

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОДЛЕНИЯ  
ПРОЕКТА  
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о проекте**

**1.1. Шифр проекта 02-1-1087-2009**

**1.2. Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина**

**1.3. Научное направление Физика элементарных частиц и релятивистская ядерная физика (02)**

**1.4. Наименование проекта «Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ2023 на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/НИСА»**

**1.5. Руководитель проекта Зарубин П.И.**

**1.6. Заместитель руководителя проекта Зайцев А.А.**

**2. Научное обоснование и организационная структура**

**2.1. Аннотация**

Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ нацелен на решение актуальных проблем физики ядерных кластеров. Используемый метод ядерной эмульсии (ЯЭ) позволяет благодаря уникальной чувствительности и пространственному разрешению изучать в едином подходе множественные конечные состояния, возникающие в диссоциации релятивистских ядер. Прогресс на этом направлении опирается компьютеризованную микроскопию.

В настоящее время в фокусе исследования находится концепция  $\alpha$ -частичного конденсата Бозе-Эйнштейна ( $\alpha$ ВЕС) – предельно холодного состояния нескольких S-волновых  $\alpha$ -частиц вблизи порогов связи. Нестабильное ядро  ${}^8\text{Be}$  описывается как  $2\alpha$ ВЕС, а возбуждение  ${}^{12}\text{C}(0^+_{2})$  или состояние Хойла (HS) как  $3\alpha$ ВЕС. Распады  ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  и  ${}^{12}\text{C}(0^+_{2}) \rightarrow {}^8\text{Be}\alpha$  могут служить сигнатурами более сложных распадов  $n\alpha$ ВЕС. Так состояние  $0^+_{6}$  ядра  ${}^{16}\text{O}$  при 660 кэВ над  $4\alpha$ -порогом, рассматриваемое как  $4\alpha$ ВЕС, может последовательно распадаться  ${}^{16}\text{O}(0^+_{6}) \rightarrow \alpha{}^{12}\text{C}(0^+_{2})$  или  ${}^{16}\text{O}(0^+_{6}) \rightarrow 2{}^8\text{Be}(0^+)$ . Его поиски ведутся в нескольких экспериментах по фрагментации легких ядер при низких энергиях. Подтверждение

существования этой и более сложных форм  $\alpha$ ВЕС могло бы дать основу для расширения сценариев синтеза средних и тяжелых ядер в ядерной астрофизике.

Рассмотрение  $\alpha$ ВЕС как инвариантного явления указывает на возможность его поиска в релятивистской фрагментации. Практическую альтернативу обеспечивают слои ЯЭ, продольно облученные релятивистскими ядрами. Инвариантная масса ансамблей фрагментов He и H может быть определена по углам испускания в приближении сохранения импульса на нуклон родительского ядра. Благодаря предельно малым значениям энергии и ширин, распады  ${}^8\text{Be}$  и HS, а также  ${}^9\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + p$  идентифицируются во фрагментации легких ядер ограничением сверху на инвариантную массу.

Будучи апробирован, этот подход стал применяться для идентификации  ${}^8\text{Be}$  и HS и поиска более сложных состояний  $n\alpha$ ВЕС во фрагментации средних и тяжелых ядер. Недавно на статистике десятков распадов  ${}^8\text{Be}$  обнаружено возрастание вероятности обнаружения  ${}^8\text{Be}$  в событии с ростом числа релятивистских  $\alpha$ -частиц. Сделан предварительный вывод о том, что вклады распадов  ${}^9\text{B}$  и HS также растут. Экзотически большие размеры и времена жизни  ${}^8\text{Be}$  и HS позволяют предположить возможность синтеза  $\alpha$ ВЕС последовательным соединением возникающих  $\alpha$ -частиц  $2\alpha$ .

Главная задача предстоящего этапа проекта – прояснение связи между возникновением  ${}^8\text{Be}$  и HS и множественностью  $\alpha$ -ансамблей и поиск на этой основе распадов состояния  ${}^{16}\text{O}(0^+_6)$ . В этой связи эксперимент БЕККЕРЕЛЬ нацелен на измерение множественных каналов фрагментации ядер  ${}^{84}\text{Kr}$  до 1 ГэВ на нуклон. Имеется достаточное количество слоев ЯЭ, поперечное сканирование которых на моторизованном микроскопе Olympus VХ63 позволяет достичь требуемой статистики. Вместе с тем, необходима модернизация имеющихся микроскопов МБИ-9, KSM и МПЭ-11 для продолжения прецизионных измерений согласно апробированным процедурам.

В продолжение исследования фрагментации легких ядер начат поиск распадов изобар-аналоговых состояний (ИАС), в том числе в возбуждениях  ${}^8\text{Be}^*$  и  ${}^9\text{B}^*$ . Проявляясь при высокой энергии возбуждения, но также имея весьма малые ширины, ИАС служат “маяками” перестройки структуры в направлении сходства с их менее стабильными изобарами. В контексте  $n\alpha$ ВЕС и ИАС продолжится анализ облучения ЯЭ ядрами  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{22}\text{Ne}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$ ,  ${}^{28}\text{Si}$ .

Поиски  $n\alpha$ ВЕС и ИАС ведут к изучению ядерной материи с температурой и плотностью от красных гигантов до сверхновых. В этом отношении слои ЯЭ, облученные тяжелыми ядрами при энергии несколько ГэВ на нуклон ускорительного комплекса NICA позволят исследовать в оптимальных условиях релятивистские ансамбли изотопов H и He беспрецедентной множественности. Особые преимущества метода ЯЭ проявятся для ядер на границе протонной стабильности, что потребует формирования вторичных пучков (например,  ${}^{31}\text{Ar}$ ).

## 2.2. Научное обоснование

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых аспектов ядерной структуры является наличие степеней свободы, в которых квартеры спаренных по спину протонов и нейтронов ведут себя как составляющие кластеры, проявляющиеся в образовании  $\alpha$ -частиц в ядерных реакциях и распадах [1]. Изучение ансамблей  $\alpha$ -частиц сразу над порогами связи позволяет выявить роль нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$  и  $3\alpha$ -состояния Хойла (HS) и искать их аналоги.

Энергия распада  ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  составляет всего  $E_{\text{th}}({}^8\text{Be}) = 91.8$  кэВ, а ширина  $\Gamma({}^8\text{Be}) = 5.57 \pm 0.25$  эВ. Ядро  ${}^8\text{Be}$  является непреходящим продуктом распада  ${}^9\text{B}$  и HS. Основное состояние  ${}^9\text{B}$  выше порога  ${}^8\text{Be}p$  на  $E_{\text{th}}({}^9\text{B}) = 185.1$  кэВ при  $\Gamma({}^9\text{B}) = 0.54 \pm 0.21$  кэВ [1]. Состояние HS является вторым (и первым  $\alpha$ -несвязанным) возбуждением ядра  ${}^{12}\text{C}$  (обзор [2]) при  $E_{\text{th}}(\text{HS}) = 378$  кэВ над  $3\alpha$ -порогом. Значение  $\Gamma(\text{HS}) = 9.3 \pm 0.9$  эВ соответствует по порядку величины ширине распада  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ .

Обособленность HS от более высоких возбуждений  ${}^{12}\text{C}$ , указывают на него как  $3\alpha$ -аналог  ${}^8\text{Be}$ . Синтез  ${}^{12}\text{C}$  возможен через слияние  $3\alpha \rightarrow \alpha{}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}(0^+_{2}) \rightarrow {}^{12}\text{C}(+2\gamma$  или  $e^+e^-$  с вероятностью порядка  $10^{-4}$ ). Дальнейший синтез  $\alpha{}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{16}\text{O}\gamma$  через подходящий по энергии уровень  ${}^{16}\text{O}$ , запрещен по четности. Однако, синтез возможен в последовательности  ${}^{12}\text{C}{}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{C}{}^{12}\text{C}(0^+_{2}) \rightarrow {}^{16}\text{O}{}^8\text{Be}$ . Как отмечалось [2], эти обстоятельства определяют отношение распространенностей  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{O}$  во Вселенной. Все эти факты позволяют предположить важность более тяжелых нестабильных состояний в процессах ядерной астрофизики.

Значимость HS не ограничивается ролью возбуждения ядра  ${}^{12}\text{C}$ , хотя и весьма необычного. HS может возникать в реакциях с другими ядрами. Это обстоятельство объединяет HS, как и  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$ , с другими фрагментами.  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^9\text{B}$  и HS могут служить родоначальниками ветвей возбужденных состояний как с тем же составом, так и все более тяжелых. Экзотически большие размеры  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^9\text{B}$  и HS, предсказываемые теоретически (рис. 1), критичны для понимания картины фрагментации в целом и механизма генерации этих объектов в частности.

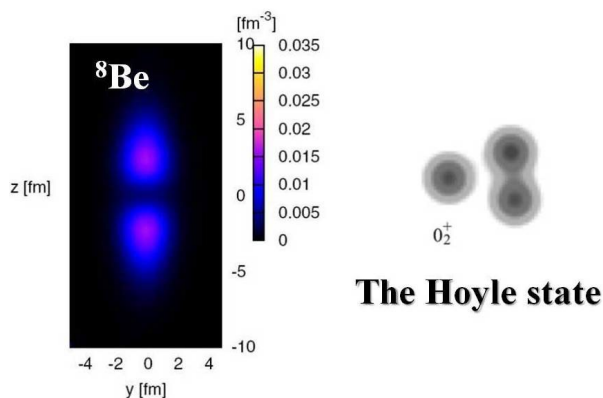


Рис. 1. Расчетные распределения ядерной плотности в основном состоянии  ${}^8\text{Be}$  и состоянии Хойла [2,3].

Современный интерес к ядерной кластеризации в значительной степени мотивирован концепцией  $\alpha$ -частичного конденсата Бозе-Эйнштейна ( $\alpha$ ВЕС), выдвинутой вслед за открытием ультрахолодных квантовых газов (обзор [3]). На рис. 2 представлено положение  $\alpha$ ВЕС на теоретическом “пейзаже” в области наименьшей ядерной плотности и температуры. Проявлением  $\alpha$ ВЕС могут служить некоторые возбуждения  $n\alpha$ -кратных ядер сразу над порогами связи  $\alpha$ -частиц. Сосуществуя с фермионными возбуждениями, такие состояния рассматриваются на основе среднего поля бозонного типа, формируемого газом почти идеальных бозонов в S-состоянии. Они могли бы возникать при средней плотности  ${}^8\text{Be}$ , которая в 4 раза ниже обычной.  ${}^8\text{Be}$  и  $\text{HS}$  описываются как состояния 2- и  $3\alpha$ ВЕС, а их распады могут служить сигнатурами более сложных распадов  $n\alpha$ ВЕС. Существование развитых форм  $\alpha$ ВЕС может расширить бы сценарии нуклеосинтеза в тяжелых ядрах.

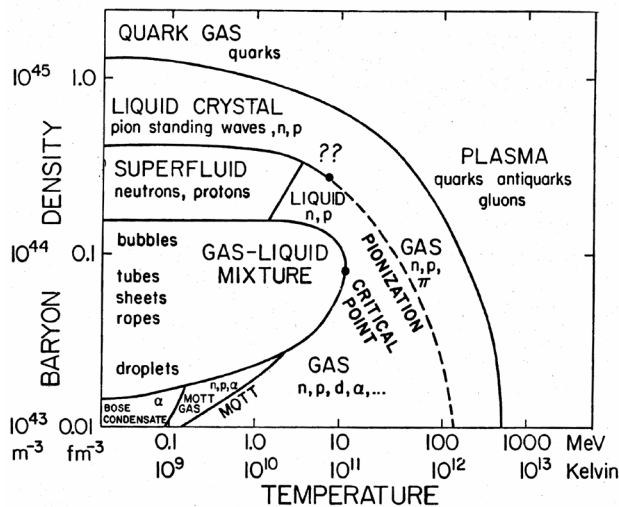


Рис. 2. Теоретический “пейзаж” фазовых состояний ядерной материи.

Предложены экспериментальные подходы к  $\alpha$ ВЕС, среди которых и представляемый здесь (обзор [8]). Поиск состояний, аналогичных  $\text{HS}$ , но более тяжелых, ведется в экспериментах по фрагментации легких ядер при низких энергиях [5-10]. В фокусе –  $4\alpha$ -аналог  $\text{HS}$ , в качестве которого рассматривается состояние  $0^+_6$  ядра  ${}^{16}\text{O}$  при 660 кэВ над  $4\alpha$ -порогом, могущего распадаться на  $\alpha\text{HS}$  или  $2{}^8\text{Be}$ . Рассмотрение  $n\alpha$ ВЕС как слабосвязанных нестабильных состояний указывает на новые возможности их поиска с ростом энергии и массовых чисел порождающих ядер. Весьма ценно продемонстрировать схожесть выводов на основе релятивистской инвариантности.

Применение технически несложного и недорогого метода ЯЭ в пучках релятивистских ядер дает гибкость и единообразие на поисковом этапе, а в теоретическом аспекте – прозрачность интерпретации. При диссоциации релятивистских ядер в узком телесном угле фрагментации интенсивно генерируются ансамбли ядер  $\text{He}$  и  $\text{H}$ . При их детектировании пороги отсутствуют, а потери энергии минимальны. Вследствие минимальной энергии распада  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^9\text{B}$  и  $\text{HS}$ , должны проявляться как пары и тройки с релятивистских фрагментов  $\text{He}$  и  $\text{H}$  с наименьшими углами разлета. Согласно ширинам распады  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^9\text{B}$  и  $\text{HS}$  происходят при пробегах от нескольких тысяч ( ${}^8\text{Be}$  и  $\text{HS}$ ) до нескольких десятков ( ${}^9\text{B}$ ) атомных размеров и должны идентифицироваться минимальной инвариантной массой.

Ответ на этот вызов дал метод ЯЭ, применяемый в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ. В слоях ЯЭ, продольно облученных релятивистскими ядрами, следы фрагментов наблюдаются полностью, а их направления измеряются с наилучшим разрешением. Определение инвариантных масс ансамблей релятивистских фрагментов He и H в приближении сохранения начальной скорости позволяет спроецировать их угловые корреляции на энергетический масштаб, начиная с распадов  $^8\text{Be}$ . Возможности и статус этих исследований представлен в обзорных публикациях [11-13]. Среди достижений – идентификация  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{Be}$ , а также состояния Хойла во фрагментации легких ядер, в том числе радиоактивных [12].

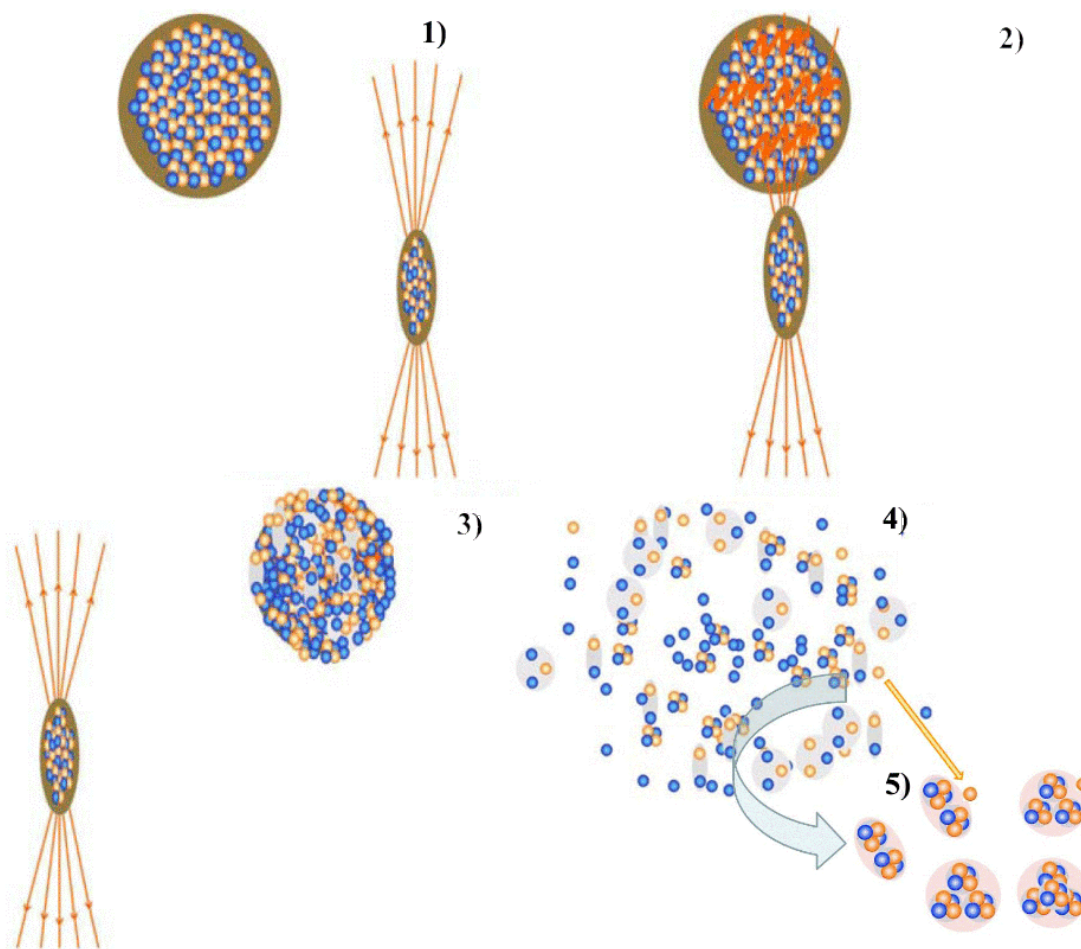


Рис. 3. Сценарий множественного образования фрагментов: сближение ядер (1), передача возбуждения исследуемому ядру (2), переход в систему, содержащую реальные легчайшие ядра и нуклоны (3), ее распад (4), слипание и подхват части фрагментов в нестабильные состояния (5).

Этот подход начал применяться в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ для поиска состояний  $\alpha\text{BEC}$  во фрагментации средних и тяжелых ядер. Обнаружен быстрый рост вклада  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{Be}$  и  $\text{HS}$  с ростом числа сопровождающих  $\alpha$ -частиц. Его причиной может служить соединение  $\alpha$ -частиц при росте их плотности [13]. Возможно,  $\alpha\text{BEC}$  возникает не в результате сопряженного возбуждения родительского ядра, а формируются последовательным подхватом фрагментов. В таком сценарии (рис. 3)  $\alpha\text{BEC}$  отвязывается от родительского ядра и становится самостоятельным состоянием ядерной материи при предельно низкой плотности и температуре. Тогда отбор событий с высокой

множественностью  $\alpha$ -частиц может быть использован как усиливающий фактор. Поиск  $\alpha$ ВЕС во фрагментации средних и тяжелых ядер становится главной задачей эксперименте БЕККЕРЕЛЬ на ближайшие годы. Далее основное внимание предложения уделяется этой теме.

Вместе с тем исследование образование нестабильных состояний легкими ядрами получает развитие в отношении изобар-аналоговых состояний (ИАС). Благодаря гораздо более высокой энергии и весьма малым ширинам ИАС служат “маяками” перестройки структуры изучаемых ядер в направлении схождения с их менее стабильными изобарами. Поэтому при реконструкции распадов ИАС возможно обнаружение ядерно-молекулярной структуры. В настоящее время ведется поиск ИАС  $^{13}\text{N}^*(15.065)$  во фрагментации  $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha$ , ИАС  $^8\text{Be}(16.6 + 16.9)$  в  $^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  и ИАС  $^9\text{B}(14.7)$  в  $^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha 2p$ . В этом аспекте заслуживают анализа имеющиеся обучения ЯЭ релятивистскими ядрами  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$ . Его уровень сложности доступен для освоения начинающими исследователями.

Для понимания механизма множественной диссоциации ядер предлагается провести анализ фрагментации ядер из состава ЯЭ вплоть до их полного разрушения под действием релятивистских мюонов. Поперечные облучения слоев ЯЭ мюонами предлагается выполнить в ЦЕРН.

## 1. СТАТУС ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение нестабильных ядер возможно на пучках стабильных и радиоактивных ядер в диапазоне энергий от нескольких до десятков МэВ на нуклон. С этой целью создаются компактные спектрометры со значительным охватом телесного угла [5-10]. В них используются кремниевые детекторы с наилучшим энергетическим разрешением, размещаемые в вакуумных объемах вблизи сверхтонких мишеней. Идентификации распадов происходит по энергетическим корреляциям продуктов реакций. В контексте настоящего проекта важно учесть их недавние результаты по поиску  $\alpha$ ВЕС.

Эксперимент с полной регистрацией  $\alpha$ -частичных фрагментов снаряда в реакции  $^{40}\text{Ca}(25 \text{ МэВ/нуклон}) + ^{12}\text{C}$  указал на растущий вклад  $^8\text{Be}$  до  $\alpha$ -множественности 6 [14]. Этот факт противоречит модели, предсказывающей снижение (табл. 2 в [9]). Проведен поиск распадов состояния  $^{16}\text{O}(0^+_6, 15.1 \text{ МэВ})$ ,  $^{20}\text{Ne}(12 \text{ МэВ/нуклон}) + ^4\text{He}$  [5] и  $^{16}\text{O}(160, 280, 400 \text{ МэВ}) + ^{12}\text{C}$  [7]. Недавно данные по  $^{16}\text{O}(45 \text{ МэВ}) + ^{12}\text{C} \rightarrow 4\alpha$  в полной кинематике [9] были проанализированы для всех возможных конфигураций и восстановлена функция возбуждения, а распады  $^{12}\text{C}(0^+_2)\alpha$ ,  $^{12}\text{C}(3^-_1)\alpha$  и  $2^8\text{Be}$ . Однако поиск состояния 15.1 МэВ во всех случаях остается безрезультатным [8]. Проводились измерения совпадений  $\alpha$ -частиц (386 МэВ), рассеянных на  $0^\circ$  в реакции  $^{20}\text{Ne}(\alpha, \alpha')5\alpha$  [10]. Утверждается, что вновь наблюдаемые состояния при 23.6, 21.8 и 21.2 МэВ в  $^{20}\text{Ne}$  сильно связаны с кандидатом  $4\alpha$ ВЕС  $^{16}\text{O}$  и сами являются кандидатами в  $\alpha$ ВЕС.

Хотя статус наблюдений  $\alpha$ ВЕС, остается неопределенным [8], во всех случаях NS образуется при фрагментации не только  $^{12}\text{C}$ . Это факт указывает независимость NS, как и  $^8\text{Be}$ , от порождающего ядра. Подобную универсальность должны проявлять и кандидаты  $\alpha$ ВЕС. В целом складывается впечатление, что в отношении статистики эксперименты  $\alpha$ ВЕС пришли к практическому пределу. В них невозможны исследования с более тяжелыми ядрами и требуется иные подходы.

Такую перспективу открывает применение ЯЭ в пучках релятивистских ядер. 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. Полученные результаты, как файлы данных, сохраняют уникальность в отношении релятивистской фрагментации. К ним можно отнести  $\alpha$ -пары частиц с углами разлета соответствующими распадам  ${}^8\text{Be}$ . Они свидетельствуют о наблюдении конечных состояний вплоть до минимальной энергии.

Электронные эксперименты не смогли до сих пор преодолеть сложности, обусловленные квадратичной снижением ионизации от зарядов, крайне малой расходимостью и совпадением по магнитной жесткости релятивистских фрагментов и пучка. Требуется привлечение адекватной методики, так и смена представления нестабильных состояний на релятивистски-инвариантную форму. Этот важный факт мотивировал исследование кластеризации методом ЯЭ.

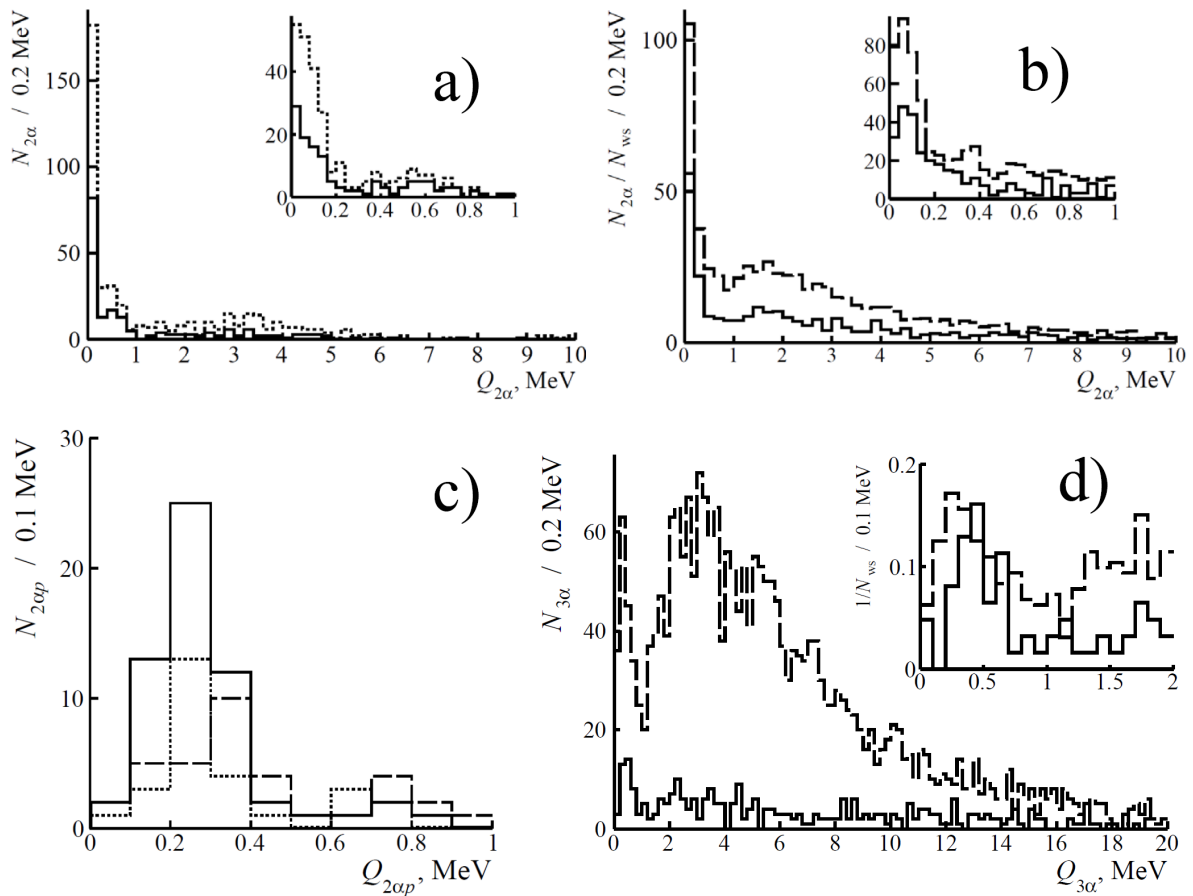


Рис. 4. Распределения по инвариантной массе [12]: а)  $Q_{2\alpha}$  в  ${}^9\text{Be}(1.2 \text{ A ГэВ}) \rightarrow 2\alpha$  (пунктир, сплошная – “белые” звезды; б)  $Q_{2\alpha}$  в  ${}^{12}\text{C}(3.65 \text{ A ГэВ}) \rightarrow 3\alpha$  (сплошная) и  ${}^{16}\text{O}(3.65 \text{ A ГэВ}) \rightarrow 4\alpha$  (пунктир); в)  $Q_{2\alpha p} (< 1 \text{ МэВ})$  в  ${}^{10}\text{C}(1.2 \text{ A ГэВ}) \rightarrow 2\alpha 2p$  (сплошная) и  ${}^{11}\text{C}(1.2 \text{ A ГэВ}) \rightarrow 2\alpha 2p$  (точки) и  ${}^{10}\text{B}(1 \text{ A ГэВ}) \rightarrow 2\alpha p$  (пунктир);  $Q_{3\alpha}$  в  ${}^{12}\text{C}(3.65 \text{ A ГэВ}) \rightarrow 3\alpha$  (сплошная) и  ${}^{16}\text{O}(3.65 \text{ A ГэВ}) \rightarrow 4\alpha$  (пунктир).

С начала 2000-х гг. метод ЯЭ применяется в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ для изучения фрагментации легких ядер (обзоры [11,12]). Особенности изотопов  ${}^7,9\text{Be}$ ,  ${}^{8,10,11}\text{B}$ ,  ${}^{10,11}\text{C}$ ,  ${}^{12,14}\text{N}$  выявились в вероятностях каналов диссоциации. Распады  ${}^9\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + \alpha$  были идентифицированы по инвариантной массе, вычисленной в предположении сохранения начального импульса. Продемонстрировано, что необходимым и достаточным является разрешение ЯЭ. Отбор  ${}^8\text{Be}$  определяется ограничением до 0.2 МэВ, а  ${}^9\text{B}$  – до 0.5 МэВ (рис. 4а и б).

Определенность в идентификации  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$  стала основанием для поиска распадов HS в диссоциации  ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  (рис. 4d), где было установлено ограничение инвариантной массы  $3\alpha$ -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.

Анализ “белых” звезд  ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  и  ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ , не сопровождаемых фрагментами мишени, позволил установить, что доля событий, содержащих распады  ${}^8\text{Be}$  (HS) составляет  $45 \pm 4\%$  ( $11 \pm 3\%$ ) для  ${}^{12}\text{C}$  и  $62 \pm 3\%$  ( $22 \pm 2\%$ ) для  ${}^{16}\text{O}$  (рис. 4d). Можно усмотреть, что рост  $2\alpha$ - и  $3\alpha$ -комбинаций усиливает вклада  ${}^8\text{Be}$  и HS. Это наблюдения заслуживает проверки для более тяжелых ядер, когда  $\alpha$ -комбинаторика стремительно нарастает с массовым числом.

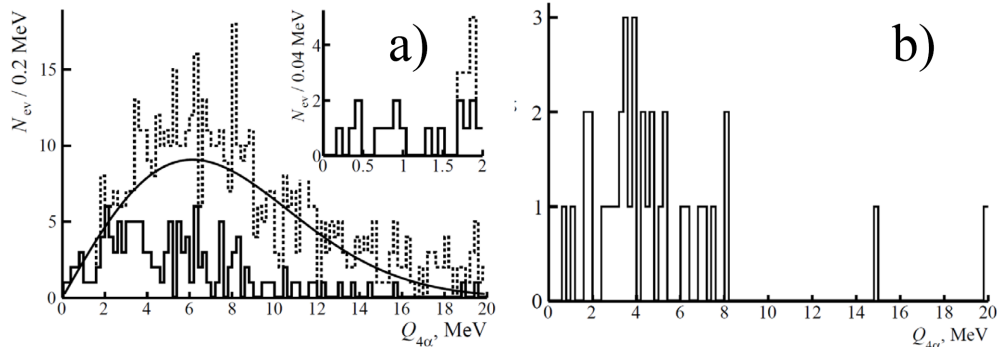


Рис. 5. Распределения по инвариантной массе  $Q_{4\alpha}$  [12] в 641 “белой” звезде  ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$  при 3.65 А ГэВ всех  $4\alpha$ -квартетов (а, точки). событий  $\alpha\text{HS}$  (а, сплошная) и  ${}^{16}\text{O} \rightarrow 2{}^8\text{Be}$  (б); плавная линия - распределение Рэля; на вставке увеличенная часть  $Q_{3\alpha} < 2 \text{ MeV}$ .

Существует возможность возникновения HS через  $\alpha$ -распад  ${}^{16}\text{O}(0^+_6)$ . Распределение “белых” звезд  ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$  по инвариантной массе  $4\alpha$ -квартетов  $Q_{4\alpha}$  (рис. 5) в основной части описывается распределением Рэля с параметром  $\sigma_{Q_{4\alpha}} = (6.1 \pm 0.2) \text{ МэВ}$ . Условие  $Q_{3\alpha}(\text{HS}) < 700 \text{ кэВ}$  смещает распределение по  $Q_{4\alpha}$  в низкоэнергетическую сторону. Увеличенный вид распределения по  $Q_{4\alpha}$ , представленный на вставке рис. 5а указывает на 9 событий, удовлетворяющих  $Q_{4\alpha} < 1 \text{ МэВ}$  и имеющих среднее значение  $\langle Q_{4\alpha} \rangle$  (RMS) =  $624 \pm 84$  (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  $N_{\text{HS}}({}^{16}\text{O})$ .

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  ${}^{16}\text{O} \rightarrow 2{}^8\text{Be}$  и  ${}^{16}\text{O} \rightarrow \alpha\text{HS}$  имеет отношение  $0.22 \pm 0.02$ . Распределение по инвариантной массе  $Q_{4\alpha}$  событий  ${}^{16}\text{O} \rightarrow 2{}^8\text{Be}$ , представленное на рис.



5b, 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  $0.22 \pm 0.17$ .

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

## 2. ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1.1 Возможности метода

Облучаемые стопки собираются из слоев размером до  $10 \times 20$  см<sup>2</sup> 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 углов. Подложка обеспечивает «жесткость», а ее отсутствие позволяет более долгое прослеживание, включая переходы в соседние слои. Факторами получения значительной статистики служат толщина и полный телесный угол детектирования. В ЯЭ содержатся в близких концентрациях атомы Ag и Вг и CNO, а также в троекратно большем числе Н. Поиск прослеживанием следов исследуемых ядер обеспечивает обнаружение порядка тысячи взаимодействий без выборки. Статистика в несколько сотен периферических взаимодействий с определенными конфигурациями релятивистских фрагментов достижима при поперечном сканировании.

Релятивистские фрагменты сосредоточены до  $\sin\theta_{\text{fr}} = p_{\text{fr}}/P_0$ , где  $p_{\text{fr}} = 0.2$  ГэВ/с – величина, характеризующая Ферми-импульс нуклонов в ядре-снаряде, а  $P_0$  – его импульс на нуклон. При базе 1 мм разрешение не хуже  $10^{-3}$  рад. Поперечный импульс  $P_T$  фрагмента с массовым числом  $A_{\text{fr}}$  определяется как  $P_T \approx A_{\text{fr}}P_0\sin\theta$  в приближении сохранения  $P_0$ . Следы релятивистских фрагментов He и H идентифицируются визуально. Приблизительное сохранение в событии фрагментами заряда ядер пучка используется для отбора нескольких [процентов периферических взаимодействий].

Во фрагментации ядер ЯЭ могут наблюдаться  $b$ -частицы ( $\alpha$ -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). На сайте <http://becquerel.jinr.ru/> доступны фотографии и видеозаписи характерных взаимодействий.

Присвоение массовых чисел трекам фрагментов H и He по среднему углу кулоновского рассеяния. Использование этого трудоемкого метода оправдано в особых случаях для ограниченного числа следов. В случае диссоциации стабильных ядер достаточно предположить соответствие He -  $^4\text{He}$  и H -  $^1\text{H}$ . Это упрощение особенно верно в случае чрезвычайно узких распадов  $^8\text{Be}$  и  $^9\text{Be}$  [12].

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

$P_0$ . Реконструкция по инвариантной массе распадов релятивистских нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$ , освоенная в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ, подтвердила справедливость этого приближения [12].

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. 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.

### 2.1.2 Нестабильные состояния в диссоциации тяжелых ядер

Возможно, что нестабильные состояния – это часть ядерной структуры, проявляющейся во фрагментации. Альтернатива состоит в образовании  ${}^8\text{Be}$  во взаимодействии  $\alpha$ -пар с подхватом ими сопровождающих  $\alpha$ -частиц и нуклонов. Ее следствием стало бы возрастание выхода  ${}^8\text{Be}$  с множественностью  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha$ , а возможно  ${}^9\text{B}$  и  $\text{HS}$ . В первом случае можно ожидать обратной корреляции.

Недавно в таком контексте были проанализированы измерения взаимодействий ядер  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{22}\text{Ne}$ ,  ${}^{28}\text{Si}$  и  ${}^{197}\text{Au}$  эмульсионного сотрудничества на синхрофазотроне ОИЯИ и сотрудничества EMU на AGS (BNL) и SPS (CERN) (ссылки в [13]). Эти данные позволяют проследить вклад нестабильных состояний и служат опорой при ускоренном поиске событий с большей множественностью методом поперечного сканирования (рис. 6). Хотя и с заметно худшей статистикой распады  $\text{HS}$  и  ${}^9\text{B}$  демонстрирует пропорциональность  ${}^8\text{Be}$ . Десятки распадов  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$  идентифицированы. В то же время распады  $\text{HS}$  составляют единицы, что требует наращивания статистики до современного эквивалента  ${}^8\text{Be}$ . Тогда станет осуществим поиск  ${}^{16}\text{O}(0^+_6)$ . На этом пути нет принципиальных проблем, поскольку имеются облученные слои ЯЭ, при поперечном сканировании которых требуемая статистика  $\alpha$ -ансамблей достижима.

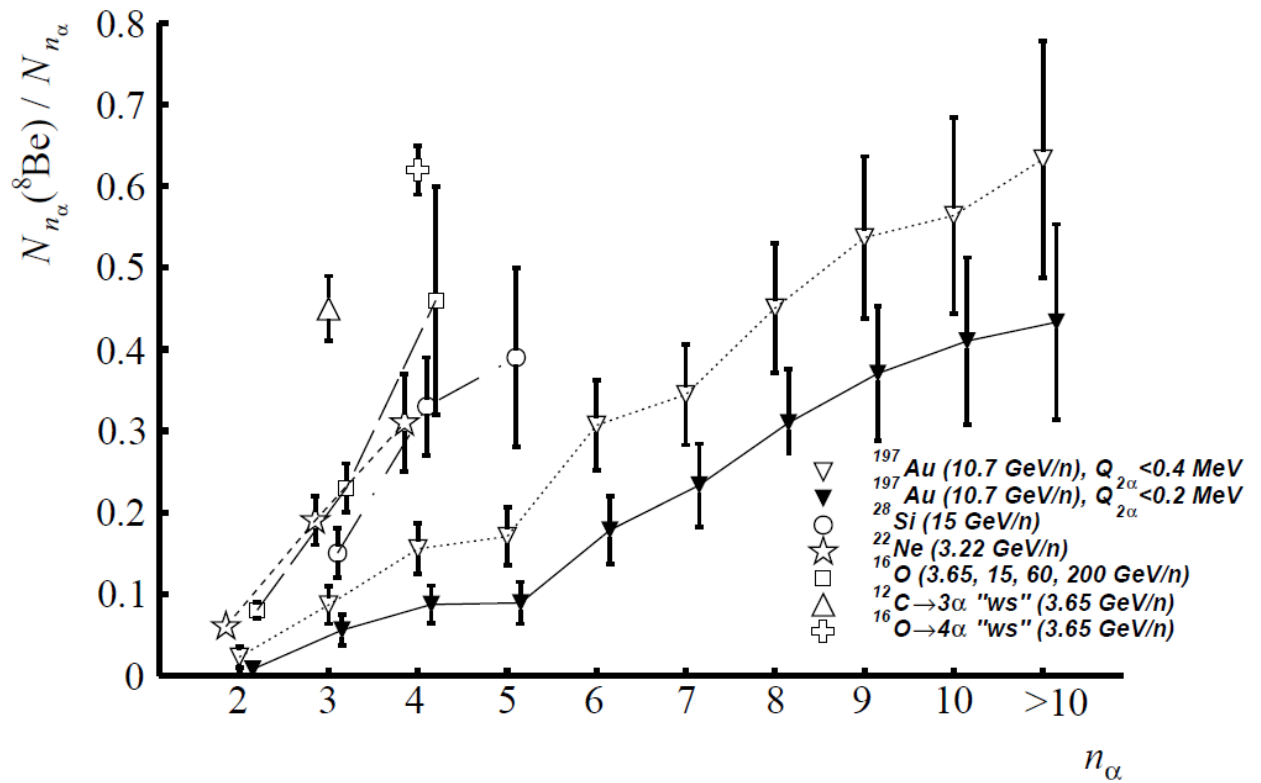


Рис. 6. Зависимость относительного вклада распадов  $N_{n_\alpha}({}^8\text{Be})$  в статистику  $N_{n_\alpha}$  событий с множественностью  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha$  в релятивистской фрагментации ядер C, O, Ne, Si и Au [13]; отмечены "белые" звезды  ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  и  ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$  (WS); для удобства точки несколько смещены от значений  $n_\alpha$  и соединены пунктиром.

Сейчас статистика событий  $n_\alpha$  наращивается путем поперечного сканирования слоев ЯЭ облученных ядрами  ${}^{84}\text{Kr}$  при 950 МэВ/нуклон (ГСИ, начало 90-х). Согласно программе SRIM торможение на длинах до 6 см примерно равномерно и составляют около 9 МэВ/мм (полный пробег около 8 см). Этот эффект может быть учтен по положениям вершин при вычислении инвариантной массы. Кроме того, торможение увеличивает углы испускания фрагментов, делая удобнее измерения. Импульс фрагментов взят с множителем 0.8, чтобы приблизительно учесть сброс начального значения во взаимодействии. Не будучи принципиальной для отбора  $Q_{2\alpha}({}^8\text{Be}) \leq 0.4$  МэВ, эта поправка позволяет сохранить положение событий в пике  $Q_{3\alpha}(\text{HS} \rightarrow {}^8\text{Be}\alpha)$ .

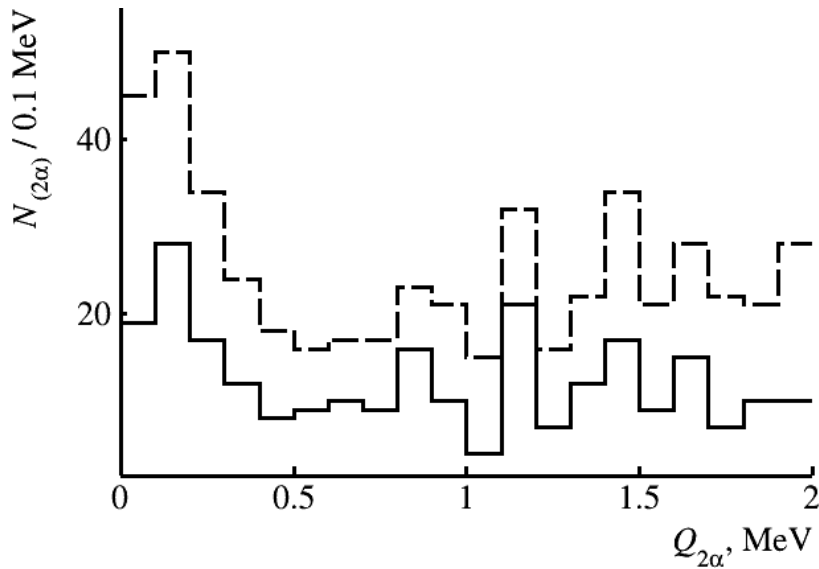


Рис. 7. Распределение по инвариантной массе пар  $\alpha$ -частиц  $Q_{2\alpha}$  во фрагментации ядер  $^{84}\text{Kr}$  по новым измерениям (сплошная линия) и ранним данным (добавлено пунктиром).

На рис. 7 представлено распределение 85 событий  $n_\alpha > 3$  по  $Q_{2\alpha}$ . Измерения планарных углов в этой выборке производились на микроскопе непосредственно путем разворота слоя относительно первичного следа. Будучи более производительным, этот метод менее точен по сравнению с координатным методом. Тем не менее, он достаточен для отбора  $Q_{2\alpha}(^8\text{Be}) \leq 0.4$  МэВ и кандидатов в более сложные распады. Кроме того, в распределение добавлены ранние измерения 184 взаимодействий  $n_\alpha > 3$  ядер  $^{84}\text{Kr}$  при 950 - 800 МэВ/нуклон [4], для которых информация о положении вершины отсутствует, в предположении энергии 875 МэВ на нуклон. Этот момент не критичен для идентификации  $Q_{2\alpha}(^8\text{Be}) \leq 0.4$  МэВ. Отношения  $N_{n\alpha}(^8\text{Be})$  и  $N_{n\alpha}(\%)$  по обеим выборкам составляют  $n_\alpha = 4$  ( $24 \pm 6$ ), 5 ( $27 \pm 6$ ), 6 ( $53 \pm 15$ ) и сумме  $n_\alpha > 6$  ( $64 \pm 14$ ). В новой выборке присутствует событие  $2^8\text{Be}$  при  $n_\alpha = 6$ , изолированное в начальной части спектра  $Q_{4\alpha}$  при 0.6 МэВ. Таким образом, универсальный эффект возрастания вероятности обнаружения  $^8\text{Be}$  в событиях с ростом в нем множественности  $\alpha$ -частиц проявляется для еще одного ядра. Представленные данные – первый вклад в целенаправленный поиск  $4\alpha\text{BEC}$ . Проблема  $4\alpha\text{BEC}$  требует не менее 10-кратного наращивания статистики, что реально с применением моторизованного микроскопа Olympus VX63.

На ближайшее время эксперимент БЕККЕРЕЛЬ сосредотачивается на анализе облучения ядрами  $^{84}\text{Kr}$  при энергии 950 МэВ на нуклон для исследования усиления и поиска неизвестных нестабильных состояний. Ускорение накопления статистики событий множественной  $\alpha$ -частичной фрагментации обеспечивается поперечным сканированием слоев ЯЭ. Коррекция на торможение при вычислении инвариантной массы происходит согласно положению вершин, чтобы использовать большую часть объема ЯЭ. Как развитие крайне желательно облучение ЯЭ наиболее тяжелыми ядрами энергией несколько ГэВ на нуклон.

### 2.1.3 Изобар-аналоговые состояния в диссоциации легких ядер

Результаты исследований релятивистской фрагментации легких стабильных и радиоактивных изотопов указывают на перспективность его развития. Диссоциация  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  проявилась как эффективный источник  ${}^8\text{Be}$ , а  ${}^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha 2p - {}^9\text{B}$ . Обнаружение распадов HS в диссоциации  ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  и  ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$  поставило вопрос о их роли в случае  ${}^{14}\text{N}$ . В настоящее время исследуется вклад  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^9\text{B}$  и HS в релятивистскую фрагментацию  ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha$ . Следующий шагом станет поиск распадов изобар-аналоговых состояний (ИАС). Несмотря на высокую энергию возбуждения (13-18 МэВ), ИАС отличаются ширины  $\Gamma$ , существенно меньшие, чем у прочих возбужденных состояний. Это обстоятельство связано с изменением изоспина начального состояния  $\Delta T = 1$ . Оно указывает на перестройку структуры легких ядер в направлении сходства с их менее стабильными изобарами. Можно предположить, что в легких ядрах они возникают в результате возмущения спиновой структуры в  $\alpha$ -подобных квартетах нуклонов  $nprr$  (рис. 8).

В настоящее время внимание сосредоточено на слоях ЯЭ, облученные на нуклотроне ОИЯИ ядрами  ${}^{14}\text{N}$  с энергией 2.0 ГэВ на нуклон. Ранее при прослеживании следов  ${}^{14}\text{N}$  установлено распределение по каналам с фрагментами примерным сохранением заряда и выявлено лидерство среди них канала  $3\text{HeH}$ . Статистика событий, увеличенная путем поперечного сканирования, дала 25-30% распадов  ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  [4]. Имеющаяся статистика событий  ${}^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He}$  при 1 ГэВ на нуклон позволяет выполнить сравнение соседних нечетно-нечетных ядер  ${}^{14}\text{N}$  и  ${}^{10}\text{B}$ , включая вклады  ${}^8\text{Be}$  и  ${}^9\text{B}$ .

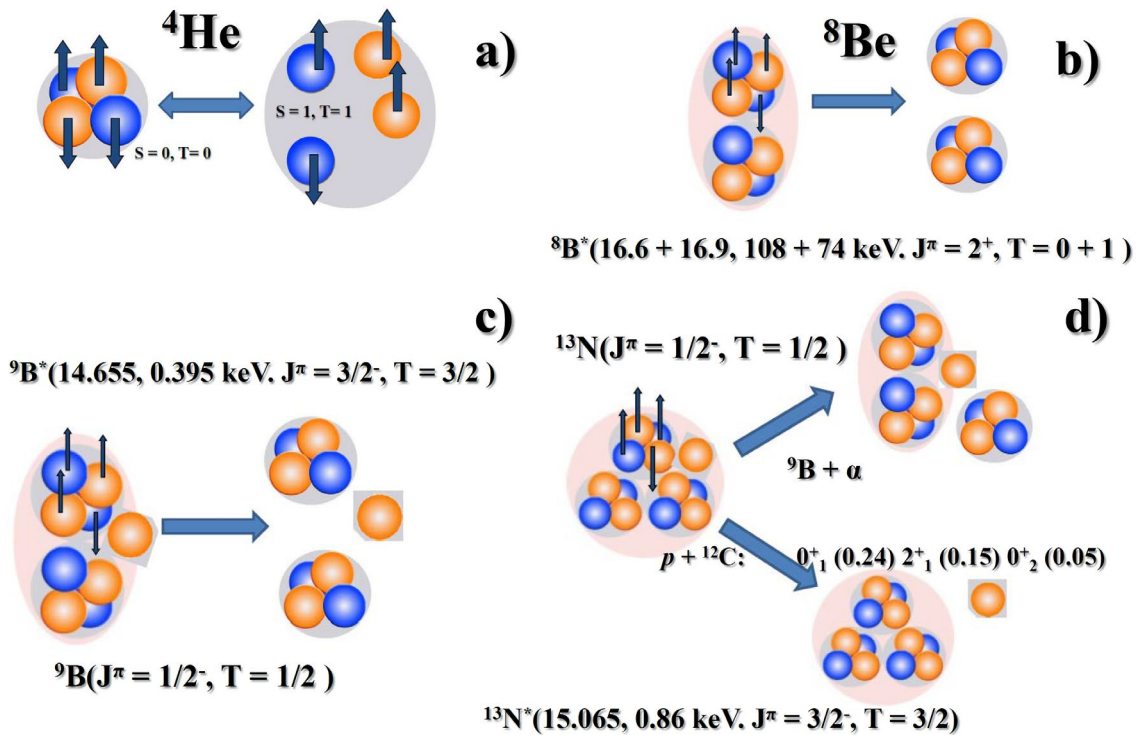


Рис. 8. Сценарий возникновения ИАС в легких ядрах на основе возмущения  $\alpha$ -частичной конфигурации (a) в  ${}^8\text{Be}$  (b),  ${}^9\text{B}$  (c) и  ${}^{13}\text{N}$  (d).

Данные по ИАС в легких ядрах позволяют проследить проявление конфигурации ( $hn$ - $tp$ ), начиная с  ${}^8\text{Be}$  (рис. 8b). В спектре возбуждений этого ядра присутствует дублет состояний  ${}^8\text{Be}(16.6) \Gamma = 108 \text{ кэВ}$  и  ${}^8\text{Be}(16.9) \Gamma = 74 \text{ кэВ}$ , смешанных по изоспину  $T = 0 + 1$ .

Расположенные ниже порога  ${}^7\text{Li} + p$  (17.255) и распадающееся на  $\alpha$ -пару, они могут служить кандидатами в конфигурацию  $\alpha + (hn/tp)$ . Кроме того, имеется ИАС  ${}^8\text{Be}$  (17.640) с  $T = 1$  и  $\Gamma = 10.7$  кэВ над порогом распада  ${}^7\text{Li} + p$ , разрешенного по изоспину. Энергетические уровни дублета  ${}^8\text{Be}$ (16.6 + 16.9) достаточно далеки от ближайшего возбуждения  ${}^8\text{Be}_{4+}$ (11.4) с  $\Gamma = 3.5$  МэВ, что позволяет их совместную идентификацию, описанным выше образом, в релятивистской фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ .

Присоединение протона ведет к конфигурации  $\alpha + (hn/tp) + p$  ( $T = 3/2$  (рис. 8с)), которая могла бы соответствовать ИАС  ${}^9\text{B}$ (14.655), имеющее  $\Gamma = 0.395$  кэВ. При исследовании когерентной диссоциации ядер  ${}^{10}\text{C}$  при энергии 2 ГэВ на нуклон было установлено лидирование канала  $2\text{He}2\text{H}$  (82%), обусловленное в значительной степени распадами  ${}^9\text{B}$  (30%) (обзор [11]). Проявилось полное совпадение распадов основных состояний  ${}^9\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}$ . Имеющиеся угловые измерения в “белых” звездах  ${}^{10}\text{C} \rightarrow 2\alpha 2p$  позволяют проверить присутствие в них распадов  ${}^9\text{B}$ (14.655). Их дополняют измерения звезд  $2\alpha 2p$ , содержащей фрагменты мишени или рожденные мезоны. Статистика наращивается в этом случае.

Фрагментация  ${}^{14}\text{N}$  – наиболее простой источник состояний  $3\alpha p$ . Объектом изучения может служить ИАС с изоспином  $T = 3/2$   ${}^{13}\text{N}^*$ (15.065,  $\Gamma = 0.86$  кэВ) на 5.6 МэВ выше порога  ${}^9\text{Be}\alpha$  (рис. 8d). Его распад на  $3\alpha p$  ( $T = 1/2$ ) подавлен по изоспину, что определяет  $\Gamma$ . Протонные распады  ${}^{13}\text{N}^*$ (15.065) заселяют возбужденных состояния  ${}^{12}\text{C}$ . Установлены вероятности его распадов в основное  $0^+_1$  (0.24), в 1-е возбужденное и единственное связанное  $2^+_1$  (0.15) и 2-е возбужденное. Хотя разрешение метода ЯЭ не позволяет идентифицировать среди релятивистских фрагментов более высокие возбуждения  ${}^{12}\text{C}^*$ , распады  $\text{HS}$  и  ${}^9\text{B}$ , реконструированные среди четверок  $3\alpha p$ , могут служить удобными сигнатурами  ${}^{13}\text{N}^*$ (15.065). Как сигнал ветви ИАС обнаружение  ${}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{N}^*$ (15.065) мотивировало бы поиски короткоживущих ядерно-молекулярных состояний во фрагментации соседних ядер. Еще одна возможность – это поиск состояния  ${}^{14}\text{N}^*$ ( $> 20.4$  МэВ)  $T = 1$  по распадам  ${}^{14}\text{N}^* \rightarrow 3\alpha d$ , также подавленным по изоспину.

Рассмотрим  ${}^{13}\text{N}^*$ (15.065) в  $\alpha$ -кластерной картине (рис. 8d). Тогда значения  $T = 3/2$  и  $J = 3/2$  возможны в конфигурациях  $2\alpha + (hn) + p$  и  $2\alpha + (tp) + p$  с участием виртуальных пар  $hn$  или  $tp$  со спином  $J = 1$ , где кластер  ${}^3\text{He}$  обозначен  $h$  (гелион). Такой переход возможен при перевороте спина S-волнового нуклона в ансамбле  $3\alpha p$ , без преодоления порога связи  $hn$  и  $tp$  (около 20 МэВ). Распад  ${}^{13}\text{N}^*$ (15.065) инициируется возвращением нуклона в  $\alpha$ -кластер, а высвобождающаяся энергия реализуется через эмиссию протона или  $\alpha$ -частицы и возбужденные и состояния основные  ${}^{12}\text{C}$  и  ${}^9\text{B}$ , соответственно.

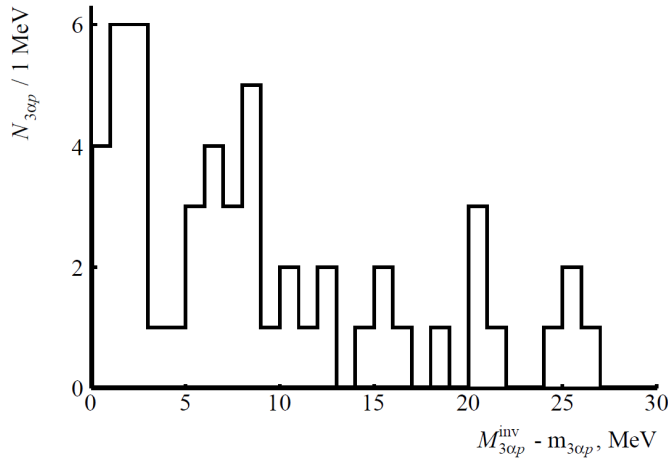


Рис. 9. Распределения по инвариантной массе  $Q_{3\alpha}$  в 60 событиях  $^{14}\text{N} \rightarrow 3\alpha$  при 2 ГэВ на нуклон

Рис. 9 представляет современное состояние идущего анализа, указывающий на ИАС в диапазоне от 5-9 МэВ, что удовлетворительно в данном подходе. Таким образом, связанная  $\alpha$ -частица проявляется как упруго деформируемый объект, лежащий в основе целого семейства достаточно долгоживущих состояний. Его релаксация в S-состояние определяет конечные состояния распадов ИАС. В направлении проверки этой гипотезы продолжится анализ облучения ядрами  $^9\text{Be}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$ .

### 2.1.4 Перспективные задачи

Полученные результаты позволяют оценить более далекую перспективу. Среди важнейших из них – проверка теоретических представлений о материи, возникающей в результате соединения нуклонов в кластеры, не имеющие возбужденных состояний до порога связи –  $\alpha$ ,  $t$ ,  $h$ ,  $d$  [15]. Предсказана эволюция состава легчайших изотопов при ядерной плотности менее нормальной и температуре несколько МэВ (рис. 10). 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 (рис. 11).

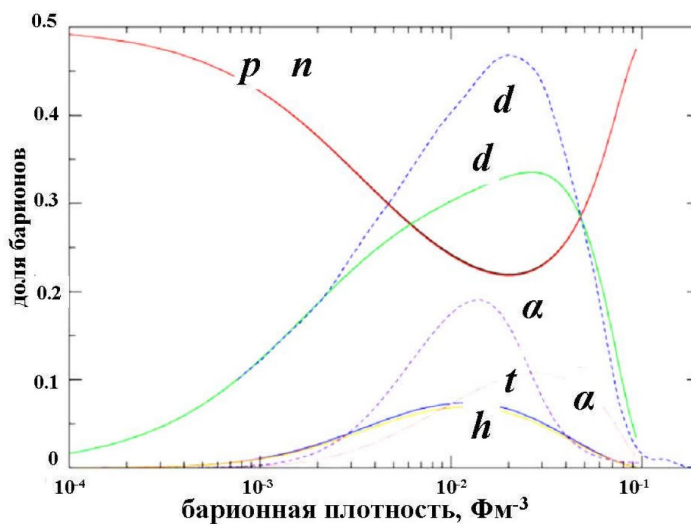
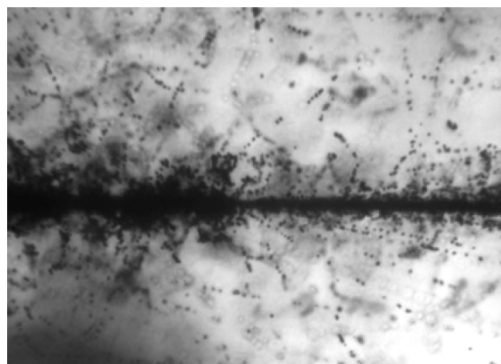


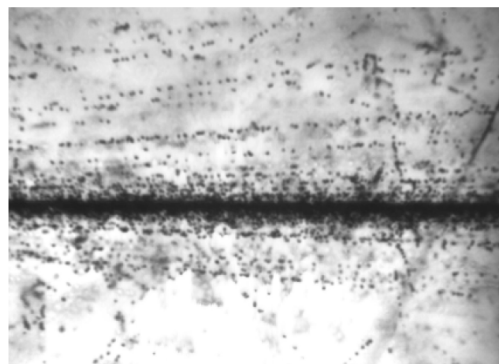
Рис. 10. Соотношение долей нуклонов и легчайших ядер от барионной плотности симметричной ядерной материи (из доклада G. Rörke).

В системе отсчета родительского ядра распределения легчайших фрагментов по энергии охватывает температурный диапазон  $10^8$ - $10^{10}$  К, отвечая фазам от красного гигантов до сверхновой. В диссоциации тяжелых ядер доступно беспрецедентное разнообразие когерентных ансамблей легчайших ядер и нуклонов. Обсуждаемые здесь наблюдения нестабильных состояний обосновывают возможность изучения кластерной материи вплоть до наименьшей ядерной температуры и плотности. Идентификации изотопов  ${}^1,2,3\text{H}$  и  ${}^3,4\text{He}$  методом многократного рассеяния позволяет расширить анализ в направлении изотопических свойств. По углам эмиссии определяются поперечные импульсы фрагментов, что позволяет выделить температурные компоненты.

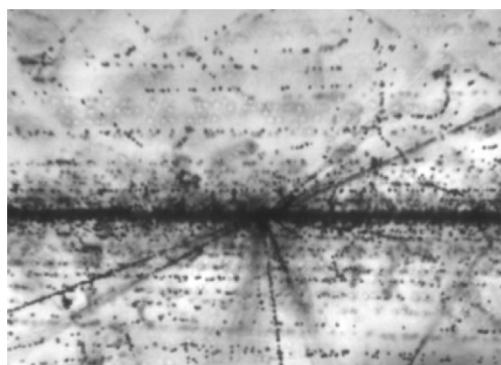




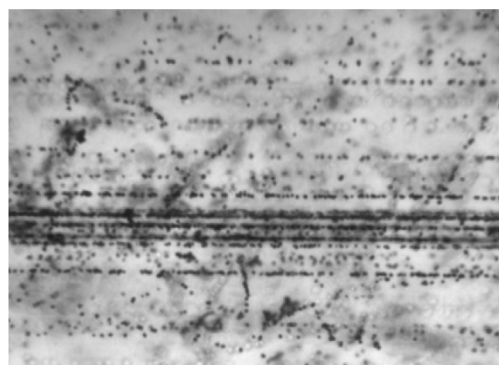
Shot 1



Shot 2



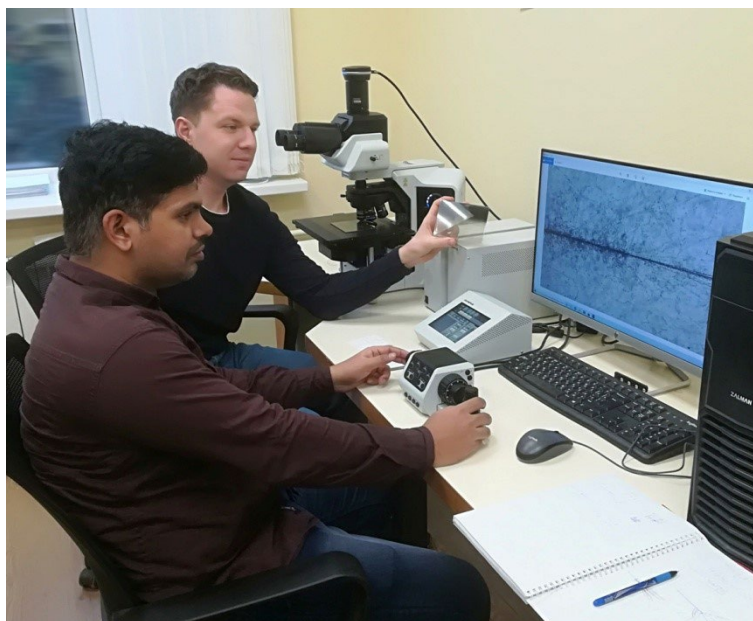
Shot 3



Shot 4

*Рис. 11. Последовательно сфотографированное событие периферического взаимодействия ядра  $^{194}\text{Au}$  с энергией 10 А ГэВ в ядерной эмульсии: след первичного ядра и вершина взаимодействия (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).*

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 исследование эффектов нейтронной «шубы». Оценка выхода нейтронов, а также дейтронов и тритонов, связывающих нейтроны, может иметь прикладное значение.



*Рис. 12. Фотография микроскопа Олимпас ВХ63.*

### **2.1.5 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 и должны быть инструментами интенсивного коллективного использования. Согласно запросу, поддержанному ПКК по ЯФ, в конце 2021 года состоялась поставка для эксперимента БЕККЕРЕЛЬ моторизованного микроскопа Olympus BX63 (рис. 12). Тем самым возникают предпосылки для ускорения проверенных процедур поиска и измерения взаимодействий в ЯЭ. Освоение работы на микроскопе молодыми участниками проекта БЕККЕРЕЛЬ становится в ряд ключевых задач. Кроме увеличения производительности, на этом микроскопе осуществимо удаленное управление и анализ, что позволяет привлекать к проекту специалистов по ядерной физике и программированию.

Моторизованный микроскоп дает возможность экспортировать данные и изображения в сотрудничающие институты и университеты. Он может применяться для диагностики пучков методами ЯЭ и твердотельных трековых детекторов, а также для решения прикладных задач. Освоение возможностей этого микроскопа позволит перейти к решению задач автоматического поиска с распознаванием характерных изображений. Вместе с тем, необходима модернизация имеющихся микроскопов МБИ-9, КСМ и МПЭ-11 (<http://becquerel.jinr.ru/photos/mic/index.html>) для продолжения прецизионных измерений согласно апробированным процедурам.

Главное практическое затруднение, уже в значительной степени преодоленное, состоит 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. 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,  $^{31}\text{Ar}$ ).

Весь этот комплекс проблем находится в фокусе эксперимента БЕККЕРЕЛЬ 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. Вместе с тем, такое развитие будет базироваться на классическом методе ЯЭ, основы которого были заложены семь десятилетий тому назад в физике космических лучей.

### **Заключение**

Недавние достижения участников эксперимента БЕККЕРЕЛЬ в исследованиях с легкими релятивистскими ядрами и сохраненная микроскопная и химико-технологическая основа дают основания ожидать в 5-летней перспективе следующих физических и результатов [16]: В имеющихся слоях ЯЭ, облученных ядрами Kr, 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. Будет получен ответ на вопрос об универсальном характере образования троек  $\alpha$ -частиц в состоянии Хойла в диссоциации легких ядер. Будет исследована возможность существования более сложных  $\alpha$ -частичных состояний ядерно-молекулярного типа.

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.

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 ВМ@N.

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.

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 сохраняет опыт проявки эмульсии, признанный на международном уровне.

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 облуженных 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.

### 2.1.5 Список литературы

1. F. Ajzenberg-Selove, Nucl. Phys. A **490**, 1(1988); TUNL Nuclear Data Evaluation Project: <http://www.tunl.duke.edu/NuclData/>.
2. Freer M., Fynbo H.O.U. Prog. Part. Nucl. Phys., **78**, 1(2014); <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641014000453?via%3Dihub>.
3. Tohsaki A., Horiuchi H., Schuck P. and Röpke G.: Rev. Mod. Phys., **89**, 011002 (2017); <https://arxiv.org/abs/1702.04591>.
4. W. von Oertzen, Lect. Notes in Phys., **818**, Clusters in Nuclei, Volume 1. Springer Int. Publ., 109 (2010); DOI: 10.1007/978-3-642-13899-7\_3.
5. M. Barbui *et al.* Phys. Rev. C **98**, 044601 (2018); DOI: 10.1103/PhysRevC.100.034320.
6. R. Charity *et al.*, Phys. Rev. C **99**, 044304 (2019); DOI: 10.1103/PhysRevC.99.044304.
7. J. Bishop *et al.* Phys. Rev. C **100**, 034320 (2019); DOI: 10.1103/PhysRevC.100.034320.
8. R. Smith, J. Bishop, J. Hirst, Tz. Kokalova, C. Wheldon, Few Body Syst., **61** 2 (2020); DOI: 10.1007/s00601-020-1545-5.
9. S. Manna *et al.* Eur. Phys. J. A, **57**, 286 (2021) <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-021-00592-8>.
10. S. Adachi *et al.* Phys. Lett. B **819**, 136411 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2021.136411>
11. P.I. Zarubin, Lect. Notes in Phys **875**, Clusters in Nuclei, Volume 3. Springer Int. Publ., 51 (2013); DOI: 10.1007/978-3-319-01077-9\_3.
12. D.A. Artemenkov *et al.*, Eur. Phys. J. A **56**, 250 (2020); DOI: 10.1140/epja/s10050-020-00252-3.
13. A.A. Zaitsev *et al.*, Phys. Lett. B **820** 136460 (2021). DOI <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2021.136460>
14. B. Borderie *et al.*, Phys. Lett. B **755**, 475 (2016) ; DOI: 10.1016/j.physletb.2016.02.061.
15. S. Typel, G. Röpke, T. Klähn, D. Blaschke, and H. H. Wolter, Phys. Rev. C **81**, 015803 (2010); DOI: 10.1103/PhysRevC.81.015803.
16. Д.А. Артеменков и др., ЯФ, **85**, 397 (2022); arXiv: 2206.09690

**2.3. Предполагаемый срок выполнения  
2024 – 2028**

**2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ  
Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина (ЛФВЭ)**

**2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации:**

<b>Организация</b>	<b>Страна</b>	<b>Город</b>	<b>Участники</b>	<b>Тип соглашения</b>
Физико-технический институт	Узбекистан	Ташкент	Х. Олимов	Протокол о сотрудничестве
Смоленский государственный университет	Россия	Смоленск	А.В. Дюндин	Протокол о сотрудничестве

**2.6. Организации-соисполнители** *(те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN).*

**3. Кадровое обеспечение**

**3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации**

<b>№№ п/п</b>	<b>Категория работника</b>	<b>Основной персонал, Сумма FTE</b>	<b>Ассоциированный Персонал Сумма FTE</b>
1.	научные работники	5	
2.	инженеры	5	
3.	специалисты		
4.	служащие		
5.	рабочие	5	
	<b>Итого:</b>	15	

### 3.2. Доступные кадровые ресурсы

#### 3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

Категория работников	ФИО	Подразделение ЛФВЭ, НЭОФТИ, сектор №4	Должность	Сумма FTE
научные работники	Зарубин П.И.		начальник сектора	1
	Русакова В.В.		начальник группы	1
	Артеменков Д.А.		снс	1
	Зайцев А. А.		нс	1
	Браднова В.		начальник группы	1
	Натарджан М.		нс	1
инженеры	Зарубина И.Г.		инженер-программист	1
	Корнегруца Н.К.		инженер	1
	Кондратьева Н.В.		инженер-технолог	1
	Номозова К.Б.		инженер	1
специалисты	Кашанская О.Н.		Старший лаборант	1
рабочие	Марьин И.И.			1
	Стельмах Г.И.			1
	Щербакова Н.С.			1
<b>Итого:</b>				<b>14</b>

#### 3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
Научные работники		
инженеры		
специалисты		
рабочие		
<b>Итого:</b>		

#### 4. Финансовое обеспечение

##### 4.1. Полная сметная стоимость проекта 660 тыс. долл.

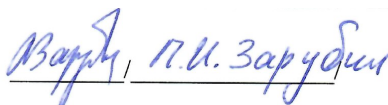
Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).

Детализация приводится в отдельной форме.

##### 4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков - общий объем.

Руководитель проекта

 В. К. Зарядин

Дата представления проекта в ДНОД: \_\_\_\_\_

Дата решения НТС лаборатории: \_\_\_\_\_ номер документа: \_\_\_\_\_

Год начала проекта: **2024**

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту: **2023**



Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам				
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
	Международное сотрудничество (МНТС)		40	40	40	40	40
	Материалы		20	20	20	20	20
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)		55	10	120	10	55
	Пуско-наладочные работы						
	Услуги научно-исследовательских организаций		20	20	20	20	20
	Приобретение программного обеспечения		30				
	Проектирование/строительство						
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)						
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы					
		– сумма FTE,					
		– ускорителя/установки,	100	100	100	100	100
		– реактора,.....					
Источники финансирования	бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ (статьи бюджета)	165	70	200	90	135
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования					

Руководитель проекта

*Варда, П.И. Зарудин*

Экономист Лаборатории

*А. М. Назарова*

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

«Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ2023 наускорительном комплексе НУКЛОТРОН/НІСА»

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА: БЕККЕРЕЛЬ2023

ШИФР ПРОЕКТА: 02-1-1087-2009

ШИФР ТЕМЫ: 02-1-1087-2009

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА: Зарубин П.И.

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

## 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  $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{10}\text{C}$  и  $^{11}\text{C}$  идентифицированы нестабильные ядра  $^8\text{Be}$  и  $^8\text{B}$ .

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  $^8\text{B}$  и  $^9\text{B}$ , а также группы  $\alpha$ -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 позволят 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.

*Никитин 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. Röpke “Status of  $\alpha$ -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. Сосуществуя с обычными фермионными возбуждениями, такие состояния оказываются возможными благодаря тому, что альфа-частица имеет свойства почти идеального бозона. Они возникают при средней плотности схожей с ядром  $^8\text{Be}$ , 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  $^8\text{Be}$  с одной дополнительной альфа-частицей на 0S орбите.

Стоит отметить, что ядро  $^{12}\text{C}$  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  $^{12}\text{C}$ . 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  $^{12}\text{C}$ , 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

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

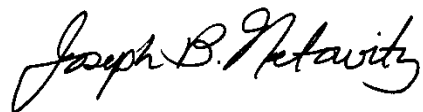
30 сентября 2019 г.  
Доктор Павел Зарубин  
zarubin@lhe.jinr.ru  
Уважаемый Павел

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

**Отзыв на проект  
«Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ-2022 на ускорительном комплексе  
НУКЛОТРОН/NICA»**

Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ посвящен использованию релятивистских пучков атомных ядер для изучения явления кластеризации в ядрах. Альфа-кластеризация многих ядер влияет на спектры ядерных уровней, динамику и характеристики ядерных реакций и в последние годы активно исследуется теоретически в микроскопических *ab initio* подходах, основанных на первых принципах (D. Lee, *Front. Phys.* 2020; doi: 10.3389/fphy.2020.00174). Информация о кластеризации ядер важна как для понимания многих явлений в ядерной астрофизике, так и для практического применения в ядерной медицине и других областях, связанных с использованием ядерных технологий.

Традиционные методы экспериментального исследования кластерной структуры ядер — реакции передачи кластеров, фото-расщепление ядер, выбивание кластеров протонами, электронами и другими пробниками, — несмотря на их детальную разработку и широкое применение, не охватывают все возможные аспекты мультикластерных явлений. Метод изучения фрагментации релятивистских ядер в ядерных эмульсиях, используемый в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ в сочетании с применением компьютеризированного микроскопа, обладает важными достоинствами и может внести значимый вклад в эти исследования. На предшествующих этапах этого эксперимента методом инвариантной массы идентифицирован вклад нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^9\text{B}$  и состояния Хойла ядра  ${}^{12}\text{C}$  в процессы диссоциации ряда легких ядер, в том числе радиоактивных. Позднее подход был распространен на фрагментацию средних и тяжелых ядер.

Современный этап проекта ориентирован на изучение предсказаний известной в литературе (H. Tohsaki et al. *Rev. Mod. Phys.* 89 (2017) 01100) концепции альфа-частичного конденсата Бозе-Эйнштейна, простейшими проявлениями которого предполагаются ядро  ${}^8\text{Be}$  и состояние Хойла. Эксперимент нацелен на исследование обнаруженного во фрагментации тяжелых ядер усиления выхода ядер  ${}^8\text{Be}$  и состояния Хойла, а также на поиск 4-альфа аналога состояния Хойла. Для решения этой задачи имеются необходимые предпосылки — ядерные эмульсии, облученные ядрами криптона, и высокопроизводительный микроскоп.

В рамках проекта планируется провести облучение ядерных эмульсий более тяжелыми ядрами и детально исследовать изотопический состав фрагментации тяжелых ядер. Исследование фрагментации легких ядер также будет продолжено с целью поиска высоковозбужденных ядерно-молекулярных образований в распадах изобар-аналоговых состояний. Планируется выполнить облучение ядер релятивистскими мюонами. Ожидаемые при этом результаты могут иметь применение в ядерной геологии и радиобиологии.

В целом, исследование явления образования множественных состояний в диссоциации релятивистских ядер в ядерных эмульсиях в настоящее время является альтернативой традиционным исследованиям методами кластерной физики низких энергий. Научная значимость проекта высока. Первые результаты проекта опубликованы в рецензируемых изданиях. Запрашиваемые ресурсы соответствуют задачам проекта. Внимание авторов обращено на прогресс в микроскопическом описании состояния Хойла и важность тесного сотрудничества с теоретиками. Отмечены стилистические недостатки текста. В целом, проект заслуживает поддержки.

  
Ю.Н. Узиков,  
ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.

## Рецензия на проект

"Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/НИКА"


Проект направлен на прояснение взаимодействия лёгких ядер при низких энергиях и возможного проявления конденсата Бозе-Эйнштейна из  $\alpha$ -частиц при релятивистской фрагментации тяжёлых ядер. Особое внимание уделяется прояснению роли ядерных кластеров ( $\alpha$ -частичных) в таких реакциях. Ядро, как многочастичная система, имеет широкий спектр возбуждений, включающий не только одночастичные возбуждения (нуклонные), но и коллективные. Для понимания протекания ядерных реакций существенную роль играют особенности в непрерывном спектре, включая ядерные резонансы и ядерные кластеры. Представления о структуре и свойствах таких состояний (энергии, ширины для ядерных резонансов) и вероятности их образования (иногда как промежуточного состояния) важно для понимания синтеза ядер во Вселенной.

Остановимся на соответствии метода исследования решаемым задачам. В проекте исследуются продукты фрагментации релятивистских ядер в области спектаторов, другими словами в области малых углов, где продукты диссоциации имеют импульс на нуклон близкий к импульсу на нуклон в налетающем ядре. В качестве базового детектора используется метод ядерной фотоэмульсии. В области фрагментации налетающего ядра характерные углы  $\theta$  определяются отношением импульса Ферми для нуклона ( $p_F \sim 0.2$  ГэВ) к импульсу на нуклон в налетающем ядре ( $p_b \sim 4.5$  на нуклон). Это даёт для протонов спектаторов углы разлёта  $\theta_p \leq 0.04$  рад. Согласно работе *A. S. Goldhaber, Phys. Lett. B 53, 306 (1974)* для ядерных фрагментов угловые распределения уже, чем для протонов. Так для  $\alpha$  частиц, рождённых при фрагментации углерода  $\theta_\alpha \leq 0.01$  рад. Не вдаваясь в детали следует отметить, что предположение сохранения импульса на нуклон, используемое при вычислении эффективной массы, выполняется для  $\alpha$  частиц точнее, чем для протонов. Это также одно из следствий цитируемой выше работы.

Ещё одной особенностью исследований с ядерной фотоэмульсией является возможность наблюдения следов нескольких ядер в конусе фрагментации. Т.е. открываются возможности для корреляционных исследований. В таких условиях относительные углы уже между фрагментами на порядок меньше указанных выше. Трудно представить электронный эксперимент, с таким высоким как в эмульсии пространственным разрешением и, что связано, с угловым разрешением. Поиск возможных проявлений  $\alpha$  конденсата делает такие исследования интересными и полезными. Трудно надеяться, что в проекте будут получены исчерпывающие ответы о свойствах такого конденсата, но такого рода исследования не только интересны как поисковый эксперимент, но и необходимы для более глубокого понимания свойств адронной материи.

Считаю, что проект должен быть поддержан. В пользу этого говорят не только приведённые выше аргументы, но и большое число опубликованных статей по результатам предыдущих исследований в реферируемых журналах. Только за предыдущие 5 лет было опубликовано 19 работ. С 2008 года и до настоящего времени по тематике проекта было защищено 6 кандидатских и одна докторская диссертация. Проект важен для освоения начинающими исследователями представлений и методов релятивистской ядерной физики.

Значимость исследования отвечает запрашиваемым ресурсам. Имеется исследовательский материал на предлагаемый период, и перспектива получения нового на более пучках тяжёлых ядер при более высокой энергии. Недавно получен моторизованный микроскоп, позволяющий рассчитывать на резкое увеличение и полноту анализа. Информация об этом эксперименте полно представляется на сайте.

  
110.02.2022/

А.Г. Литвиненко  
начальник сектора ЛФВЭ ОИЯИ, д.ф.м.н.