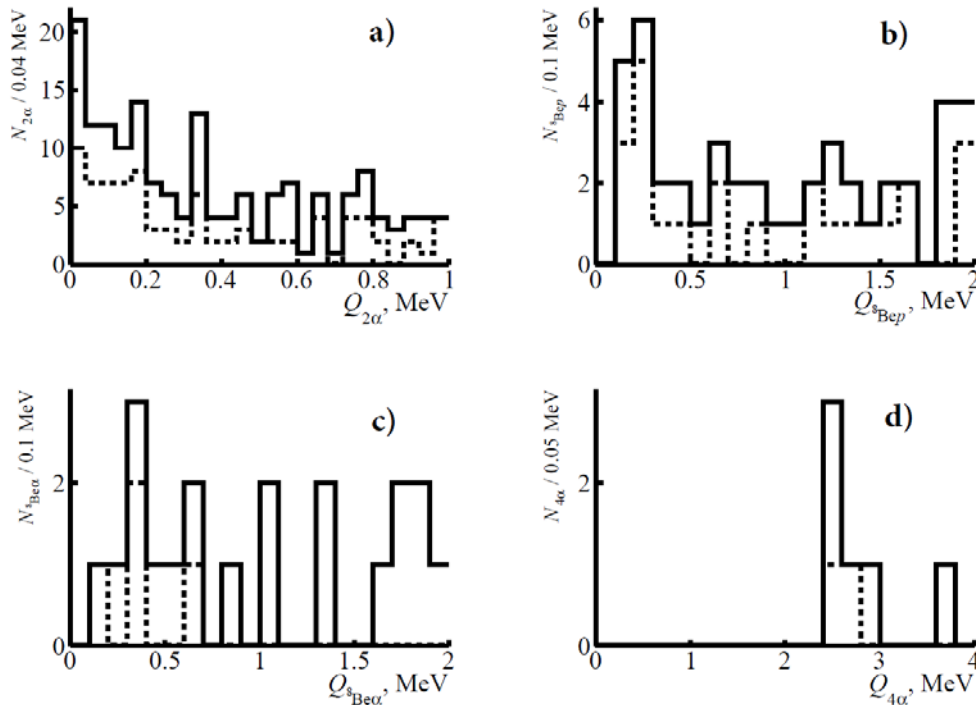


Рис. 7. Распределения всех комбинаций 2α , $2\alpha p$, 3α и 4α из событий фрагментации ядер ^{28}Si при 14.6 А ГэВ по инвариантным массам $Q_{2\alpha}$ (a), $Q_{2\alpha p}$ (b), $Q_{3\alpha}$ (c) и $Q_{4\alpha}$ (d) в областях их малых значений по данным без выборки (точки) и недавним измерениям при ускоренном поиске (добавлено, сплошная линия).

Для взаимодействий ядер Si найдено $N_{8\text{Be}} = 52$; $N_{9\text{B}} = 8$ с $\langle Q_{2\alpha p} \rangle$ (RMS) = 246 ± 30 (99) кэВ; $N_{\text{HS}} = 9$ с $\langle Q_{3\alpha} \rangle$ (RMS) = 405 ± 53 (160) кэВ при $N_\alpha = 3(3)$, $4(3)$, $5(2)$ и $6(1)$. $N_{\text{HS}}/N_{8\text{Be}} = 0.17 \pm 0.04$ при $N_\alpha > 2$. 4α -квартеты отсутствуют до $Q_{4\alpha} < 2.5$ МэВ.

При аналогичном анализе взаимодействий ^{197}Au получено $N_{8\text{Be}} = 160$; $N_{9\text{B}} = 40$ и $\langle Q_{2\alpha p} \rangle$ (RMS) = 328 ± 16 (116) кэВ; $N_{\text{HS}} = 12$ с $\langle Q_{3\alpha} \rangle$ (RMS) = 435 ± 29 (106) кэВ при $N_\alpha =$

4(2), 6(2), 7(2), 8(2), 9(1), 11 (1) и 16 (1). $N_{HS}/N_{8Be} = 0.08 \pm 0.01$ при $N_\alpha > 2$. Имеется один 4α -квартет, включающим HS с $Q_{4\alpha} = 1$ МэВ при $N_\alpha = 16$. В 11 событиях идентифицировано парное образование ${}^8\text{Be}$.

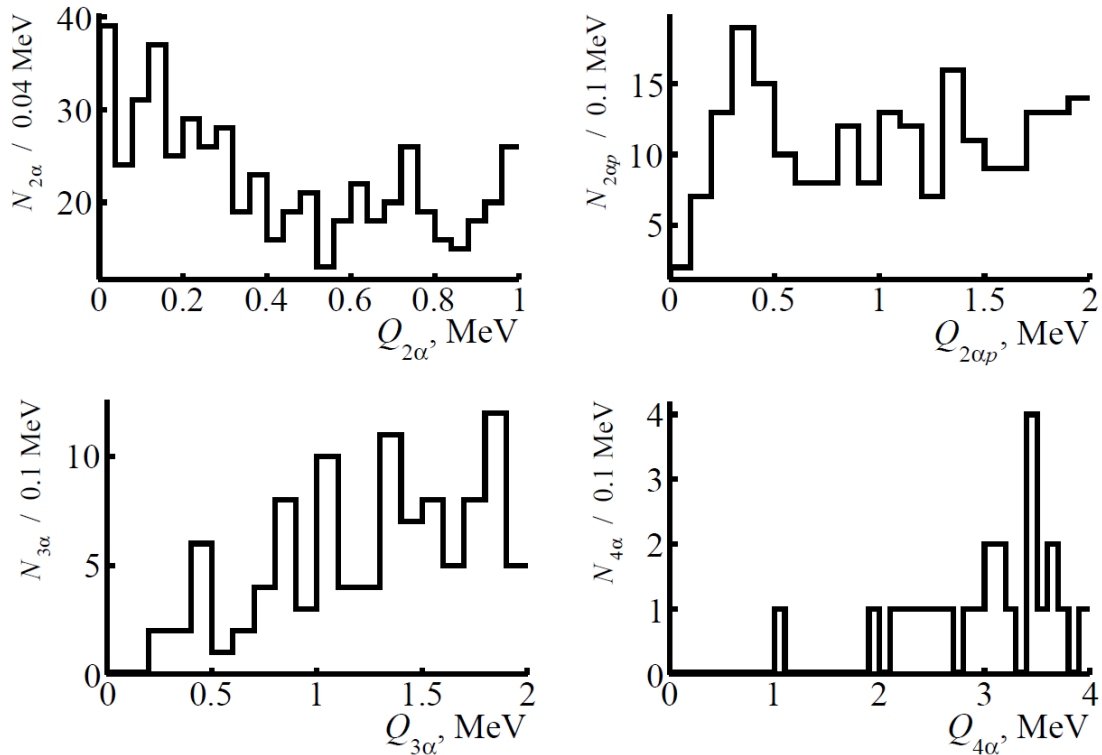


Рис. 8. Распределения всех комбинаций 2α , $2\alpha p$, 3α и 4α из событий фрагментации ядер ${}^{197}\text{Au}$ при 10.7 A ГэВ по инвариантным массам $Q_{2\alpha}$ (a), $Q_{2\alpha p}$ (b), $Q_{3\alpha}$ (c) и $Q_{4\alpha}$ (d) в областях из малых значений.

В предположении степенной зависимости от заряда родительского ядра Z , которым определяется рождение α -частиц, выход ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}$ растет примерно как $Z^{0.8}$. Такое поведение близко к зависимости объемного типа. Отношение этих выходов примерно $N_{HS} \approx 0.08$. Статистика 3α -троек N_{HS} мала для оценок.

Можно заключить, что в обоих случаях идентифицированы распады ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}$ и получены указания на образование HS, а в случае Au обнаружен один кандидат на 4α -распад из ${}^{16}\text{O}(0^+_6)$. Благодаря тому, что измерения сделаны без выборки, они позволяют планировать поиски нестабильных состояний. Набор статистики событий $N_\alpha > 2$ будет значительно ускорен при поперечном сканировании.

2.1.6 Перспективные задачи

Полученные результаты позволяют оценить перспективы представленного подхода в современных проблемах ядерной физики. Среди важнейших из них – проверка теоретических представлений о материи, возникающей в результате соединения нуклонов в кластеры, не имеющие возбужденных состояний до порога связи. Это легчайшие ядра

${}^4\text{He}$ (α -частицы), а также дейтроны (d), тритоны (t) и ядра ${}^3\text{He}$ или *гелионы* (h) [37]. Предсказана эволюция состава легчайших изотопов при ядерной плотности менее нормальной и температуре несколько МэВ. Прохождение через такую фазу может оказаться необходимым на пути синтеза тяжелых ядер. Взгляд на диссоциацию релятивистских ядер с обращением времени косвенно указывает на реализуемость такого перехода.

Уже два десятилетия развиваются теоретические концепции о разреженной барионной материи, возникающей в результате кластеризации нуклонов в легчайшие ядра в условиях предельно низкой ядерной плотности и температуры. Как аналог атомных квантовых газов рассматривается α -частичный конденсат Бозе-Эйнштейна. Эти разработки выдвигают проблему изучения разнообразных кластерных ансамблей и несвязанных ядер как фундаментальных компонент новых квантовых сред. В астрофизическом масштабе это короткоживущее состояние может служить необходимым этапом на пути синтеза самых тяжелых ядер. Активное развитие теории в этом направлении за последние два десятилетия прослеживается по работам С.Ж. Horowitz, G. Röpke, P. Schuck, A. S. Botvina, I. N. Mishustin и их соавторов. Кластеризация ядер традиционно рассматривается как прерогатива физики ядерных реакций низких энергий.

В системе отсчета родительского ядра распределения легчайших фрагментов по энергии охватывает температурный диапазон 10^8 - 10^{10} К, отвечая фазам от красного гиганта до сверхновой. В диссоциации тяжелых ядер доступно беспрецедентное разнообразие когерентных ансамблей легчайших ядер и нуклонов. Представленные здесь наблюдения нестабильных состояний обосновывают возможность изучения кластерной материи вплоть до нижнего предела ядерной температуры и плотности. Идентификации изотопов ${}^{1,2,3}\text{H}$ и ${}^{3,4}\text{He}$ методом многократного рассеяния позволяет расширить анализ кластерных состояний в направлении свойств разреженной материи. По углам эмиссии определяются поперечные импульсы фрагментов, что позволяет выделить температурные компоненты. Практическая реализуемость детального изучения релятивистских кластерных струй может служить мотивацией для оценки применимости релятивистского подхода к проблеме существования холодной и разреженной ядерной материи.

В релятивистской диссоциации тяжелых ядер происходит образование легких фрагментов с большим отношением заряда к массовому числу, чем у первичного ядра, обуславливая возникновение ассоциированных нейтронов, которые проявляют себя по вторичным звездам. Частота таких «нейтронных» звезд должна расти с ростом числа легчайших ядер в конусе фрагментации. Средний пробег нейтронов в ЯЭ около 32 см. Достигая десятков, множественность нейтронов в событии может быть оценена по

пропорциональному уменьшению среднего пробега до образования «нейтронных» звезд на длинах порядка нескольких сантиметров. Точность определения координаты их вершины позволяет восстановить углы эмиссии нейтронов, а, значит, и поперечные импульсы в приближении сохранения начальной скорости. Таким образом, возможно исследования эффектов нейтронной “шубы”. Оценка выхода нейтронов, а также дейтронов и тритонов, связывающих нейтроны, может иметь прикладное значение.

Остается не проясненным, почему периферической диссоциации ядер отвечает достаточно большое сечение и широкое распределение по множественности фрагментов. В основе этого явления может лежать переход виртуальных фотонов, которыми обмениваются ядра пучка и мишени, в пары виртуальных мезонов. Критичным тестом может служить фрагментация ядер из состава ЯЭ под действием релятивистских мюонов [38-40]. Комбинация, представленная на рис. 9 обеспечивает дальное действие при эффективном разрушении ядер и может быть распространена на периферические взаимодействия релятивистских ядер. Установлено, что фрагментации ядер мишени под действием мюонов наиболее вероятны для развала $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$. В этих событиях по пробегам определяются энергия и углы эмиссии α -частиц, позволяя получить распределения по инвариантной массе, а также по полному импульсу пар и троек α -частиц. Предварительно установлено, что распределению по полному поперечному импульсу троек α -частиц отвечает не электромагнитная, а ядерная дифракция. Отметим, что сечения 3α -расщепления имеет значение для геофизики, поскольку позволит проверить гипотезу о

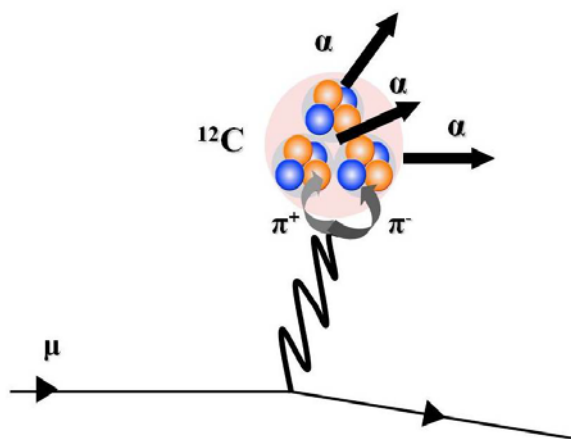


Рис. 9. Диаграмма развала ядра ^{12}C на три α -частицы релятивистским мюоном.

2.1.7 Обновление микроскопов и технологии ЯЭ

Проект направлен на интенсификацию в применении апробированного подхода на основе автоматизации измерений, обеспечиваемой микроскопами современного уровня.

Однако, такие микроскопы являются весьма дорогостоящими. В этом аспекте состоит основной запрос бюджета проекта.



Рис. 10. Микроскопы KSM (слева) и МПЭ-11.

Координатные измерения в ЯЭ ведутся на трех прецизионных микроскопах KSM, произведенных полвека назад Carl Zeiss, Jena. Благодаря квалифицированному обслуживанию, эти уникальные приборы находятся в рабочем состоянии. Такие микроскопы имеются в Каире, Бухаресте и Праге. Назрела необходимость их модернизации в части автоматического считывания трех измеряемых координат. Эта разработка ведется в Отделе радиационной дозиметрии (Прага) по проекту «Ядерная эмульсия в прикладных задачах» (Проект Беккерель) в рамках программы сотрудничества ОИЯИ-Чешская республика (рис. 10). Ее стоимость составляет около 5000 \$, Тиражирование этого изделия требует первоочередного финансирования.

Кроме того, имеется практически не эксплуатировавшийся микроскоп МПЭ-11 (рис. 10), спроектированный для работы на линии с компьютером, установки видеокамеры и управлением джойстиком. Его модернизация позволит резко увеличить темп измерений. Такое решение используется коллегами в двух группах ФИАН. Стоимость интерфейса составляет около 10 тыс. долл. Важно подчеркнуть, что модернизация позволит сохранить непрерывность измерений, обучать новичков без риска серьезных поломок, а также использовать аппаратные и программные новшества, разрабатываемые студентами и аспирантами.

Вместе с тем, поставленные фундаментальные задачи и накопленная методическая культура заслуживают обновления на основе моторизованного микроскопа ВХ63 фирмы Олимпус. Такой прибор может быть средством коллективного использования. Его ориентировочная цена – 80000 \$. Для работы на столь совершенном приборе необходима подготовка нового поколения исследователей. На рис. 11 представлена фотография этого микроскопа, работающего в Институте эндокринологии (г. Москва). Под объективом установлен слой ЯЭ на стекле, который продольно облучен ядрами криптона. На монитор

выведена часть изображения 1 мм маркировочной сетки, нанесенной на слой ЯЭ. На экране виден горизонтально ориентированный след ядра криптона и фрагменты, порожденные им. На микроскопе ВХ63 возможен автоматический поиск вершин периферической диссоциации по эффекту срыва ионизации («ступеньке»). Смена объектива делается поворотом револьвера в ту же точку без вмешательства оператора. Дальнейшие измерения координат делаются автоматически при визуальном прослеживании следов фрагментов.

Новые облучения предполагают приобретение слоев ЯЭ и модернизацию химической лаборатории, в которой они проявляются. Планируемые расходы на материалы и лабораторные приборы 10000 \$ в год.

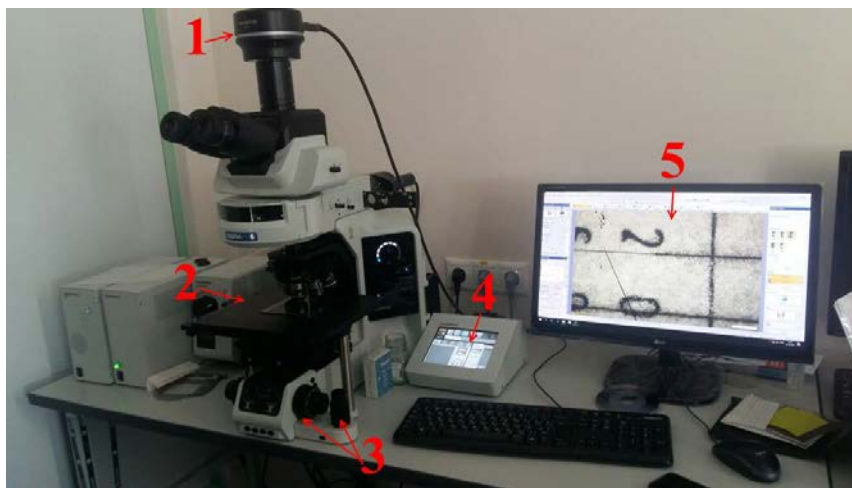


Рис. 11. Микроскоп ВХ63. Отмечены: 1) цифровая камера DP74, 2) моторизованный предметный столик, 3) джойстики управления фокусом и перемещением предметного столика в плоскости ХОУ, 4) блок управления микроскопом, 5) ПК для работы с получаемым изображением.

2.1.8 Заключение

Сохранившиеся и недавно полученные данные по взаимодействиям легких релятивистских ядер в ядерной эмульсии позволили установить вклад в их диссоциацию нестабильных ядер ^8Be и ^9B и состояния Хойла, а также оценить перспективы подобных исследований в отношении средних и тяжелых ядер. Эти три состояния единообразно идентифицируются по инвариантным массам, которые вычисляются по измеренным углам испускания фрагментов He и H в предположении сохранения импульса на нуклон первичного ядра.

Отбор ^8Be в диссоциации изотопов ^9Be , ^{10}B , ^{10}C и ^{11}C определяется ограничением на вычисленное значение инвариантной массы 2α -пар до 0.2 МэВ, а ^9B 2α -троек до 0.5 МэВ. Определенность в идентификации ^8Be и ^9B стала основанием для поиска распадов из

состояния Хойла в диссоциации $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$. В последнем случае было установлено ограничение инвариантной массы 3α -троек до 0.7 МэВ. Выбор этих трех условий как “отсечек сверху” достаточен, поскольку значения энергии распада этих трех состояний заметно меньше ближайших возбуждений с тем же нуклонным составом, а отражение более сложных возбуждений невелико для этих ядер.

Будучи апробирован при изучении легких ядер, подобный отбор применим к диссоциации более тяжелых ядер для поиска более сложных состояний. В свою очередь продуктами α -частичного или протонного распада этих состояний могли бы служить состояние Хойла или ^9B , и, затем, ^8Be . Возможен вариант распада с возникновением более одного состояния из этой тройки. Начальным этапом поисков в любом случае должен служить отбор событий, содержащих релятивистские распады ^8Be .

Десятки распадов ^8Be и ^9B идентифицированы в конусе релятивистской фрагментации ядер Si и Au. В то же время число 3α -троек, относимых к распадам состояния Хойла, составляет единицы, что требует наращивания статистики до современного эквивалента ^8Be . Тогда станет осуществим поиск возбужденного состояния $^{16}\text{O}(0^+_6)$. На этом пути нет принципиальных проблем, поскольку имеется достаточное количество ранее облученных слоев ЯЭ, при поперечном сканировании которых требуемая статистика α -ансамблей достижима. Весь этот комплекс проблем, объединенных вопросами идентификации нестабильных состояний, находится в фокусе эксперимента БЕККЕРЕЛЬ-2020 в настоящее время.

Стоит надеяться, что быстрый прогресс анализа изображений позволит придать совершенно новый размах использованию метода ЯЭ при исследовании ядерной структуры в релятивистском подходе. Решение поставленных задач требует инвестиций в современные автоматизированные микроскопы и воссоздание на современном уровне технологии ЯЭ. Вместе с тем, такое развитие будет базироваться на классическом методе ЯЭ, основы которого были заложены семь десятилетий тому назад в физике космических лучей.

2.2 Список литературы

1. C.F. Powell, P.H. Fowler, and D.H. Perkins, *Study of Elementary Particles by the Photographic Method* (Pergamon, London, 1959) <http://becquerel.jinr.ru/text/books/POWELL.pdf>.
2. H.L. Bradt and B. Peters “The heavy nuclei of the primary cosmic radiation” *Phys. Rev.* 77, 54 (1950); DOI: 10.1103/PhysRev.77.54.
3. H.H. Heckman, D.E. Greiner, P.J. Lindstrom, and H. Shwe “Fragmentation of ^4He , ^{12}C , ^{14}N , and ^{16}O nuclei in nuclear emulsion at 2.1 GeV/nucleon *Phys. Rev. C* 17, 1735 (1978); DOI: 10.1103/PhysRevC.17.1735.
4. L. Anderson, W. Bruckner, E. Moeller, S. Nagamiya, S. Nissen-Meyer, L. Schroeder, G. Shapiro, H. Steiner “Inclusive particle production at forward angles from collisions of light

- relativistic nuclei: Nuclear fragments” Phys. Rev. C 28, 1224 (1983); DOI: 10.1103/PhysRevC.28.1224.
5. A.G. Afonin, M.Yu. Bogolyubsky *et al.* “Forward production of nuclear fragments in CC collisions at beam energy 20.5 GeV/nucleon” Nucl. Phys. A 997, 121718 (2020) DOI:10.1016/j.nuclphysa.2020.121718.
 6. V.V. Glagolev *et al.* “Fragmentation of relativistic oxygen nuclei in interactions with a proton” Eur. Phys. J. A 11, 285 (2001); DOI: 10.1007/s100500170067.
 7. D.L. Olson *et al.* “Electromagnetic dissociation of relativistic ^{18}O nuclei” Phys. Rev. C 24, 1529 (1981) DOI: 10.1103/PhysRevC.24.1529.
 8. M.H. Smedberg *et al.*, Phys. Lett. B 452, 1 (1999), DOI: 10.1016/S0370-2693(99)00245-2.
 9. R. Thies *et al.* “Systematic investigation of projectile fragmentation using beams of unstable B and C isotopes” Phys. Rev. C 93, 054601 (2016); DOI: 10.1103/PhysRevC.93.054601.
 10. D. Cortina-Gil *et al.* “Nuclear and Coulomb breakup of ^8B ” Nucl. Phys. A 720, 3 (2003); DOI: 10.1016/S0375-9474(03)00671-7.
 11. TUNL Nuclear Data Evaluation Project: <http://www.tunl.duke.edu/NuclData/>.
 12. F. Wamers *et al.* “Comparison of electromagnetic and nuclear dissociation of ^{17}Ne ” Phys. Rev. C 97, 034612 (2018); DOI: 10.1103/PhysRevC.97.034612.
 13. T. Aumann “Low-energy dipole response of exotic nuclei” Eur. Phys. J. A 55 234 (2019); DOI: 10.1140/epja/i2019-12862-7.
 14. J. Engelage *et al.* “A quasi-exclusive measurement of $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, 3\alpha)\text{X}$ at 2.1 GeV/nucleon” Phys. Lett. B 173 34(1986); DOI: 10.1016/0370-2693(86)91225-6.
 15. T. Gorbine *et al.* “Study of the reaction mechanisms of $^{136}\text{Xe} + \text{p}$ and $^{136}\text{Xe} + ^{12}\text{C}$ at 1 A GeV with inverse kinematics and large-acceptance detectors” Eur. Phys. J. A 55, 11 (2019); DOI: 10.1140/epja/i2019-12683-8.
 16. P.I. Zarubin ““Tomography” of the cluster structure of light nuclei via relativistic dissociation.” Lect. Notes in Phys., 875, Clusters in Nuclei, Volume 3. Springer Int. Publ., 51 (2013); DOI: 10.1007/978-3-319-01077-9_3.
 17. D.A. Artemenkov, A. A. Zaitsev, P. I. Zarubin “Unstable nuclei in dissociation of light stable and radioactive nuclei in nuclear track emulsion” Phys. Part. and Nucl. 48 147(2017); DOI: 10.1134/S106377961701002.
 18. D.A. Artemenkov *et al.* “Study of the Involvement of ^8Be and ^9B Nuclei in the Dissociation of Relativistic ^{10}C , ^{10}B , and ^{12}C Nuclei” Phys. At. Nucl. 80, 1126 (2017); DOI:10.1134/S1063778817060047.
 19. T. Toshito *et al.* “Measurements of projectile-like ^8Be and ^9B production in 200-400 MeV/nucleon ^{12}C on water” Phys. Rev. C 78, 067602 (2008); DOI: 10.1103/PhysRevC.78.067602.
 20. D.A. Artemenkov *et al.* “Nuclear track emulsion in search for the Hoyle-state in dissociation of relativistic ^{12}C nuclei” Rad. Meas. 119, 199 (2018); DOI: 10.1016/j.radmeas.2018.11.005.
 21. D.A. Artemenkov *et al.* “The Hoyle state in relativistic ^{12}C dissociation” Springer Proc. Phys. 238, 137 (2020); DOI: 10.1007/978-3-030-32357-8_24.
 22. M. Freer and H. O. U. Fynbo “The Hoyle state in ^{12}C ” Progr. Part. Nucl. Phys. 78, 1 (2014); DOI: 10.1016/j.pnpnp.2014.06.001.
 23. M. Barbui *et al.* “Searching for states analogous to the ^{12}C Hoyle state in heavier nuclei using the thick target inverse kinematics technique” Phys. Rev. C 98, 044601 (2018); DOI: 10.1103/PhysRevC.100.034320
 24. R. Charity *et al.* “Invariant-mass spectroscopy of ^{18}Ne , ^{16}O , and ^{10}C excited states formed in neutron-transfer reactions” Phys. Rev. C 99, 044304 (2019); DOI: 10.1103/PhysRevC.99.044304.
 25. J. Bishop *et al.* “Experimental investigation of α condensation in light nuclei” Phys. Rev. C 100, 034320 (2019); DOI: 10.1103/PhysRevC.100.034320.
 26. T. Yamada and P. Schuck, Phys. Rev. “Dilute multi- α cluster states in nuclei” C 69, 024309 (2004); DOI: 10.1103/PhysRevC.69.024309.
 27. A. Tohsaki, H. Horiuchi, P. Schuck and G. Röpke “Status of α -particle condensate structure of the Hoyle state” Rev. Mod. Phys. 89, 011002 (2017); DOI: 10.1103/RevModPhys.89.011002.

28. *The BECQUEREL Project* <http://becquerel.jinr.ru/movies/movies.html>.
29. P.I. Zarubin “Recent applications of nuclear track emulsion technique” *Phys. At. Nucl.*, 79 1525 (2016); DOI: 10.1134/S1063778816130093.
30. V.V. Belaga, A.A. Benjaza, V.V. Rusakova, D.A. Salomov, G.M. Chernov “Coherent dissociation $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ in lead-enriched Emulsion at 4.5 GeV/c per nucleon” *Phys. At. Nucl.* 58, 1905 (1995); arXiv:1109.0817.
31. N.P. Andreeva *et al.* “Coherent dissociation $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ in photoemulsion at an incident momentum of 4.5 GeV/c per nucleon” *Phys. At. Nucl.* 59, 102 (1996); arXiv:1109.3007.
32. B.R. Fulton *et al.* “Exclusive breakup measurements for ^9Be ” *Phys. Rev. C* 70, 047602 (2004); DOI: 10.1103/PhysRevC.70.047602.
33. J. Allison *et al.* “Recent developments in Geant4” *Nucl. Instrum. Meth. A* 835, 186 (2016); DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.
34. J. Aichelin ““Quantum” molecular dynamics—a dynamical microscopic n -body approach to investigate fragment formation and the nuclear equation of state in heavy ion collisions” *Phys. Rep.* 202, 231 (1991); DOI: 10.1016/0370-1573(91)90094-3.
35. M.I. Adamovich *et al.* “ ^{28}Si (^{32}S) fragmentation at 3.7 A, 14.6 A and 200 A GeV” *Z. Phys.* A 351, 311 (1995); DOI: 10.1007/BF01290914.
36. M.I. Adamovich *et al.* “Fragmentation and multifragmentation of 10.6A GeV gold nuclei” *Eur. Phys. J. A* 5, 429 (1999); DOI: 10.1007/s100500050306.
37. S. Typel, G. Röpke, T. Klähn, D. Blaschke, and H. H. Wolter “Composition and thermodynamics of nuclear matter with light clusters” *Phys. Rev. C* 81, 015803 (2010); DOI: 10.1103/PhysRevC.81.015803.
38. J.A. Kirk, D.M. Cottrell, J.J. Lord and R.J. Piserchio “Inelastic muon interactions in nuclear emulsion at 2.4 and 3.0 GeV” *Nuovo Cimento A* 40, 523 (1965); DOI: 10.1007/BF02721042.
39. P.L. Jain, K. Sengupta and G. Singh “Hadron production by 150 GeV muons in nuclear emulsion” *Nucl. Phys. B* 301, 517 (1988); DOI: 10.1016/0550-3213(88)90275-1.
40. D.A. Artemenkov *et al.* “Study of nuclear multifragmentation induced by ultrarelativistic μ -mesons in nuclear track emulsion” *J. Phys.: Conf. Series* 675, 022022 (2016); DOI: 0.1088/1742-6596/675/2/022022.

2.2 Ожидаемые результаты и их значимость

Недавние достижения участников эксперимента БЕККЕРЕЛЬ в исследованиях с легкими релятивистскими ядрами и сохраненная микроскопная и химико-технологическая основа дают основания ожидать в перспективе около трех лет следующих физических и методических результатов:

Легкие ядра Будет получен ответ на вопрос об универсальном характере образования троек α -частиц в состоянии Хойла в диссоциации ряда ядер ^{14}N и ^{28}Si . Будет исследована возможность существования более сложных α -частичных состояний ядерно-молекулярного типа.

Тяжелые ядра В имеющихся слоях ЯЭ, облученных ядрами Kг, Au и Pb будут отобраны и документированы несколько десятков событий множественной диссоциации. В отобранных взаимодействиях будет установлено распределение по зарядовой топологии легчайших фрагментов, сопровождаемое их идентификацией, восстановлено распределение по поперечному импульсу нейтронов и оценено их число.

Мюоны Будет выполнено облучение стопок ЯЭ в чистом пучке мюонов в ЦЕРН и начат анализ фрагментации ядер из состава ЯЭ.

Результаты начального этапа позволят представить структуру диссоциации ядер с уникальной детальностью, а также уточнить предложения по применению метода ЯЭ на пучках НИКА. На этой основе будет подвергнута проверке гипотеза о возможности исследования разреженной ядерной материи в диссоциации тяжелых ядер. Результаты эксперимента позволят сделать вывод об изотопном составе и температуре разреженной ядерной материи, возникающей в момент диссоциации тяжелого ядра. Измерения углов эмиссии нейтронов позволят оценить их пространственные распределения на периферии тяжелых ядер (нейтронная «кожа»). В более широком плане, эти результаты важны для проверки в важном секторе модельных представлений о взаимодействиях релятивистских ядер.

Важным аргументом в пользу метода ЯЭ является возможность «физики на расстоянии», т.е. анализа облученных и проявленных слоев в институтах, обладающих подходящими микроскопами и подготовленным персоналом. Проект будет способствовать сохранению метода ЯЭ и подготовке молодых ученых для широкого применения в практике ядерного эксперимента, дозиметрии, радиационной медицине и экологии. Особенно важно активное применение этого метода в связи с перспективным развитием автоматических микроскопов и прогрессом программ распознавания изображений (искусственного интеллекта). В отношении ядерного эксперимента такое развитие будет базироваться на классическом методе ЯЭ.

2.4. Запрос ускорительного времени

Метод ЯЭ, сочетающий уникальную информативность с замечательной гибкостью применения, не требует существенных затрат ускорительного времени. Типичная длительность настройки пучка, выводимого на стопку ЯЭ, составляет часы, а время облучения – минуты. Выбор ядер будет сделан специалистами ускорителя и приоритетного эксперимента VM@N.

2.5. Определение ответственности

Вклад / обязанности ОИЯИ: Разработка физической программы, выполнение облучений и анализ данных по эксперименту в решающей степени выполняется сотрудниками ЛФВЭ. Эксперимент Беккерель опирается на собственные возможности проявки слоев ЯЭ и их анализа ядерных взаимодействий на микроскопах. Согласно бюджету проекта будут приобретаться слои ЯЭ, обновляться микроскопы и оборудование химической лаборатории. Тем самым будет обеспечена основа для привлечения внешних участников.

2.6. Научный опыт авторов

Применяется проверенная методика, применение которой является логическим развитием примерно 15-летнего цикла исследований по проекту БЕККЕРЕЛЬ в ОИЯИ, и существенно более ранних работ. По тематике проекта под руководством П. И. Зарубина защищено шесть кандидатских диссертаций, а сам он защитил докторскую диссертацию. Планируется, что ближайшие результаты по проекту войдут в две кандидатские диссертации. Имеется перспектива защиты докторских диссертаций. Анализ данных непосредственно координируется тремя кандидатами наук. В накоплении статистики участвуют три опытных лаборанта-микроскописта. Микроскопы поддерживаются в работоспособном состоянии квалифицированным техником. Группа химиков (3 чел.) сохраняет опыт проявки эмульсии, признанный на международном уровне.

2.7. Публикации, диссертации и презентации на конференциях

2.7.1 Публикации участников коллектива за последние 5 лет

1. P.I. Zarubin "Recent applications of nuclear track emulsion technique" *Phys. At. Nucl.* **79** 1525(2016).
2. D.A. Artemenkov *et al.* "Study of nuclear multifragmentation induced by ultrarelativistic μ -mesons in nuclear track emulsion" *Journal of Physics: Conference Series* **675** 022022(2016).
3. A.A. Zaitsev *et al.* "Dissociation of Relativistic ^{10}B Nuclei in nuclear track emulsion" *Phys. Part. Nucl.* **48** 960(2017); DOI:10.1134/S1063779617060612.
4. D.A. Artemenkov, A. A. Zaitsev, P. I. Zarubin "Unstable nuclei in dissociation of light stable and radioactive nuclei in nuclear track emulsion" *Phys. Part. Nucl.* **48** 147(2017); arXiv: 1607.08020.
5. D.A. Artemenkov *et al.* "Study of the Involvement of ^8Be and ^9B Nuclei in the Dissociation of Relativistic ^{10}C , ^{10}B , and ^{12}C Nuclei" *Phys. At. Nucl.* **80** 1126(2017).
6. D.A. Artemenkov *et al.* "Recent findings in relativistic dissociation of ^{10}B and ^{12}C nuclei" *Few Body Syst.* **58** 89(2017).
7. K.Z. Mamatkulov *et al.* "Experimental examination of ternary fission in nuclear track emulsion" *Phys. Part. Nucl.* **48** 910(2017).
8. D.A. Artemenkov, A.A. Zaitsev, and P.I. Zarubin "Search for the Hoyle state in dissociation of relativistic ^{12}C nuclei" *Phys. Part. Nucl.* **49** 530(2018).
9. D.A. Artemenkov *et al.* "Nuclear track emulsion in search for the Hoyle-state in dissociation of relativistic ^{12}C nuclei" *Radiation Measurements* **119** 199(2018); arXiv:1812.09096.
10. Zaitsev, A. A.; Zarubin, P. I. "Application of nuclear track emulsion in search for the Hoyle state in dissociation of relativistic ^{12}C " *Phys. At. Nucl.* **81**, 1237(2018).

2.7.2 Защита диссертаций

2019 А. А. Зайцев «Исследование диссоциации релятивистских ядер ^{10}B , ^{11}C и ^{12}C методом ядерной фотоэмульсии» (кфмн)
2016 К. З. Маматкулов «Исследование когерентной диссоциации ядра ^{10}C при энергии 1.2 ГэВ на нуклон» (кфмн)
2010 Д. О. Кривенков «Исследование когерентной диссоциации релятивистских ядер ^9C » (кфмн)
2010 П. И. Зарубин «Кластеризация нуклонов в диссоциации легких релятивистских ядер» (дфмн)
2008 Т. В. Щедрина «Исследование фрагментации релятивистских ядер ^{14}N методом ядерной фотографической эмульсии» (кфмн)
2008 Р. Ж. Станоева «Исследование релятивистской фрагментации ядер ^8B методом ядерной фотографической эмульсии» (кфмн)
2008 Д. А. Артеменков ««Исследование фрагментации ядер ^9Be на альфа-частичные пары в ядерной фотоэмульсии при энергии 1.2 А ГэВ»» (кфмн)

2.7.3 Недавние устные доклады на конференциях за рубежом

2019 XXXVI Mazurian Lake Conference on Physics (Piaski, Poland) A.A. Zaitsev

2019 Workshop "Light clusters in nuclei and nuclear matter: Nuclear structure and decay, heavy ion collisions, and astrophysics" (Trento, Italy) P.I. Zarubin

2018 European Nuclear Physics Conference (Bologna, Italy) A.A. Zaitsev

2017 The 27th International Conference on Nuclear Tracks and Radiation Measurements (Strasbourg, France) P.I. Zarubin, I.G. Zarubina

3. Человеческие ресурсы

Table 1. Сотрудники ЛФВЭ (*- 6 участников моложе 40).

№	Имя, степень, должность	Обязанности	FTE
1.	Зарубин П. И. дфмн начальник сектора	Руководитель проекта	1.0
2.	Русакова В. В. кфмн начальник группы	Координация поиска и измерений событий лаборантами, обучение на микроскопах	1.0
3.*	Артеменков Д. А. кфмн, снс	Анализ измерений, моделирование взаимодействий, обучение на микроскопах	1.0
4.	Зарубина И. Г. инженер	Анализ данных, веб-сайт, видео	1.0
5.*	Зайцев А. А. кфмн нс	Измерения на микроскопах, анализ и представление данных, обучение на микроскопах	1.0
6.*	Корнегруца Н. К. инженер	Измерения на микроскопах, анализ данных	1.0
7.*	Мицова Э. нс	Измерения на микроскопах, анализ данных	1.0
8.	Браднова В. Начальник группы	Проявка ЯЭ, развитие технологии ЯЭ	1.0
9.	Кондратьева Н. В. инженер	Проявка ЯЭ, развитие технологии ЯЭ	1.0
10.*	Вартик В. инженер	Проявка ЯЭ, развитие технологии ЯЭ	
11.	Куликова Л. И. лаборант	Проявка ЯЭ	1.0
12.	Стельмах Г. И.	Набор статистики	1.0
13.	Номозова К. Б. инженер	Набор статистики, измерения на микроскопах,	1.0
14.	Щербакова Н. С. лаборант	Набор статистики	1.0
15.	Марьин И. И. техник	Обслуживание микроскопов, облучение ЯЭ	1.0
		Σ	15.0

4. Сильные и слабые стороны, возможности, угрозы

Следующие аспекты составляют сильные стороны проекта:

- ясно сформулированные задачи исследования, по фундаментальным проблемам современной ядерной физики;
- опора на собственную научно-методическую культуру применения ЯЭ;
- сочетание уникального разрешения ЯЭ и возможностей на современных ускорителях;
- наличие исследовательской основы в виде микроскопов и химической лаборатории;
- полное владение сотрудниками ЛФВЭ хорошо проверенной методикой, включая облучение и проявку слоев, поиск событий и их измерения;
- ясно понимаемые перспективы автоматизации измерений на микроскопах;

- возможности для молодых исследователей в освоении динамики релятивистских ядерных столкновений и самостоятельном решении поставленных задач;
- наличие начального научного «капитала» в виде слоев, превосходно облученных в ОИЯИ, BNL, CERN;
- налаженное сотрудничество с производителем;
- невысокая стоимость и гибкость в следовании развитию комплекса НИКА;
- возможность «физики на расстоянии»;

Практической проблемой проекта является налаживание производителем производства толстослойных бесподложечных слоев. Другой проблемой является уход от широкого применения этой методики. Осуществление целей проекта будет способствовать полному восстановлению классической методики ядерного эксперимента, которая уже считалась утраченной.

Ориентация проекта на наглядную и доступную методику позволит привлечь к проекту НИКА более широкий круг студентов естественнонаучных специальностей, в том числе педагогического профиля. Не возникает особых вопросов технической и радиационной безопасности.

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
проекта БЕККЕРЕЛЬ-2020**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.). Потребности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов				
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Затраты	Основные узлы оборудования, работы по его обновлению, наладке и т.п.	80	80	-	-		
	Строительство/ремонт помещений						
	Материалы	75	25	25	25		
Необходимые ресурсы	Нормо-час Ресурсы – конструкторского бюро лаборатории, – опытного производства ОИЯИ, – опытного производства лаборатории, – ускорителя, – реактора, – ЭВМ. Эксплуатационные расходы						
Источники финансирования	Бюджетные средства Затраты из бюджета, в том числе инвалютные средства	155	105	25	25		
	Внебюджетные средства Вклады коллаборантов. Средства по грантам. Вклады спонсоров. Средства по договорам. Другие источники финансирования и т.д.						

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

Смета затрат по проекту Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ-2020 на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/NICA (Проект БЕККЕРЕЛЬ-2020)

NN пп	Наименование статей затрат	Полная стоимость	1 год	2 год	3 год и далее
	Прямые расходы на Проект				
1.	Ускоритель, час.	150	50	50	50
2.	ЭВМ				
3.	Компьютерная связь, тыс. долл.				
4.	Конструкторское бюро	нормо-час			
5.	Опытное производство	нормо-час			
6.	Материалы, тыс. долл.	75	25	25	25
7.	Оборудование, тыс. долл.	80	80	-	-
8.	Строительство/ремонт помещений, тыс. долл.				
9.	Оплата НИР, выполняемых по договорам, тыс. долл.				
10.	Командировочные расходы, тыс. долл., в т.ч.	120	40	40	40
	а) в страны нерублевой зоны	60	20	20	20
	б) в города стран рублевой зоны	60	20	20	20
	в) по протоколам				
	Итого по прямым расходам:	275	145	65	65

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА



ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ



ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛАБОРАТОРИИ



Рецензия на проект

«Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/НИСА»

Явление диссоциации релятивистских ядер, наблюдаемое с высокой эффективностью в ядерной эмульсии (ЯЭ), позволяет изучать ансамбли нуклонов и легчайших ядер, представляющие интерес для ядерной физики и астрофизики. Особенности изучаемых ядер проявляются в вероятностях каналов диссоциации. Достоинства методики ЯЭ включают рекордное разрешение в определении углов вылета релятивистских фрагментов и возможность идентификации среди них изотопов He и H путем измерения многократного рассеяния. На этой основе в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ изучается кластерная структура лёгких стабильных и радиоактивных изотопов. В частности, по инвариантной массе пар и троек релятивистских фрагментов He и H в диссоциации изотопов ^9Be , ^{10}B , ^{10}C и ^{11}C идентифицированы нестабильные ядра ^8Be и ^9B .

Мотивацией проекта является поиск метастабильных состояний ансамблей лёгких ядер и нуклонов. Такие состояния могут служить промежуточной субстанцией в астрофизических процессах нуклеосинтеза. Возможность такой фазы барионной материи, как предельно разреженной и холодной в ядерном масштабе, предсказывается теоретиками и имеет несомненное фундаментальное значение. Экспериментальное исследование такой фазы затруднительно и требует специализированной методики. В проекте показывается возможность её воспроизведения и наблюдения в узком конусе диссоциации релятивистских ядер. Продукты диссоциации регистрируются в ЯЭ.

Проект направлен на применение методики ЯЭ для исследования фрагментации средних и тяжёлых ядер. Её применение и развитие является логическим продолжением примерно 15-летнего цикла исследований по эксперименту БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ, и еще более ранних работ по релятивистской ядерной физике. В основу проекта легла обоснованная экспериментально возможность наблюдения множественной фрагментации ядер с помощью ЯЭ. Эта техника остается единственным средством исследования, обеспечивающим высокое разрешение регистрации частиц в узком конусе диссоциации. Обеспечивается достаточная статистическая точность и надёжная идентификация лёгких ядер. Владение авторами методом не вызывает сомнений. В отношении анализа развит метод инвариантной массы на основе рекордного разрешения в применении к релятивистской фрагментации, позволивший идентифицировать нестабильные ядра ^8B и ^9B , а также группы α частиц с близкими импульсами, называемыми состояниями Хойла. Демонстрируя разрешение метода, эти результаты становятся вехами к определению универсальной роли этих метастабильных объектов в диссоциации более тяжелых ядер и поиску более сложных состояний, соответствующих предсказанному альфа-частичному конденсату. Поиск таких состояний возможен в наиболее узких компонентах струй фрагментов. Сформулирована программа исследований. Имеется материал для немедленного начала исследований и предложения на перспективу. На этом пути есть возможность неожиданных открытий в ядерной физике.

Результаты проекта позволяют обосновать новые предложения ядерно-физических исследований на ускорительном комплексе ЛФВЭ и в других центрах. Проект будет способствовать сохранению и развитию метода ЯЭ. Важное значение имеет подготовка молодых ученых, владеющих методикой ЯЭ и готовых к её применению в ядерных экспериментах, дозиметрии, радиационной медицине и экологии. Особенно важно применение этого метода в связи с перспективным развитием автоматических микроскопов и прогрессом программ распознавания изображений (искусственного интеллекта). Такое развитие будет актуальным продолжением классической техники ЯЭ. Таким образом, проект БЕККЕРЕЛЬ заслуживает поддержки.

Виктор В.

В. А. Никитин.

Главный научный сотрудник ЛФВЭ ОИЯИ.
Доктор физико-математических наук.
Профессор

**Отзыв на проект
«Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/НИСА»**

Отмечая разнообразие и ценность предложенных задач, хочу сосредоточиться на значении предлагаемого проекта для проверки теоретической концепции конденсата Бозе-Эйнштейна как конденсата альфа-частиц – предсказанного аналога ультрахолодных квантовых газов. Статус развития концепции альфа-конденсата детально представлен в обзоре Tohsaki, H. Horiuchi, P. Schuck and G. Roeperke “Status of α -particle condensate structure of the Hoyle state” Review of Modern Physics 89 (2017) 01100. В обзоре отмечено предложение о поиске конденсатных состояний в диссоциации релятивистских ядер. Также предложение отмечено в лекционном обзоре W. Von Oertzen “Alpha-cluster condensations in nuclei and experimental approaches for their studies” Clusters in Nuclei, Lecture Notes in Physics 818, 109 (2010). В этой концепции предсказаны степени свободы альфа-кратных ядер вблизи порогов развала, основанные на среднем поле бозонного типа, формируемом газом альфа-частиц. Сосуществовая с обычными фермионными возбуждениями, такие состояния оказываются возможными благодаря тому потому что альфа-частица имеет свойства почти идеального бозона. Они возникают при средней плотности схожей с ядром ^8Be , которая в 4 раза меньше обычной ядерной. Являясь бозонами, альфа-частицы могут конденсироваться на 0S орбите их собственного кластерного поля. Состояние Хойла с его тремя альфа-частицами рассматривается как легчайший альфа-конденсат и как ядро ^8Be с одной дополнительной альфа-частицей на 0S орбите.

Стоит отметить, что ядро ^{12}C может переходить из основного состояния в несвязанное, но очень долгоживущее при 7.65 МэВ, названное в честь астрофизика Ф. Хойла, который предсказал существование этого резонанса более 60 лет назад для того чтобы объяснить распространенность изотопа ^{12}C . Переход в состояние Хойла в реакциях слияния может служить «входными воротами» для синтеза более тяжелых ядер. Теоретическое описание экспериментальных данных, извлеченных из неупругого возбуждения электронами ядра ^{12}C , указывает на то, что состояние Хойла имеет объем в 3-4 раза больший, чем основное состояние. Однако, указывая на экзотическую структуру состояния, эти измерения не отвечают на вопросы относительно его внутренней структуры. Возможно, это окажется возможным в предлагаемом эксперименте, где указание на возникновение состояния Хойла уже было найдено. Предположение о том, что распад конденсата может быть обнаружен в распаде альфа-частичного газа по каскадной цепочке $^{16}\text{O} (0^+_{6}) \rightarrow ^{12}\text{C}(0^+_{2}) \rightarrow ^8\text{Be} (0^+_{2}) \rightarrow 2\alpha$ является очень интересным.

Результаты и предложения по новому проекту БЕККЕРЕЛЬ были представлены его руководителем в приглашенном на рабочем совещании «Легкие кластеры в ядрах и ядерной материи: ядерная структура и распады, соударения тяжелых ионов и астрофизика» (2-6, сентября 2019, Тренто, Италия). Замечательно, что поиски непрерывно возрастающей сложности могут быть осуществлены в одном и том же экспериментальном подходе.

В целом, использование явления диссоциации релятивистских ядер в ядерной эмульсии для генерации состояний квантового конденсата дает альтернативу поискам в этом направлении методами физики низких энергий. Эти идеи могут применяться для объяснения явлений в ядерной астрофизике и физике космических лучей. По всем этим причинам проект заслуживает поддержки. Научная значимость проекта высока. Запрашиваемые ресурсы соответствуют задачам проекта.



С. Н. Ершов
начальник сектора ЛТФ ОИЯИ.
доктор физико-математических наук



TEXAS A&M UNIVERSITY
Cyclotron Institute
College Station, Texas 77843-3366
(979) 845-1415 FAX (979) 845-1899
email: natowitz@comp.tamu.edu

30 Sept. 2019

Dr. Pavel Zarubin
zarubin@lhe.jinr.ru

Dear Pavel

Thank you for sharing your proposal with me. I think it clearly demonstrates that your techniques for studying fragmentation of relativistic nuclei using nuclear emulsions offer some significant possibilities to explore a number of phenomena of current interest. Certainly, tracing the possible existence of condensed states analogous to the Hoyle state in heavier nuclei is an exciting current topic and your method would seem to be ideal for an initial survey of such alpha-clustered states. That you can compete with very highly sophisticated (and very expensive) spectrometers and/or time projection chambers is quite impressive. Given your ability to study a wide range of such light nuclei, this project appears to me to be particularly well motivated.

The multi-fragmentation problem is one with a long history. Here again systematic investigations may reveal new correlations not previously recognized. To me the most interesting possibilities reside in the studies of the peripheral collisions and the possibility to observe the multi-fragmentation in the absence of a very complex collision dynamics. For the same reasons the muon induced fragmentations appear to offer some real advantages and comparing the peripheral interaction results with the muon induced results may offer some new insights into these processes.

It is abundantly clear from your discussion that this endeavor is a labor intensive one and that the requested upgrades to your technical capabilities are well motivated. I certainly hope that you will receive a positive response to this research proposal and that we will see some stimulating new results in the near future.

With best regards,

J. B. Natowitz
University Distinguished Professor, Emeritus
TEXAS A & M UNIVERSITY

Циклотронный институт
Колледж Стейшн, Техас 77843-3366
(979) 845-1415 ФАКС (979) 845-1899
электронная почта: natowitz@comp.tamu.edu

30 сентября 2019 г.

Доктор Павел Зарубин

zarubin@lhe.jinr.ru

Уважаемый Павел

Спасибо, что поделились своим предложением со мной. Я думаю, что это наглядно демонстрирует, что ваши методы изучения фрагментации релятивистских ядер с использованием ядерных эмульсий предлагают некоторые значительные возможности для изучения ряда явлений, представляющих текущий интерес. Конечно, отслеживание возможного существования конденсированных состояний, аналогичных состоянию Хойла, в более тяжелых ядрах является интересной актуальной темой, и ваш метод может показаться идеальным для первоначального обзора таких альфа-кластеризованных состояний. То, что вы можете конкурировать с очень сложными (и очень дорогими) спектрометрами и / или камерами проекционного времени, весьма впечатляет. Учитывая вашу способность изучать широкий спектр таких легких ядер, мне кажется, что этот проект особенно хорошо мотивирован.

Проблема множественной фрагментации имеет долгую историю. Здесь снова систематические исследования могут выявить новые корреляции, ранее не признанные. Для меня наиболее интересные возможности связаны с изучением периферических столкновений и возможностью наблюдать мультифрагментацию при отсутствии очень сложной динамики столкновений. По тем же причинам мюонная индукция, по-видимому, дает некоторые реальные преимущества, и сравнение результатов периферического взаимодействия с результатами, индуцированными мюоном, может дать некоторое новое понимание этих процессов.

Из вашей дискуссии совершенно очевидно, что эта работа является трудоемкой и что запрошенные обновления ваших технических возможностей мотивированы. Я, безусловно, надеюсь, что вы получите положительный ответ на это предложение об исследованиях, и что мы увидим некоторые стимулирующие новые результаты в ближайшем будущем.

С наилучшими пожеланиями,

Дж. Б. Натовиц

Заслуженный почетный профессор университета