

Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/NICA

Проект БЕККЕРЕЛЬ

ШИФР ТЕМЫ: 02-1-1087-2009 / 2020

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. 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

ШИФР ТЕМЫ: 02-1-1087-2009 / 2020

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 исследования | 7 |
| 2. Описание предлагаемого исследования | 10 |
| 2.1.1 Возможности метода | 10 |
| 2.1.2 Состояние Хойла в диссоциации легких ядер | 12 |
| 2.1.3 Состав диссоциации тяжелых ядер | 16 |
| 2.1.4 Фрагментация, вызванная мюонами | 19 |
| 2.1.5 Обновление микроскопов и технологии ЯЭ | 21 |
| 2.2 Список литературы | 22 |
| 2.3 Ожидаемые результаты и их значимость | 24 |
| 2.4 Запрос ускорительного времени | 25 |
| 2.5 Определение ответственности | 25 |
| 2.6 Научный опыт авторов | 25 |
| 2.7 Публикации, диссертации и презентации на конференциях | 26 |
| 3. Человеческие ресурсы | 28 |
| 4. Сильные и слабые стороны, возможности, угрозы | 28 |
| 5. Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы (Форма №26) | 30 |
| 6. Смета затрат (Форма № 29) | 31 |
| 7. Appendix | |
| 7.1 Отзыв рецензента №1 | |
| 7.2 Отзыв рецензента №2 | |
| 7.3 Выписка из решения НИС ЛФВЭ | |

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 ^9Be , ^{10}B , ^{10}C и ^{11}C идентифицированы нестабильные ядра ^8Be и ^9B , а в диссоциации ^{12}C и ^{16}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}N , ^{22}Ne и ^{28}Si состояния Хойла, а также более сложных ядерно-молекулярных состояний.

Главной перспективой 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 таким состояниям 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.

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 (рис. 1). 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. Предназначением проекта БЕККЕРЕЛЬ является применение потенциала одного из разделов физики высоких энергий – релятивистской ядерной физики – для развития концепций ядерной кластеризации.

Явление периферической диссоциации релятивистских ядер имеет скрытый потенциал «лаборатории» для проверки 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 ядерной эмульсии (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».

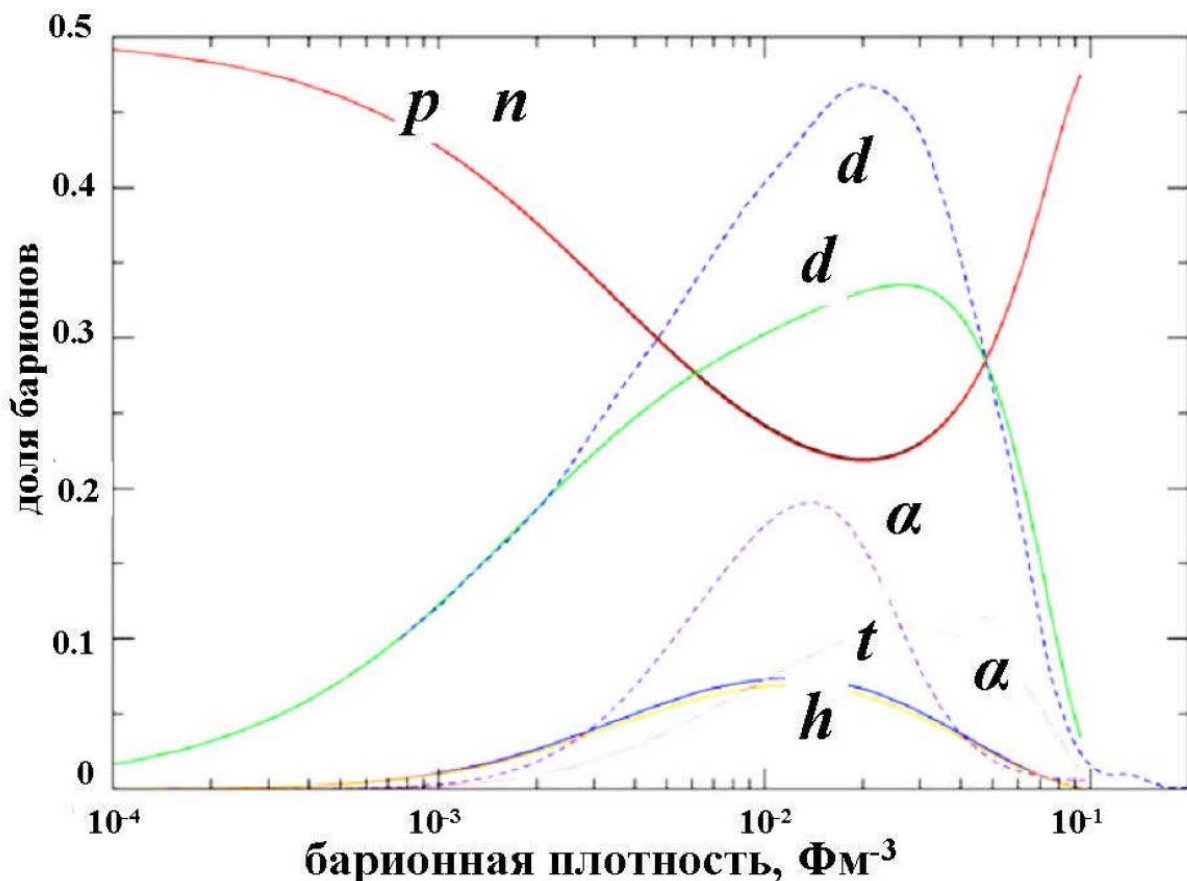


Рис. 1. Соотношение долей нуклонов и легчайших ядер в зависимости от барионной плотности симметричной ядерной материи (из доклада G. Rörke).

Предложение об использовании периферической диссоциации релятивистских ядер как источника когерентных ансамблей легчайших ядер опирается на известные наблюдения. При энергии свыше 1 А ГэВ области фрагментации ядра снаряда и ядра мишени отчетливо разделяются, а импульсные спектры фрагментов выходят на масштабно-инвариантное поведение. Тем самым достигается режим предельной фрагментации, что также означает неизменность изотопического состава фрагментов при возрастании энергии столкновения. Изотопический состав заряженных фрагментов

определяет число несвязанных нейтронов. Принципиально важно то, что пороги детектирования релятивистских фрагментов отсутствуют, а потери энергии в веществе минимальны.

Конфигурационное перекрытие основного состояния фрагментирующего ядра с конечными состояниями наиболее полно проявляется в периферических взаимодействиях с сохранением барионного числа в области фрагментации. Определение взаимодействий как периферических упрощается с ростом энергии благодаря возрастающей коллимации фрагментов. Наиболее периферические из них, именуемые когерентной диссоциацией или «белыми звездами», не сопровождаются фрагментацией ядер мишени. Вероятность такого канала диссоциации достигает нескольких процентов при энергии свыше 1 А ГэВ. Состав диссоциации ядер является объектом настоящего исследования.

1. Статус исследования

Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ опирается на культуру применения ЯЭ в проблемах физики высоких энергий, развивавшуюся с начала 50-х гг. и не утратившую ценность поныне. Облучения ЯЭ во впервые создававшихся пучках релятивистских ядер начались в 70-х гг. на синхрофазотроне ОИЯИ и Бевалаке (LBL). В 90-е гг. подобные облучения продолжились на BNL AGS и CERN SPS. В духе традиций, возникших еще в пионерский период исследования космических лучей, стопки слоев ЯЭ, проявлявшихся в ЛФВЭ ОИЯИ, передавались во многие научные центры и университеты, способствуя широкому успеху нового направления. Полнота наблюдения в ЯЭ следов заряженных частиц легла в основу классификации ядро-ядерных столкновений. Особое внимание привлекли наиболее разрушительные соударения, как отвечающие наибольшей концентрации материи и энергии. Последующее развитие в этом направлении широко известно. Вместе с тем результаты, полученные в 70–90-х гг. методом ЯЭ, как и сами облученные слои, и соответствующие файлы данных, сохраняют уникальность в аспекте фрагментации налетающих ядер. В максимально доступной степени это научное наследие сохранено и доступно в ЛФВЭ. На сайте проекта БЕККЕРЕЛЬ накапливается коллекция макро-видеозаписей изучавшихся периферических взаимодействий релятивистских ядер <http://becquerel.jinr.ru/movies/movies.html>.

События периферической диссоциации, отражающие индивидуальные особенности налетающих ядер, наблюдаются в ЯЭ также часто и полно, как и центральные соударения. Они указывают на принципиальную возможность изучения ядерной структуры в конусе релятивистской фрагментации. Однако в таком аспекте применение традиционных магнитных спектрометров с координатными и сцинтилляционными детекторами

оказалось весьма ограниченным. Возникшие сложности обусловлены драматической разницей в ионизации ядер пучка и релятивистских фрагментов при их крайне малой угловой расходимости, и, зачастую, примерным совпадением по магнитной жесткости. По этим причинам осуществлялась постановка измерений с регистрацией релятивистских фрагментов максимально близких по заряду к изучаемому ядру.

Открытие в середине 80-х гг. экзотических ядер, сделанное на БЕВАЛАКе, стимулировало новые эксперименты в пучках радиоактивных ядер во многих ускорительных центрах. Исследования легких ядер вдоль границы нейтронной стабильности сформировали направление исследований – физика ядер с экзотической структурой. Однако релятивистский диапазон энергии оказался неудобным для более глубокого исследования этих ядер, и их изучение сместилось на ускорители низких энергий. Некоторая пауза в применении преимуществ релятивистского подхода к изучению стабильных и нейтронодефицитных ядер стала мотивацией для дальнейших облучений стопок ЯЭ. С начала 2000-х г. стартовал эксперимент БЕККЕРЕЛЬ, нацеленный на систематическое применение метода ЯЭ в физике периферических взаимодействий легких ядер, в том числе радиоактивных.

Анализ периферических взаимодействий в слоях ЯЭ, облучавшихся на нуклотроне ОИЯИ, позволил изучить в едином подходе кластерные особенности ядер ${}^{7,9}\text{Be}$, ${}^{8,10,11}\text{B}$, ${}^{10,11}\text{C}$, ${}^{12,14}\text{N}$ и установить вклад нестабильных ядер ${}^6\text{Be}$, ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ в их диссоциацию (обзоры [1,2]). Важный вывод состоит в том, что отсутствие стабильных основных состояний ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ не препятствует их участию в ядерной структуре. В цепочках нуклеосинтеза они могут служить необходимыми «пересадочными станциями», прохождение которых «запечатлевается» в образующихся ядрах. До сих пор подобные участники признаются только в знаменитой цепочке $3\alpha \rightarrow \alpha^8\text{Be} \rightarrow (\text{состояние Хойла}) \rightarrow {}^{12}\text{C}$. Наши наблюдения подсказывают возможность расширения сценариев синтеза легких изотопов с участием нестабильных состояний.

Возможно рассмотрение и роли более сложных ядерно-молекулярных систем. Например, в когерентной диссоциации ядра ${}^{10}\text{C}$ нами получено указание на резонанс в канале ${}^9\text{Br}$ при 4 МэВ [2]. Его изучение продолжается на 4-кратно возросшей статистике. Устойчивый интерес к теме можно проследить по числу загрузок обзора [2], суммировавшего результаты первого этапа эксперимента (рис. 2). По-существу, эксперимент БЕККЕРЕЛЬ, опираясь на фрагментацию релятивистских ядер в ЯЭ, удерживает «мировую монополию» в части детальной информации о многочастичных ядерных ансамблях. С 2016 года под пристальным вниманием находится возможность наблюдения состояния Хойла (HS) в релятивистской диссоциации легких ядер [3].

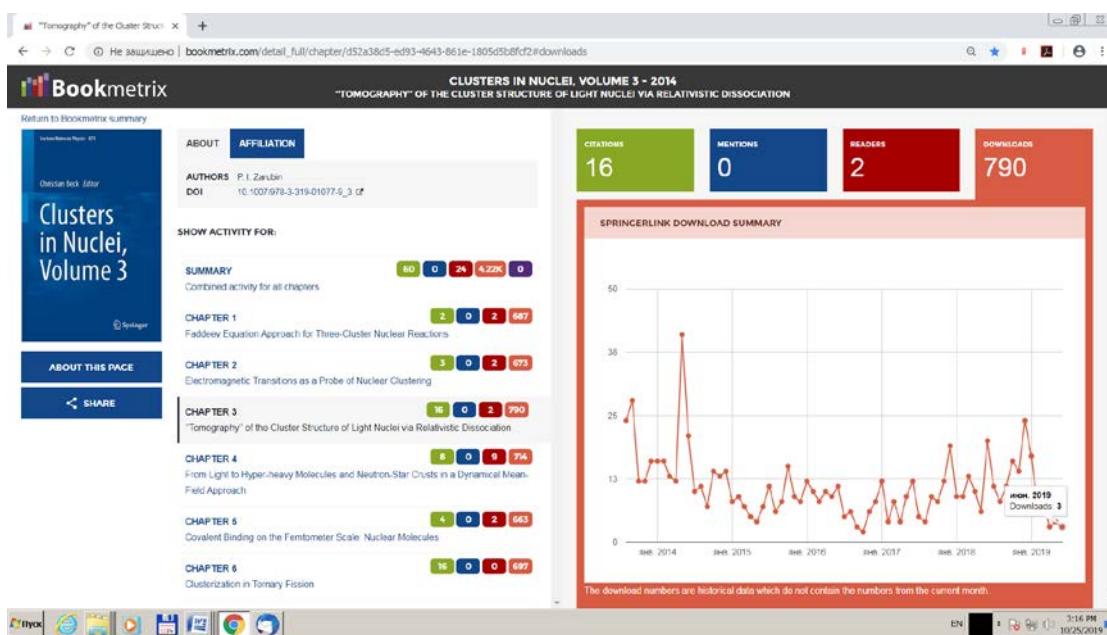


Рис. 2. Частота загрузок обзора [1].

Главное затруднение, уже в значительной степени преодоленное, состояло в том, что производство слоев ЯЭ, в течение четырех десятилетий ведшееся в Москве, прервалось в середине 2000 гг. Тем самым история метода ЯЭ казалась завершенной. Однако, отвечая на запрос эксперимента БЕККЕРЕЛЬ, компания "Славич" (г. Переславль Залесский) возобновила с 2012 г. производство слоев ЯЭ толщиной от 50 до 200 мкм на стеклянной основе. Образцы ЯЭ использовались в экспериментах, в которых имелось все разнообразие следов ионизации – от медленных тяжелых ионов до релятивистских частиц [4-6]. В настоящее время восстанавливается производство слоев ЯЭ толщиной 500 мкм без подложки.

Таким образом, применение ЯЭ не остановилось. Напротив, был проведен исследовательский цикл по структуре целого семейства легких ядер, осовременена технология, методы измерений и подготовлены молодые исследователи. Развитый подход к исследованию множественных ядерных ансамблей имеет исследовательскую перспективу в отношении легких и средних ядер. Особые преимущества метода ЯЭ проявятся для ядер на границе протонной стабильности, что потребует формирования вторичных пучков (например, ^{31}Ag в ГСИ).



Рис. 3. Анализируемые слои ЯЭ толщиной 500 мкм, наклеенные на стекло. Вход ядер пучка вдоль длинной стороны через край слоя слева.

2. Описание предлагаемого исследования

2.1.1 Возможности метода

Облучаемые стопки собираются из слоев размером до $10 \times 20 \text{ см}^2$ толщиной ЯЭ 200 мкм на стеклянной подложке и 550 мкм без нее (рис. 3). 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 троекратно большем числе H. По плотности водорода материал ЯЭ близок к жидководородной мишени. Эта особенность позволяет сравнивать в одинаковых условиях развалы ядер-

снарядов как в результате дифракционной или электромагнитной диссоциации на тяжелом ядре-мишени, так и в результате столкновений с протонами.

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 настоящем предложении, 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. $Z_{pr} = \sum Z_{fr}$. 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).

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 ${}^4\text{He}$. Оптимальное значение $P\beta c = 5$ А ГэВ отвечает энергии пучков НИКА.

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 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 ${}^9\text{B}$, освоенная в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ, подтвердила справедливость этого приближения. Подробности и иллюстрации измерений методом ЯЭ опубликованы [3].

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 пробегов в ЯЭ [4]. 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 [5]. 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 Состояние Хойла в диссоциации легких ядер

Успешная реконструкция распадов ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$ позволяет сделать следующий шаг – выполнить поиск в релятивистской диссоциации ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ троек α -частиц в состоянии Хойла (HS). Это состояние является вторым (и первым несвязанным) возбуждением 0^+_2 ядра ${}^{12}\text{C}$. Значимость этого короткоживущего состояния трех реальных α -частиц и статус его исследования представлены в обзоре [7]. Ядро ${}^8\text{Be}$ является неизменным продуктом распадов HS. Такие особенности HS как обособленность в начальной части спектра возбуждения ${}^{12}\text{C}$, предельно малые значения энергии и ширины распада (378 кэВ и 8.5 эВ) указывают на его сходство с ядром ${}^8\text{Be}$ (91 кэВ и 5.6 эВ). Оба они могут быть отнесены к квазистабильным состояниям ядерно-молекулярного типа.

В релятивистском случае наименьшие значения энергии распадов ${}^8\text{Be}$ и HS проецируются на самые узкие углы разлета пар и троек α -частиц, соответственно. Основываясь на распадах ${}^9\text{B} \rightarrow p{}^8\text{Be}$, идентифицированных в когерентной диссоциации ${}^{10}\text{C}$, было установлено условие $Q_{2\alpha} < 200$ кэВ отбора фрагментов ${}^8\text{Be}$. Выбранный в наиболее чистых условиях, этот критерий учитывает практическое разрешение и принятые приближения, включая кинематический эллипс распада ${}^8\text{Be}$.

Наименьшая энергия распада связана с наибольшим размером супердеформированного ${}^8\text{Be}$ (рис. 4) [8]. Его расчетное значение соответствует диаметру ядра железа. Предполагается, что размеры ${}^9\text{B}$ и HS [7] такого же порядка. Можно предположить, что HS не сводится к возбуждению ${}^{12}\text{C}$, но и может возникать как 3α -частичный аналог ${}^8\text{Be}$ в релятивистской фрагментации более тяжелых ядер. Тогда

наименьшей энергии распадов ${}^8\text{Be}$ и HS будут отвечать наиболее узкие по углу разлета пары и тройки α -частиц.

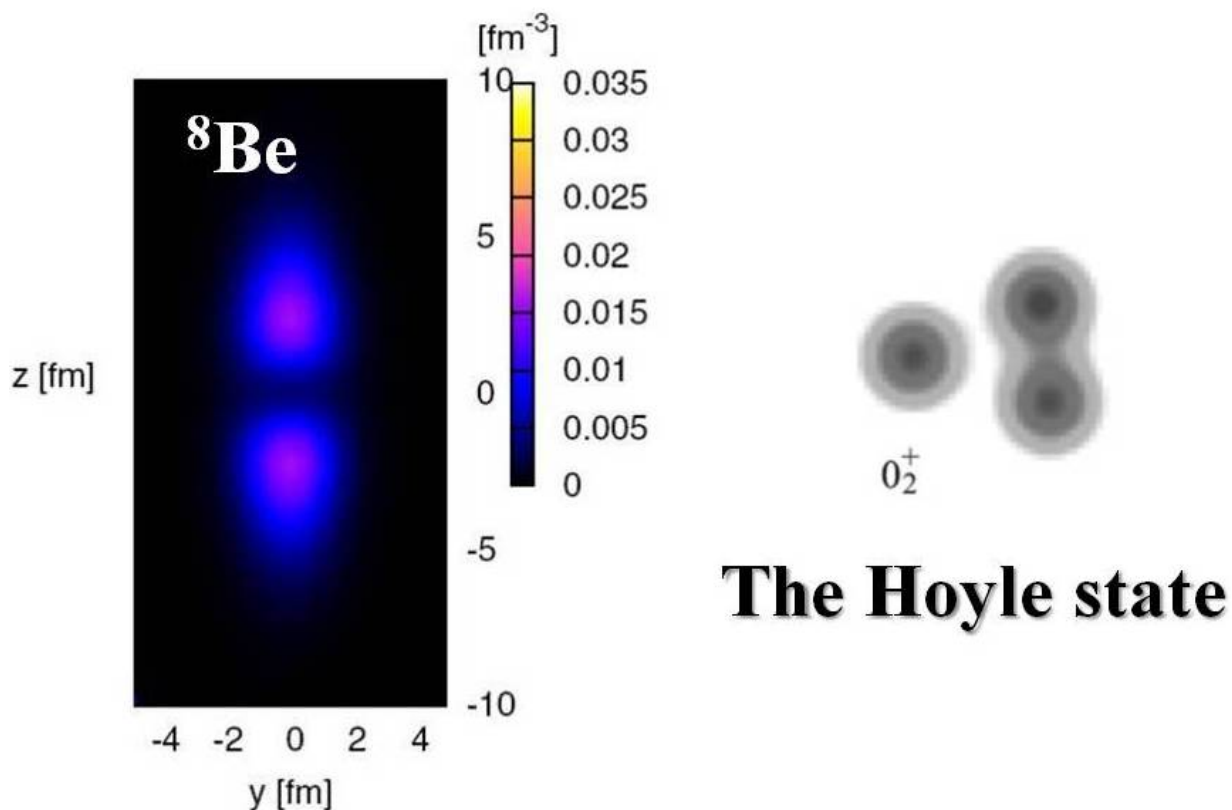


Рис. 4. Расчетные распределения ядерной плотности в основном состоянии ядра ${}^8\text{Be}$ и состояния Хойла [7,8].

Современный интерес к этой теме мотивирован концепцией α -частичного конденсата Бозе-Эйнштейна (обзор [8]). Ее статус представлен в [9]. В качестве наиболее простых форм такого конденсата предложено основное состояние нестабильного ядра ${}^8\text{Be}$ и, вслед за ним, HS. В продолжение ветви ${}^8\text{Be}$ и HS предполагается, что конденсатным 4α -состоянием является 6-е возбужденное состояние 0_6^+ ядра ${}^{16}\text{O}$, расположенное на 700 кэВ выше 4α -порога. Тогда распад конденсата мог бы идти в последовательности ${}^{16}\text{O} (0_6^+) \rightarrow {}^{12}\text{C} (0_2^+) \rightarrow {}^8\text{Be} (0_2^+) \rightarrow 2\alpha$. Возникает вопрос, а возможно ли существование еще более сложных ядерно-молекулярных систем?

Факт генерации HS может отражать как присутствие в родительском ядре виртуальной конфигурации трех слабосвязанных α -частиц в $0S$ -состоянии, так и возникать через возбужденный фрагмент ${}^{12}\text{C}^*(\rightarrow 3\alpha)$ или же быть продуктом взаимодействия α -частиц в конечном состоянии. Эти варианты требуют теоретического рассмотрения. В

экспериментальном плане общий вопрос состоит в следующем. Может ли служить фрагментация релятивистских ядер «фабрикой» для генерации ансамблей α -частиц нарастающей множественности на нижнем пределе ядерной температуры? Далее в контексте проблемы HS будут представлены выводы по анализу распределений по инвариантной массе $Q_{(2-4)\alpha}$ α -частичных пар, троек и квартетов, рожденных в диссоциации ядер ^{12}C , ^{16}O и ^{22}Ne . На основе данных, полученных в 80-90х гг., о диссоциации релятивистских ядер ^{12}C [10], ^{16}O [11] и ^{22}Ne [12], а также в случае ^{12}C их современного дополнения [3], выполнен поиск троек релятивистских α -частиц в состоянии Хойла.

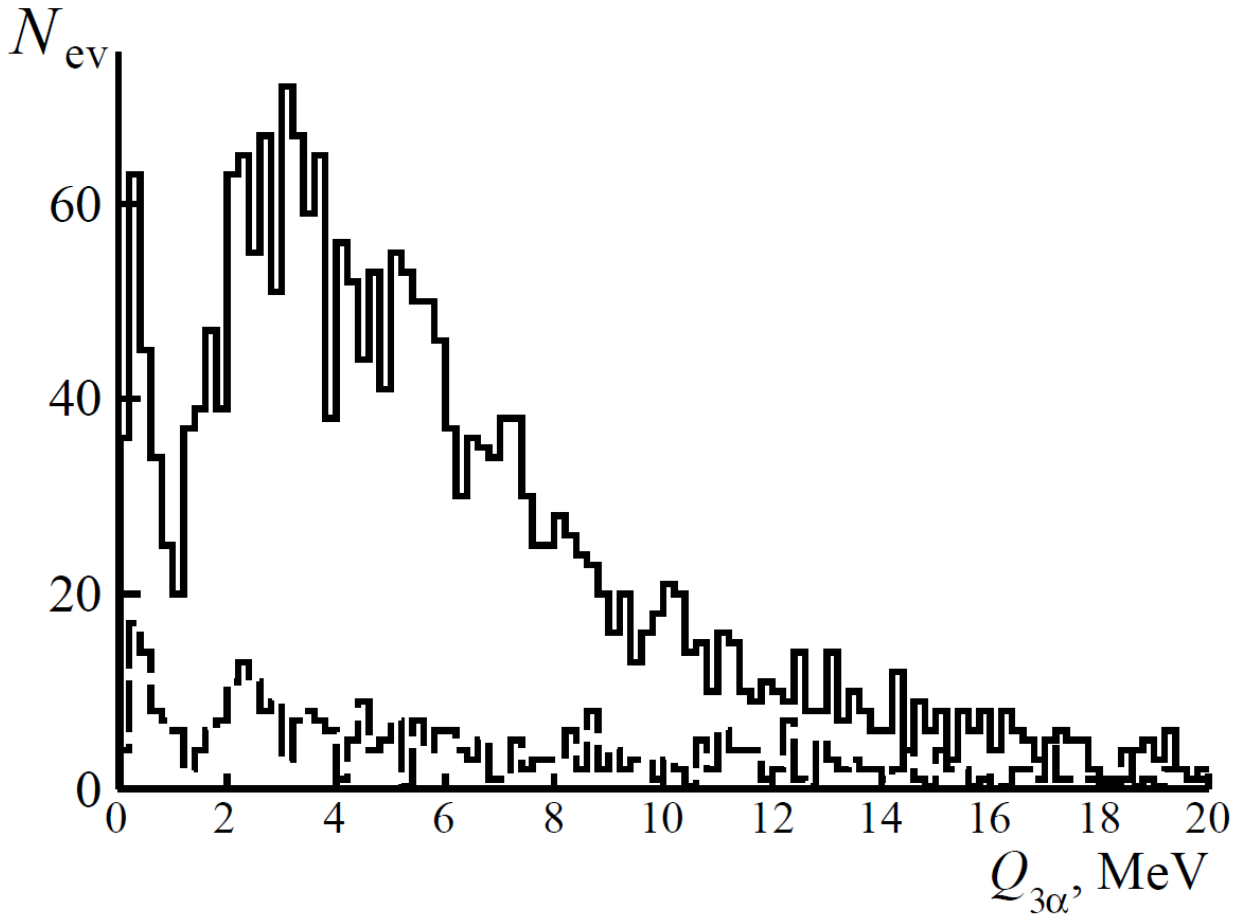


Рис. 5. Распределение по инвариантной массе $Q_{3\alpha}$ всех α -троек в диссоциации $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (424 события, штриховая линия) и $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ (641 событие, сплошная) при 3.65 А ГэВ.

Определение инвариантной массы троек α -частиц $Q_{3\alpha}$ по их углам испускания в приближении сохранения скорости родительского ядра обеспечивает достаточную точность идентификации HS на фоне более высоких 3α -возбуждений ядра ^{12}C (рис. 5). Вклад распадов HS в диссоциацию $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ при $Q_{3\alpha} < 700$ кэВ составляет $10 \pm 2\%$. В случае когерентной диссоциации $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ он достигает $22 \pm 2\%$ (рис. 6) при доле канала $^{16}\text{O} \rightarrow 2^8\text{Be}$ равной 5%. Тем самым, получает поддержку гипотеза о HS как универсальном

ядерно-молекулярном 3α -объекте, подобном нестабильному 2α -ядру ${}^8\text{Be}$. Обращает на себя внимание тот факт, что увеличение комбинаций α -частиц приводит к заметному росту вклада HS в диссоциацию ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$. Анализ инвариантных масс α -квартетов дает оценку вклада распадов состояния ${}^{16}\text{O} 0^+_6$ в $7 \pm 2\%$. Следовательно, в образовании HS доминирует прямая диссоциация $\alpha + \text{HS}$. Анализ фрагментации ядра ${}^{22}\text{Ne}$ выявил образование HS только в 4α -канале, для которого доля событий с HS составила $15 \pm 4\%$. Имея недостаточную статистическую обеспеченность, этот результат служит ориентиром для продолжения поиска α -ансамблей путем ускоренного сканирования по площади слоев ЯЭ.

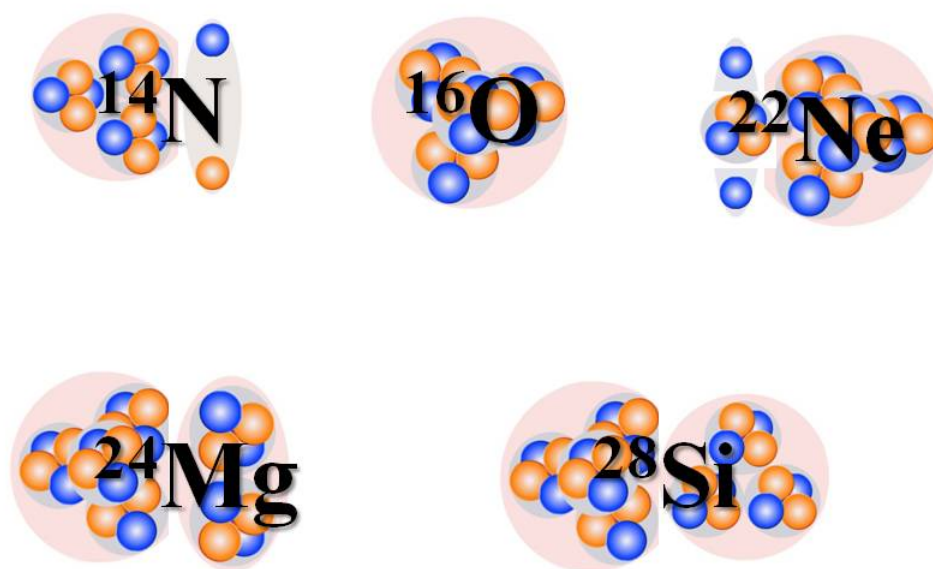


Рис. 6. Диаграмма α -частичных степеней свободы в ядрах тяжелее ${}^{12}\text{C}$.

Применение этих наблюдений состоит в проверке универсальности HS и поиске более тяжелых α -конденсатных состояний в имеющих слоях ЯЭ, облученных соседними ядрами. В этих случаях можно идентифицировать распады ${}^8\text{Be}$ и, следовательно, HS. Несмотря на прошедшие десятилетия, этот экспериментальный материал прекрасно сохранился. Ближайшим источником HS является периферическая диссоциация ядра ${}^{14}\text{N}$, в которой лидирует канал $3\text{He} + \text{H}$ с вкладом распадов ${}^8\text{Be}$ около 25% (рис. 6). Анализ слоев ЯЭ, облученных релятивистскими ядрами ${}^{14}\text{N}$ [13], возобновлен в контексте проблемы HS, а также роли нестабильного ядра ${}^9\text{B}$. Подобный анализ будет осуществлен в

слоях ЯЭ, которые облучались релятивистскими ядрами ^{22}Ne и ^{28}Si и использовались для обзорного анализа. Кроме того, существует достаточное количество слоев ЯЭ, облученных на CERN SPS ядрами ^{32}S энергией 200 А GeV. И в этом случае возможна идентификация распадов ^8Be , а, значит, и HS. Статистика составит десятки событий, в которых могут присутствовать распады HS. Потенциально, решение вопроса об универсальности HS откроет горизонт поиска более сложных систем с участием HS и ^8Be . Ранее, образование ^8Be было установлено при облучении ЯЭ ядрами Pb на CERN SPS. В этой связи представляет интерес изучение возможности образования HS и в случае диссоциации тяжелых ядер.

В целом, легкие ядра служат источниками для генерации простейших конфигураций легчайших кластеров и нуклонов. Будучи интересным само по себе, их исследование дает основу для понимания динамики фрагментации тяжелых ядер, а в практическом плане является апробацией методов анализа. Поэтому необходимо продолжение ведущихся исследований на основе выполненных облучений ЯЭ.

2.1.3 Состав диссоциации тяжелых ядер

Исследования легких ядер являются ступенями к изучению сложнейших ансамблей $\text{He} - \text{H} - n$, возникающих в диссоциации тяжелых ядер. Пример события множественной когерентной диссоциации релятивистского ядра Au, приведенный на рис. 7, указывает на ступенчатый «срыв» ионизации. Именно такие события в ЯЭ наблюдаются наилучшим образом, а их распределение по различным каналам заряженных фрагментов, интерпретируется наиболее полно. Стоит задаться вопросом, какая физика лежит в основе «катастрофического» разрушения, представленного на рис. 7?

События множественной фрагментации релятивистских ядер вплоть до полного разрушения на легчайшие ядра и нуклоны без видимого возбуждения ядер мишени надежно наблюдались в ядерной эмульсии для ядер Au и Pb и даже U. Существование этого явления не вызывает сомнения. Возможно, что в нем подтверждается существенная роль квантово-электродинамического взаимодействия. Заряды тяжелых ядер делают возможными многофотонные обмены и переходы в многочастичные состояния (рис. 8). Альтернативный сценарий когерентной диссоциации состоит в обмене виртуальными мезонами. Возможна интерференция электромагнитного и сильного взаимодействия.

Диссоциация тяжелых ядер ведет к появлению многочастичных состояний с кинематическими характеристиками, которые представляют ядерно-астрофизический интерес и которые невозможно сформировать в других лабораторных условиях. Обращение «стрелы времени» в таких событиях наводит на идею о синтезе элементов

через фазу нуклонов и легчайших ядер (рис. 7). Масштаб энергии фрагментов в системе родительского ядра охватывает температуру 10^{8-10} К от красного гиганта до сверхновой. В таких разреженных нуклонных ансамблях радикально ослабляется кулоновское отталкивание. Будучи рассмотрена в макроскопическом масштабе, такая “ядерная упаковка” может служить источником гравитационных волн.

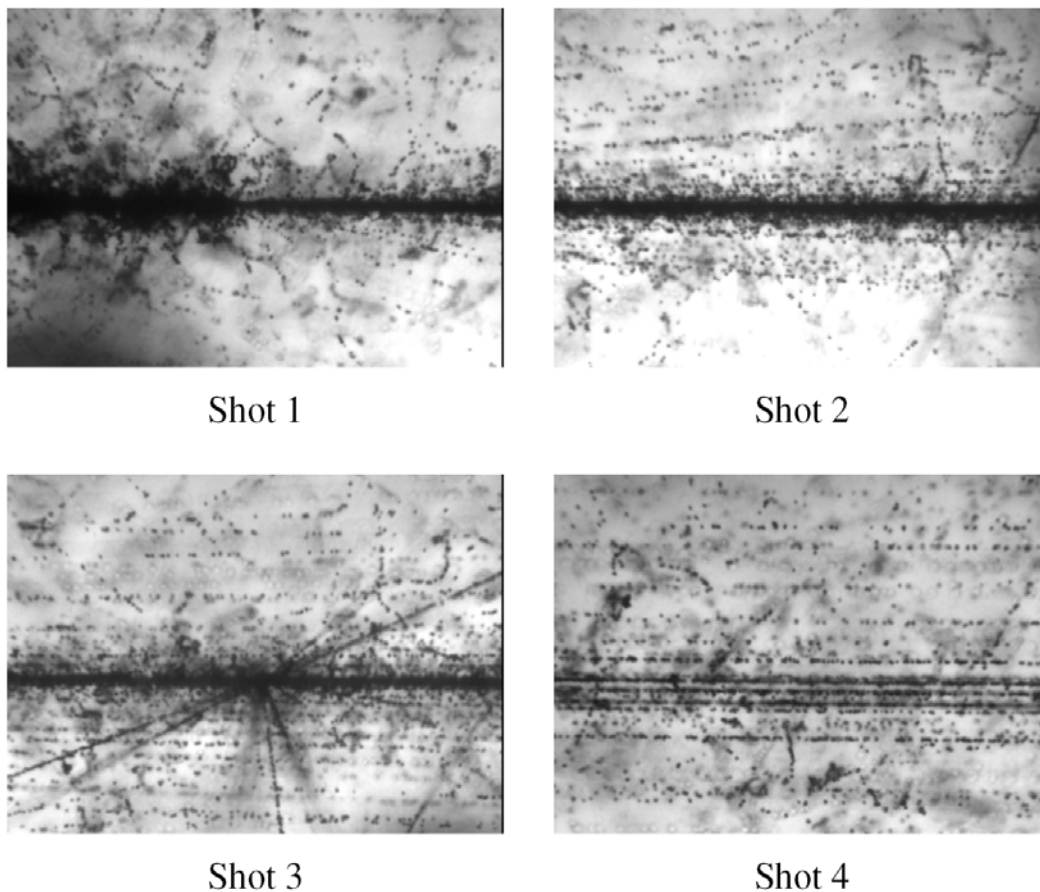


Рис. 7. Последовательно сфотографированное событие периферического взаимодействия ядра ^{194}Au с энергией 10 А ГэВ в ядерной эмульсии: след первичного ядра и вершина взаимодействия, из которой исходит только струя фрагментов (кадр 1); ствол ливня с появляющимися следами однозарядных и двухзарядных частиц (кадр 2); сердцевина ливня со вторичной звездой (кадр 3); полностью разрешенная сердцевина (кадр 4 в 3 см от вершины).

Предлагается использовать уникальные и, вместе с тем, хорошо проверенные возможности метода ЯЭ для углубленного исследования периферической диссоциации тяжелых ядер с энергией несколько ГэВ на нуклон. Для характеристики возникающего состояния определяется соотношение релятивистских нейтронов и изотопов $^{1,2,3}\text{H}$ и $^{3,4}\text{He}$, а по углам эмиссии их поперечные импульсы. Будучи возможным в принципе, трудоемкий

анализ изотопического состава релятивистских фрагментов методом рассеяния не применялся в 90-е годы при пионерских облучениях ядрами Au при 10 А ГэВ [14-17]. Хотя образование вторичных звезд нейтронами в конусе фрагментации было замечено, задачи их исследования поставлены не были. Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ будет сосредоточен на этих вопросах.

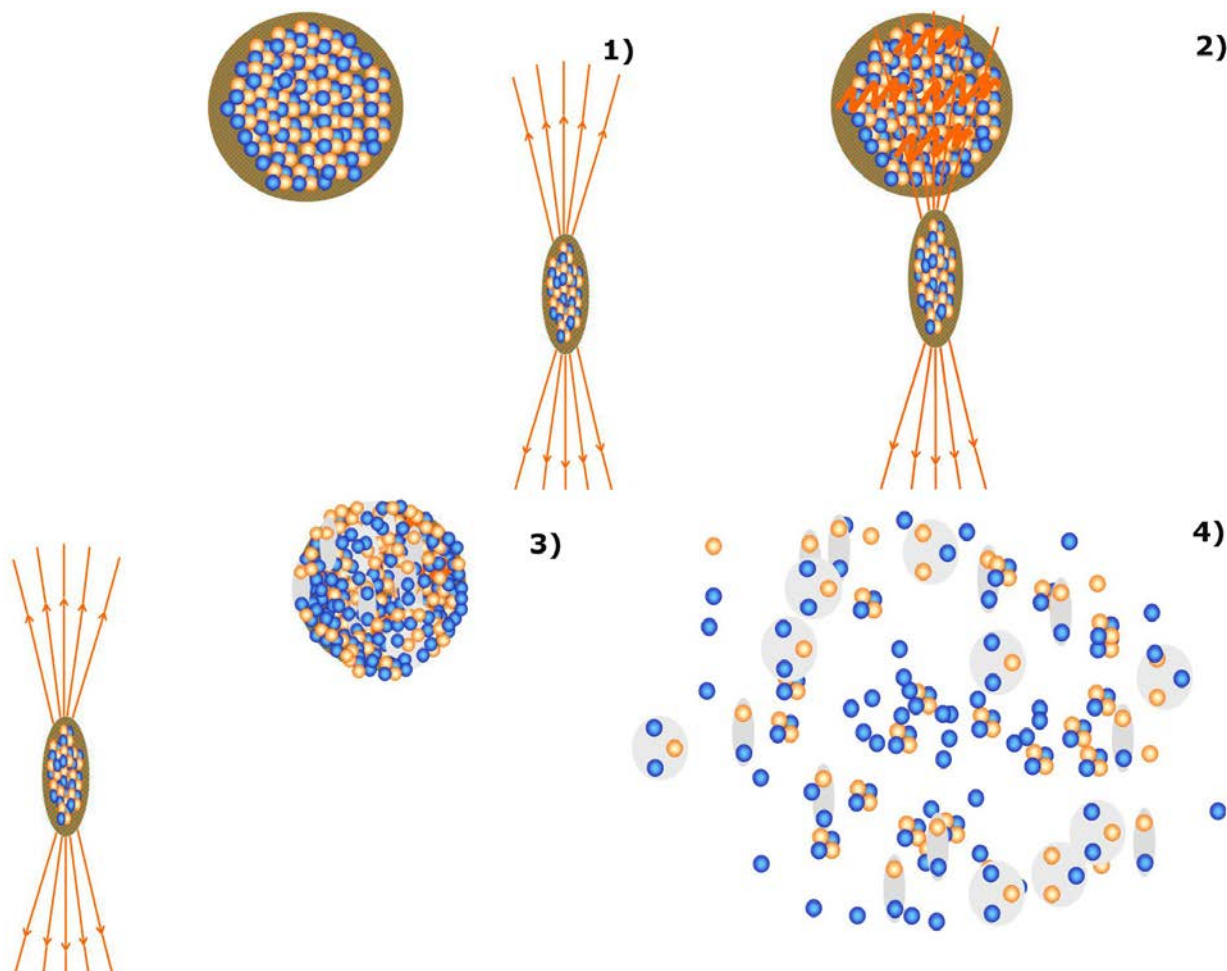


Рис. 8. Сценарий когерентной диссоциации тяжелого ядра в электромагнитном поле тяжелого ядра мишени. Ядра сближаются с прицельным параметром большим, чем их радиусы (1). Пересечение электромагнитного поля ядра мишени ведет к поглощению нескольких виртуальных фотонов и возбуждению налетающего ядра (2). Налетающее ядро превращается в ансамбль легчайших фрагментов и нуклонов (3). Ансамбль распадается (4).

В релятивистской диссоциации тяжелых ядер происходит образование легких фрагментов с большим отношением заряда к массовому числу, чем у первичного ядра, обуславливая возникновение ассоциированных нейтронов. Средний пробег нейтронов в ЯЭ около 32 см. Эти нейтроны должны обнаруживать себя в конусе фрагментации по вторичным звездам, не содержащим входящего следа. Частота таких «нейтронных» звезд

должна расти с ростом числа легчайших ядер в конусе фрагментации. Достигая десятков, множественность нейтронов в событии может быть оценена по пропорциональному уменьшению среднего пробега до образования «нейтронных» звезд на длинах порядка нескольких сантиметров. Координаты вершины взаимодействия определяются с точностью характерной для ЯЭ (не хуже 0.5 $\mu\text{м}$), что позволяет восстановить углы эмиссии нейтронов с наилучшей точностью. Измерения соседних следов могут быть использованы для компенсации возможной дисторсии. В случае полной диссоциации тяжелого ядра число нейтронов может оцениваться по изотопическому составу релятивистских фрагментов Н и Не. Значителен ли выход дейтронов и тритонов, связывающих нейтроны? Ответ на этот вопрос может иметь также и прикладное значение.

На начальном этапе анализируются имеющиеся слои ЯЭ толщиной 500 $\mu\text{м}$ на статистике десятков периферических взаимодействий ядер Кr (2 А ГэВ, GSI), Au (10 А ГэВ, BNL) и Рb (159 А ГэВ, ЦЕРН) с целью определения зависимости вклада нейтронов от степени диссоциации этих ядер. В первую очередь будет вестись детальный анализ «золотых» событий когерентной диссоциации тяжелых ядер. Обоснованность выводов будет определяться числом найденных нейтронных вершин, а также числом измеренных и идентифицированных следов Н и Не.

2.1.4 Фрагментация вызванная мюонами

Механизм диссоциации релятивистских ядер в периферических взаимодействиях остается не проясненным. Возможно, что проявляется многофотонный обмен между ядрами пучка и мишени. Альтернатива состоит в обмене виртуальными мезонами. В качестве критического теста может служить фрагментация ядер из состава ЯЭ под действием релятивистских мюонов [18-20]. В этом случае фрагментация может возникать в результате перехода обменных фотонов в пары виртуальных мезонов. Такая комбинация обеспечивает дальнодействие при эффективном разрушении ядер и может быть распространена на периферические взаимодействия релятивистских ядер. В этой связи следует провести поиск возможно более полного разрушения тяжелых ядер из состава ЯЭ (Ag и Br) под действием релятивистских мюонов.

Случаи фрагментации ядер мишени на три b -частицы наиболее вероятны для развала $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$. В этих событиях на основе координатных измерений следов определяются пробеги и углы эмиссии α -частиц. Значения энергии α -частиц извлекаются из сплайн-интерполяции расчета энергия-пробег по известной модели SRIM. На этой основе можно получить распределения по инвариантной массе, а также по полному

импульсу пар и троек α -частиц. Процедура реконструкции инвариантной массы была апробирована при реконструкции основного состояния ${}^8\text{Be}_{0+}$ в облучении ЯЭ нейтронами 14.1 МэВ и первого возбужденного ${}^8\text{Be}_{2+}$ при имплантации ядер ${}^8\text{He}$ в ЯЭ. Этот опыт будет применен к облучению релятивистскими мюонами. Предварительно установлено, что распределению по полному поперечному импульсу троек α -частиц, рожденных, расщеплениях ядер ${}^{12}\text{C}$ отвечает не электромагнитная, а ядерная дифракция. Определение сечения 3α -расщепления имеет значение для геофизики, поскольку позволит проверить гипотезу о генерации гелия в глубинах земной коры космическими мюонами.

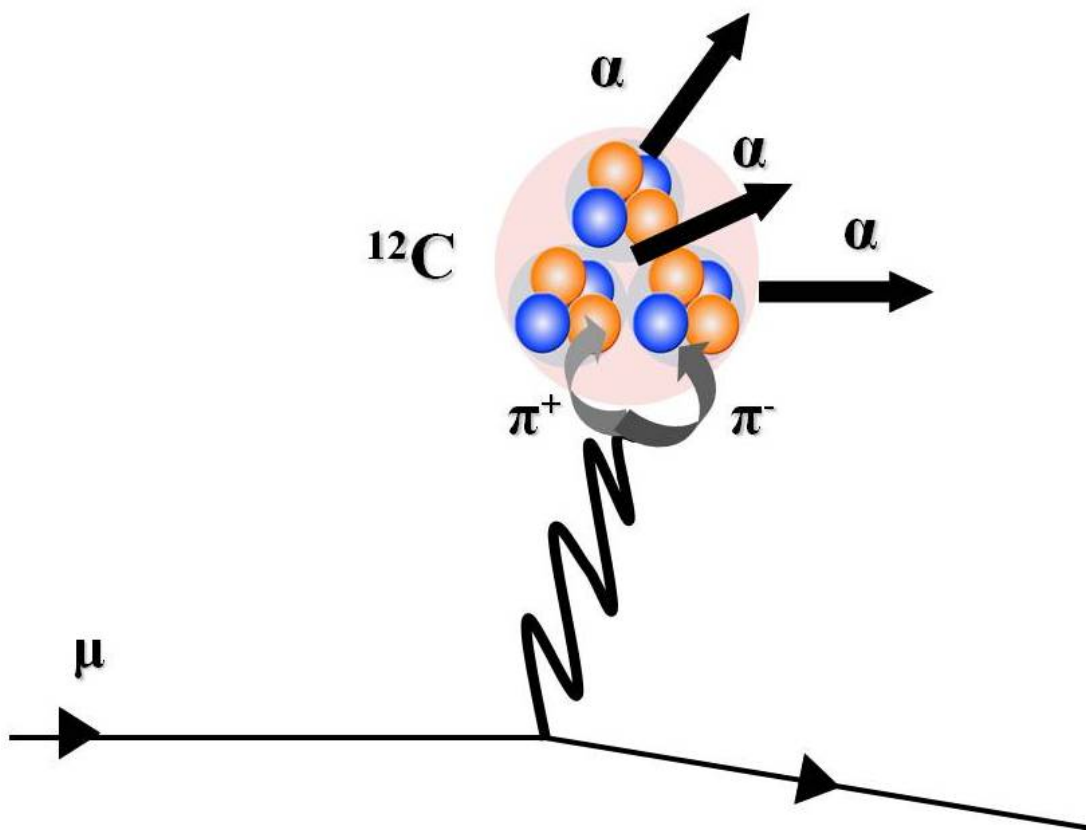


Рис. 9. Развал ядра ${}^{12}\text{C}$ на три α -частицы релятивистским мюоном.

Для начала исследований с мюонами также имеется значительный запас слоев ЯЭ, облученных в мюонном «факеле» ИФВЭ (Протвино) в течение трех недель в апреле 2018 г. Средняя энергия мюонов составила около 2.5 ГэВ. Перпендикулярно пучку были облучены три стопки по 10 слоев с толщиной ЯЭ по 100 мкм и три по 10 слоев с толщиной по 200 мкм. Рядом был расположен сцинтилляционный монитор $8 \times 8 \text{ см}^2$. Потоки мюонов через слои ЯЭ составили 9.3×10^6 , 45×10^6 и 57×10^6 . Градации потока позволяют измерять при малой загрузке наиболее вероятные 3α -расщепления, а затем перейти к более редким, но более ярким большим звездам. Кроме того, три стопки (2 по 10 слоев 100 мкм и 1 по 10 200 мкм) были облучены во вторичном пучке адронов при

энергии 6 ГэВ, что позволяет сравнить топологии фрагментации. Примерное соотношение адронов в пучке: пионы - 60%, протоны - 35% и каоны - 5%.

Поперечные облучения слоев ЯЭ в гало пучка мюонов 160 ГэВ длительностью до суток были выполнены в ЦЕРН в 2017 г. Была продемонстрирована пригодность этого материала для анализа и соответствие топологии фрагментации данным при 2.5 ГэВ. Косвенная оценка указывает на сильный рост сечения образования ядерных звезд. Однако в этом облучении отсутствовал как монитор пучка, так и оценка примеси адронов.

В мюонном пучке эксперимента COMPASS примесь адронов не превышает 10^{-6} , и возможно краткое облучение приемлемой плотности в дефокусированном пучке. Для эффективного наблюдения вторичных следов облучаемая стопка будет состоять из бесподложечных слоев толщиной 500 мкм. Облучение будет выполнено согласно плану эксперимента COMPASS.

2.2 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.

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. Ее стоимость составляет около 5000 \$, Тиражирование этого изделия требует первоочередного финансирования.

Вместе с тем, поставленные фундаментальные задачи и накопленная методическая культура заслуживают обновления на основе моторизованного микроскопа VX63 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. 10 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 VX63 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.

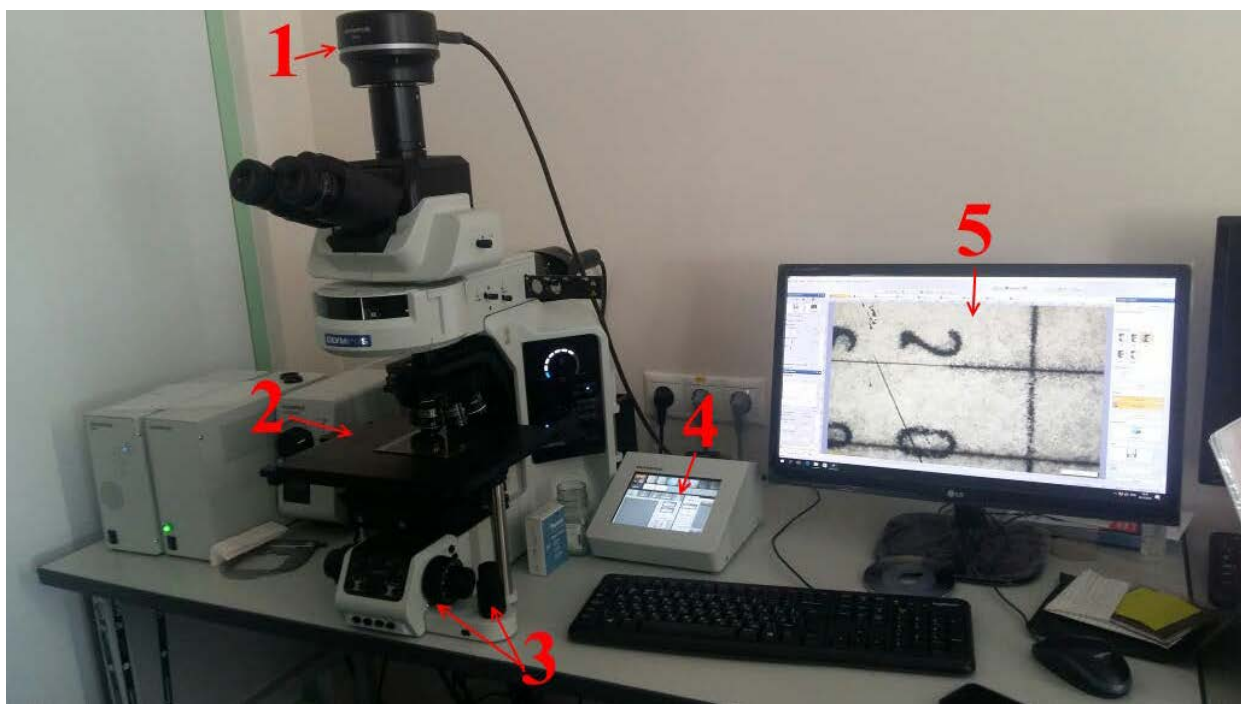


Рис. 10. Фотография микроскопа VX63. Отмечены: 1) цифровая камера DP74, 2) моторизованный предметный столик, 3) джойстики управления фокусом и перемещением предметного столика в плоскости XOY, 4) блок управления микроскопом, 5) ПК для работы с получаемым изображением.

Список литературы

1. Zarubin P.I.: “Tomography” of the cluster structure of light nuclei via relativistic dissociation. Lect. Notes in Physics, Clusters in Nuclei, 875(3), 51(2014), Springer Int. Publ.; <https://arxiv.org/abs/1309.4881>.
2. Artemenkov D.A., Zaitsev A.A., and Zarubin P.I.: Unstable nuclei in dissociation of light stable and radioactive nuclei in nuclear track emulsion. Phys. Part. Nucl. 48, 147–157(2017); <https://arxiv.org/abs/1607.08020>.

3. Artemenkov D.A. *et al.*: Nuclear track emulsion in search for the Hoyle-state in dissociation of relativistic ^{12}C nuclei. *Rad. Meas.*, 119, 119(2018); <https://arxiv.org/abs/1812.09096>.
4. Zarubin P.I.: Recent applications of nuclear track emulsion technique. *Phys. At. Nucl.*, **79** 1525(2016); <http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/PHAN1525.pdf>.
5. Bradnova V. *et al.*: Experimental Exposure of nuclear emulsion by Xenon nuclei at the JINR Nuclotron. *Phys. Part. Nucl., Lett.*, 8, 562(2011); http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/Xe_PHPL562.pdf.
6. Artemenkov D.A. *et al.*: Toward ternary fission accompanied by the ^8Be nucleus. <https://arxiv.org/abs/1902.04407>.
7. Freer M., Fynbo H.O.U.: The Hoyle state in ^{12}C . *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 78, 1(2014); <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641014000453?via%3Dihub>.
8. Tohsaki A., Horiuchi H., Schuck P. and Röpke G.: Status of α -particle condensate structure of the Hoyle state. *Rev. Mod. Phys.*, 89, 011002 (2017); <https://arxiv.org/abs/1702.04591>.
9. Schuck P.: Recent theoretical advances and open problems in nuclear cluster physics. <https://arxiv.org/abs/1811.11580>.
10. Belaga V.V., Benjaza A.A., Rusakova V.V., Salomov D.A., Chernov G.M.: Coherent dissociation $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ in lead-enriched emulsion at 4.5 GeV/c per nucleon. *Phys. Atom. Nucl.*, 58, 1905 (1995); <https://arxiv.org/abs/1109.0817>.
11. Andreeva N.P. *et al.*: Coherent dissociation $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ in photoemulsion at incident momentum of 4.5 GeV/c per nucleon. *Phys. At. Nucl.*, 59, 102(1996); <https://arxiv.org/abs/1109.3007>.
12. El-Naghy A. *et al.*: Fragmentation of ^{22}Ne in emulsion at 4.1 A GeV/c. *J. Phys. G*, 14, 1125 (1988); <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0305-4616/14/8/015>.
13. Shchedrina T.V. *et al.*: Peripheral interactions of relativistic ^{14}N nuclei with emulsion nuclei. *Phys. At. Nucl.*, 70, 1230 (2007); <https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0605022>.
14. Adamovich M.I. *et al.*: Multifragmentation of Gold nuclei in the interactions with photoemulsion nuclei at 10.7 GeV/nucleon; *Z. Phys. A* 359, 277 (1997); <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs002180050403>.
15. Cherry M.L. *et al.*: Fragmentation and particle production in interactions of 10.6 GeV/N gold nuclei with hydrogen, light and heavy targets. *Eur. Phys. J. C*, 5, 641 (1998); <http://becquerel.jinr.ru/text/reprints/EXM7D72VX94PRXAM.pdf>.
16. Adamovich M.I. *et al.*: Critical behaviour in Au fragmentation at 10.7A GeV. *Eur. Phys. J. A*, 1, 77 (1998); <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs100500050034>.

17. Adamovich M.I. *et al.*: Fragmentation and multifragmentation of 10.6A GeV gold nuclei. Eur. Phys. J. A, 5, 429 (1999); <https://arxiv.org/abs/hep-ph/9809289>.
18. Kirk J.A., Cottrell D.M., Lord J.J. and Piserchio R.J. Inelastic muon interactions in nuclear emulsion at 2.5 and 5.0 GeV. Il Nuovo Cim., XL, 523(1965); <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBBF02721042.pdf>.
19. Jain P. L., Sengupta K. and Singh G.: Nucl. Phys. B, 301, 517 (1988); <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0550321388902751?via%3DIuh>.
20. Artemenkov D.A. *et al.*: Study of nuclear multifragmentation induced by ultrarelativistic μ -mesons in nuclear track emulsion. J. Phys.: Conf. Series, 675, 022022 (2016); <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/675/2/022022>.

2.3 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 “Tomography” of the cluster structure of light nuclei via relativistic dissociation” Lecture Notes in Physics, **875**, Clusters in Nuclei, Volume 3. Springer Int. Publ., 51(2013); arXiv:1309.4881.
2. K.Z. Mamatkulov *et al.* “Dissociation of ^{10}C Nuclei in Nuclear Track Emulsion at Energy of 1.2 GeV per Nucleon” Phys. At. Nucl. **76** 1224(2013); arXiv:1309.4241.
3. R.R. Kattabekov *et al.* “Coherent dissociation of relativistic ^{12}N nuclei” Physics of Atomic Nuclei **76** 1219(2013); arXiv:1310.2080.
4. N.K. Kornegrutsa *et al.* «Clustering features of the ^7Be nucleus in relativistic fragmentation» Few Body Syst. **55** 1021(2014); arXiv:1410.5162.
5. D.A. Artemenkov *et al.* “Charge topology of the coherent dissociation of relativistic ^{11}C and ^{12}N nuclei” Phys. At. Nucl. **78** 794(2015); arXiv:1411.5806.
6. A.A. Zatsev *et al.* “Dissociation of Relativistic ^{10}B Nuclei in nuclear track emulsion” Phys. Part. Nucl. **48** 960(2017); DOI:10.1134/S1063779617060612.
7. 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.
8. 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).
9. D.A. Artemenkov *et al.* “Recent findings in relativistic dissociation of ^{10}B and ^{12}C nuclei” Few Body Syst. **58** 89(2017).
10. R.R. Kattabekov *et al.* “Correlations of α -particles in splitting of ^{12}C nuclei by neutrons of energy of 14.1 MeV” Yadernaya Fizika **76** (additional issue) 88(2013); arXiv:1407.4575.
11. D.A. Artemenkov *et al.* « ^8He nuclei stopped in nuclear track emulsion», Few Body Syst. **55** 733 (2014); arXiv:1410.5188.
12. D.A. Artemenkov *et al.* “Irradiation of nuclear track emulsions with thermal neutrons, heavy ions, and muons” Phys. At. Nucl. **78** 579(2015).
13. D.A. Artemenkov *et al.* «Exposure of nuclear track emulsion to at the ACCULINNA separator» Phys. Part. Nucl., Lett. **10** 415(2013); arXiv:1309.4808.

14. K.Z. Mamatkulov *et al.* “Toward an automated analysis of slow ions in nuclear track emulsion” *Phys. Procedia* **74** 59(2015); arXiv:1508.02707.
15. K.Z. Mamatkulov *et al.* ”Experimental examination of ternary fission in nuclear track emulsion” *Phys. Part. Nucl.* **48** 910(2017).
16. P.I. Zarubin “Recent applications of nuclear track emulsion technique” *Phys. At. Nucl.* **79** 1525(2016).
17. 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).
18. 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).
19. 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.
20. 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**

| 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. | 15 | 5 | 5 | 5 | | |
| | Строительство/ремонт помещений | | | | | | |
| | Материалы | 30 | 10 | 10 | 10 | | |
| Необходимые ресурсы | Нормо-час Ресурсы – конструкторского бюро лаборатории, – опытного производства ОИЯИ, – опытного производства лаборатории, – ускорителя, – реактора, – ЭВМ. Эксплуатационные расходы | | | | | | |
| Источники финансирования | Бюджетные средства | 45 | 15 | 15 | 15 | | |
| | 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 на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/НИСА (Проект БЕККЕРЕЛЬ)

| 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. | 15 | 5 | 5 | 5 |
| 4. | Конструкторское бюро | нормо-час | | | |
| 5. | Опытное производство | нормо-час | | | |
| 6. | Материалы, тыс. долл. | 30 | 10 | 10 | 10 |
| 7. | Оборудование, тыс. долл. | 15 | 5 | 5 | 5 |
| 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: | 180 | 60 | 60 | 60 |

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛАБОРАТОРИИ



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,

A handwritten signature in black ink that reads "Joseph B. Natowitz".

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

Тема: Об участии в совместном проекте Беккерель
От: <olimov@uzsci.net>
Дата: 10/9/2019, 8:44 AM
Кому: <zarubin@lhe.jinr.ru>
Копия: "'Rasul Kattabekov'" <rasul_kattabekov@list.ru>

Уважаемый Павел Игоревич!

Мы, сотрудники Лаборатории физики высоких энергий ФТИ АН РУз, с удовольствием хотим участвовать в новом проекте коллаборации Беккерель. Планируем командировать наших молодых сотрудников м.н.с.

к.ф.-м.н. Курбонова Анвара и м.н.с. Умарова Кобилбека для стажировки в Ваш сектор ориентировочно с января 2020 г. для освоения методики просмотра и измерений на микроскопе событий фрагментаций релятивистских ядер, наблюдаемых в ядерной эмульсии. Было бы здорово, если Вы сможете предоставить нам один электронный микроскоп для проведения просмотра и измерительных процедур у нас в лаборатории в Ташкенте.

С Уважением,

Зав. лаб. ФВЭ ФТИ АН РУз

Косим Олимов

Тема: RE: список участников коллаборации от ЛФВЭ ФТИ

От: <olimov@uzsci.net>

Дата: 10/10/2019, 10:13 AM

Кому: "'Pavel Zarubin LHEP, JINR'" <zarubin@lhe.jinr.ru>

Здравствуйте, дорогой Павел Игорьевич, направляю Вам список участников коллаборации от нашей лаборатории.

- 1) Д.ф.-м.н., проф. Косим Олимов (K. Olimov, зав. лаб.)
- 2) Д.ф.-м.н. Хусниддин Косимович Олимов (Kh. K. Olimov, г.н.с.)
- 3) К.ф.-м.н. Владимир Вильевич Луговой (V.V. Lugovoi, с.н.с.)
- 4) К.Ф.-м.н. Анвар Раззакович Курбонов (A.R. Kurbonov, м.н.с.)
- 5) Алишер Косимович Олимов (A.K. Olimov, м.н.с.)
- 6) Кобил Исомитдинович Умаров (K.I. Umarov, м.н.с.)
- 7) Улугбек Учқунович Абдурахманов (U.U. Abdurakhmanov, м.н.с.)