

**Название проекта:**

Изучение кластерной и спиновой структуры ядра  $^{12}\text{C}$  методом ядерной эмульсии облученной нейтронами с энергией 14 МэВ (Проект Чедвик)

**Название проекта на английском языке:**

Study of cluster and spin structure of the  $^{12}\text{C}$  nucleus in nuclear track emulsion exposed to neutrons (the Chadwick Project)

**Участники:**

Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна) - Д. А. Артеменков, П. И. Зарубин (со-руководитель), И. Г. Зарубина, Н. К. Корнегруца, В. В. Русакова.  
Бирмингемский университет г. – М. Фрир (со-руководитель), Ц. Кокалова, К Вэлдон

**Аннотация:**

Кластерная структура легких ядер остается актуальной темой ядерной физики и ядерной астрофизики. Ядро  $^{12}\text{C}$  является признанной «лабораторией» для развития концепций  $\alpha$ -частичной кластеризации в ядерной материи с учетом квантовых эффектов, связанных с относительными угловыми моментами кластеров. В частности, существует возможность присутствия в основном состоянии ядра  $^{12}\text{C}$  пар  $\alpha$ -кластеров, имеющих «скрытый» спин  $S = 2$  (D-волна). Такая концепция не противоречит известной последовательности синтеза  $^{12}\text{C}$ . Отношение выходов  $\alpha$ -частичных пар, рожденных в расщеплении ядер  $^{12}\text{C}$  без передачи углового момента через основное и первое возбужденное состояние несвязанного ядра  $^8\text{Be}$ , представляется ключевым параметром для проверки «скрытой» спиновой структуры  $^{12}\text{C}$ . Анализ взаимодействий в ядерной эмульсии, облученной нейтронами с энергией вблизи порога расщепления  $^{12}\text{C}$ , позволяет определить эту и многие другие характеристики реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$ .

Ядерная эмульсия, облученная нейтронами с энергией выше порога реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  позволяет изучать ансамбли  $\alpha$ -частиц, рожденных при расщеплении ядер углерода из состава эмульсии. Использование моноэнергетических нейтронов, генерируемых в реакции слияния дейтронов с энергией порядка сотен кэВ с тритонами  $d + t \rightarrow n(14.1 \text{ МэВ}) + \alpha$  обеспечивает полноту анализа. Энергия, передаваемая тройкам  $\alpha$ -частиц, оказывается достаточной для измерения пробегов и направлений, и, в то же время, достаточно ограниченной для генерации фоновых событий. Возможность облучения стопок ядерной эмульсии в интенсивном потоке моноэнергетических нейтронов возникла при попутном использовании нейтронного генератора одного из изделий прикладного назначения ДВИН. В результате достаточно быстрого нахождения значительного числа троек  $\alpha$ -частиц появилась возможность эксклюзивного анализа «забытой» реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  как одной из фундаментальных задач ядерной кластеризации. Можно ожидать, что значительный вклад распадов  $^8\text{Be}$ , а также сепарация выбитых  $\alpha$ -частиц составят основу для интерпретации реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$ .

Проект ЧЕДВИК опирается на химико-технологическую и микроскопную базу Лаборатории физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

**Фундаментальная проблема, на решение которой направлен проект:**

Фундаментальная проблема, на решение которой направлен проект, состоит в выявлении спин-кластерной структуры основного состояний ядра  $^{12}\text{C}$ . Несмотря на внушительный период исследований, степени свободы в ядрах на основе альфа-частичной кластеризации остаются среди актуальных проблем ядерной физики и ядерной астрофизики, имеющих фундаментальное значение для современных концепций барионной материи. Группы нуклонов проявляют себя как составляющие кластеры в легких ядрах наиболее отчетливо. Фундаментальное значение для понимания структуры этих ядер имеют представления о вероятностях состояниях кластеров с различными угловыми моментами. Именно они являются конечными состояниями синтеза ядер в ядерной астрофизике. Ядро  $^{12}\text{C}$  является «лабораторией» для развития концепций  $\alpha$ -

частичной кластеризации в ядерной материи с учетом квантовых эффектов, связанных с относительными угловыми моментами альфа-кластеров.

### **Конкретная фундаментальная задача в рамках проблемы, на решение которой направлен проект:**

Конкретная фундаментальная задача в рамках проблемы, на решение которой направлен проект состоит в прояснении спин-кластерной структуры основного состояния ядра  $^{12}\text{C}$ . Существует интригующая возможность присутствия в его основном состоянии пар альфа-кластеров связанных D-волновых состояниях (или со «скрытым» спином  $S = 2$ ). Такая концепция не противоречит известной последовательности синтеза через состояние Хойла. Конкретная фундаментальная задача, на которую нацелен проект, состоит в определении выходов альфа-пар, рожденных в расщеплении ядер  $^{12}\text{C}$  без передачи углового момента через основное и первое возбужденное состояние несвязанного ядра  $^8\text{Be}$ . Оно представляется ключевым параметром для проверки спин-кластерной структуры основного состояния ядра  $^{12}\text{C}$ . Можно ожидать, что значительный вклад распадов  $^8\text{Be}$ , а также сепарация выбитых  $\alpha$ -частиц составят основу для интерпретации реакции  $^{12}\text{C}(n,n')\alpha$ .

### **Предлагаемые методы и подходы (с оценкой степени новизны). Общий план работ на весь срок выполнения проекта:**

Ядерная эмульсия, облученная нейтронами с энергией выше порога реакции  $^{12}\text{C}(n,n')\alpha$  позволяет изучать ансамбли альфа-частиц, рожденных в расщеплениях ядер углерода из состава эмульсии. Использование моноэнергетических нейтронов, генерируемых в реакции слияния дейтронов с энергией порядка сотен кэВ с тритонами, обеспечивает полноту анализа. Энергия, передаваемая альфа-частицам, оказывается достаточной для измерения пробегов и направлений, и, в то же время, достаточно ограниченной для генерации фоновых событий. Возможность облучения стопок ядерной эмульсии в интенсивном потоке моноэнергетических нейтронов возникла при попутном использовании нейтронного генератора одного из изделий прикладного назначения ДВИН. В результате достаточно быстрого нахождения значительного числа троек альфа-частиц появилась возможность эксклюзивного анализа реакции  $^{12}\text{C}(n,n')\alpha$  как одной из фундаментальных задач ядерной кластеризации.

### **Современное состояние исследований в данной области науки, сравнение ожидаемых результатов с мировым уровнем:**

Предлагаемый подход использовался в начале 50-х годов с появлением нейтронных генераторов. Его применение быстро остановилось, и, как ни удивительно, ссылки на эксклюзивные измерения реакции  $^{12}\text{C}(n,n')\alpha$  отсутствуют в центральной компиляции по легким ядрам. Интересно, что авторы доступных публикаций того периода отмечали ограниченность своих вычислительных возможностей, но не нехватку статистики или точности измерений. Использование ядерной эмульсии продолжилось для нейтронной дозиметрии вплоть до 90-х годов. Появление кремниевых детекторов оставило вне поля зрения реакцию  $^{12}\text{C}(n,n')\alpha$  в ядерной эмульсии.

В настоящее время для исследований на пучках тяжелых ионов созданы масштабные спектрометрические комплексы на основе кремниевых детекторов с прекрасным энергетическим и пространственным разрешением. Однако их стоимость настолько значительна, что данный подход нельзя распространить на решение важной, но все же дополнительной задачи, предлагаемой в данном проекте.

Общий прогресс возрождает интерес к физическим находкам и методикам прошлого. Среди них - ядерная эмульсия и обсуждаемая реакция. Возобновление аналитических методов ядерной эмульсии будет стимулировать прогресс в технике автоматического распознавания образов. Действительно, в Японии и Италии предложены

калибровочные облучения эмульсии на реакторах и нейтронных генераторах. Их направленность – подготовка к поиску гипотетических частиц темной материи методом наблюдения короткопробежных ядер отдачи из состава эмульсии. Тем самым, активное применение ядерной эмульсии выходит на передний план. Решение предлагаемой задачи – шаг в этом направлении.

Таким образом, в проекте предлагается комбинация методов и средств, воспроизвести которую будет как минимум не просто, несмотря на кажущуюся простоту.

План работы по проекту российских участников:

2013 г. Накопление статистики до 1000 событий 3 альфа путем облученной ядерной эмульсии на микроскопах. Измерение углов и пробегов для 500 событий 3 альфа на измерительных микроскопах.

2014-2015 гг. Измерение углов и пробегов для 500 событий и совместный физический анализ статистики.

План работы по проекту участников из Великобритании:

2013-14 гг. Развитие теории реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  и ее моделирование.

2014-2015 гг. Моделирование реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  и совместный физический анализ статистики.

Проф. Фрир является одним из наиболее авторитетных специалистов по исследованию ядерной кластеризации. Одновременно он является активным преподавателем ядерной физики. Главная заинтересованность в совместном проекте состоит в привлечении именно проф. Фрир, а также его молодых сотрудников для обеспечения наилучшего анализа данных, получение которых организуется российскими участниками.

**В итоге выполнения проекта ожидается**

получение обзорной информации по реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$   
определение отношений распадов через основное и первое возбужденное состояние несвязанного ядра  $^8\text{Be}$   
создание теоретической модели реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$

**Имеющийся у коллектива научный задел по предлагаемому проекту: полученные ранее результаты (с оценкой степени оригинальности), разработанные методы (с оценкой степени новизны):**

Применения метода ядерной эмульсии сохранилась во многом благодаря исследованиям по диссоциации релятивистских ядер в ОИЯИ. Группа ОИЯИ является одной из немногих, где сохранена химическая обработка ядерной эмульсии, поддерживается в работоспособном состоянии значительное число микроскопов, имеются подготовленные лаборанты-микроскописты. Кстати, цена на эмульсию и микроскопы и химическую обработку с течением времени только возросла (в отличие от компьютеров).

Возможность облучения в интенсивном потоке моноэнергетических нейтронов возникла при попутном использовании генератора нейтронов одного приборов ДВИН компании «Нейтронные технологии» (г. Дубна) испытывавшихся в Объединенном институте ядерных исследований. Первоначально поставленная задача ограничивалась калибровкой ядерной эмульсии, недавно воспроизведенной компанией «Славич» (г. Переславль Залесский). Однако в результате достаточно быстрого нахождения значительного числа троек альфа-частиц была осознана возможность эксклюзивного анализа «забытой» реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  как задачи ядерной кластеризации.

**Список основных общих публикаций коллектива, наиболее близко относящихся к предлагаемому проекту (каждая с новой строки):**

Не имеется

**Список основных (не более 5) публикаций руководителя проекта в рецензируемых журналах за последние 3 года (независимо от их тематики; каждая с новой строки):**

- «Dissociation of relativistic  $^{10}\text{C}$  nuclei in nuclear track emulsion» D. A. Artemenkov, S. S. Alikulov, R. R. Kattabekov, K. Z. Mamatkulov, N. K. Kornegrutsa, D. O. Krivenkov and P. I. Zarubin 2011 Few Body Systems 50, 259; arXiv: 1105.2438.
- «Clustering in relativistic dissociation of  $^9\text{Be}$ ,  $^9\text{C}$ ,  $^{10}\text{C}$  and  $^{12}\text{N}$  nuclei» D. A. Artemenkov, V. Bradnova, R. R. Kattabekov, K. Z. Mamatkulov, N. K. Kornegrutsa, D. O. Krivenkov, A. I. Malakhov, P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, R. Stanoeva, I. G. Zarubina, P. I. Zarubin, International Journal of Modern Physics E, 20, 993-998, 2011; arXiv:1106.1748.
- «Secondary Nuclear Fragment Beams for Investigations of Relativistic Fragmentation of Light Radioactive Nuclei using Nuclear Photoemulsion at Nuclotron» P. A. Rukoyatkin, L. N. Komolov, R. I. Kukushkina, V. N. Ramzhin, P. I. Zarubin, The European Physical Journal ST, 162, 267-274, 2008.
- «Когерентная диссоциация релятивистских ядер  $^9\text{C}$ » Д. О. Кривенков, Д. А. Артеменков, В. Баднова, С. Вокал, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, Н. В. Кондратьева, А. И. Малахов, А. А. Моисеенко, Г. И. Орлова, Н. Г. Пересадько, Н. Г. Полухина, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, В. Р. Саркисян, Р. Станоева, М. Хайдук, С. П. Харламов, Ядерная физика, 73, 2159-2165 (2010); arXiv:1104.2439.
- «Облучение ядерной эмульсии в смешанном пучке релятивистских ядер  $^{12}\text{N}$ ,  $^{10}\text{C}$  и  $^7\text{Be}$ » Р. Р. Каттабеков, К. З. Маматкулов, Д. А. Артеменков, В. Баднова, С. Вокал, Д. М. Жомуродов, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, З. А. Игамкулов, Н. В. Кондратьева, Н. К. Корнегруца, Д. О. Кривенков, А. И. Малахов, Г. И. Орлова, Н. Г. Пересадько, Н. Г. Полухина, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, Р. Станоева, М. Хайдук, С. П. Харламов, Ядерная физика, 73, 2166-2171 (2010); arXiv:1104.5320.
- «"Tomography" of the cluster structure of light nuclei via relativistic dissociation» P. I. Zarubin, Lecture Notes in Physics, "Clusters in Nuclei", 3, 53-108 (2012) Springer; [http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/Zarubin\\_Springer/Zarubin\\_Springer\\_120912\\_OK%20\(1\).pdf](http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/Zarubin_Springer/Zarubin_Springer_120912_OK%20(1).pdf); [http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/Zarubin\\_Springer/Zarubin\\_Springer\\_rus\\_280812.pdf](http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/Zarubin_Springer/Zarubin_Springer_rus_280812.pdf)

**Перечень оборудования и материалов, имеющихся у коллектива для выполнения проекта:**

1. Подлежащая анализу ядерная эмульсия уже облучена в потоке монохроматических нейтронов и прошла предварительный анализ
2. Для предстоящего анализа проект обеспечен достаточным количеством просмотровых и измерительных микроскопов. В работоспособном состоянии находится оборудование химической обработки, которое необходимо для проявки новых облучений

## Расширенная аннотация проекта:

### Введение

Несмотря на десятилетия интенсивного изучения, атомное ядро остается лабораторией квантовой физики все еще полной сюрпризов. В явлении кластеризации нуклонов, при которой их небольшие группы ведут себя как целостные образования, проявляется как «индивидуализм», так и «ограниченный коллективизм» ядерных сил. Идея об  $\alpha$ -кластеризации нуклонов в ядрах имеет долгую и увлекательную историю. Своим возникновением достаточно умозрительные представления о существовании в ядрах кластеров в виде  $\alpha$ -частиц обязаны явлению  $\alpha$ -распада. Конечно, наблюдение составных ядерных фрагментов, вылетающих из ядра, вовсе не означало, что они существовали как нечто целостное внутри ядра. После открытия нейтрона стало ясно, что  $\alpha$ -частицы не могут существовать при нормальной ядерной плотности из-за необходимости антисимметризации по всему ансамблю нуклонов. Тем не менее,  $\alpha$ -кластеризация отчетливо проявляется в легких  $4N$ -ядрах  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$  и  ${}^{20}\text{Ne}$ . В  $4N$ -ядрах энергия связи нуклонов линейно следует числу возможных  $\alpha$ - $\alpha$  связей. Опираясь на молекулярный «блок»  $\alpha + \alpha$  оказалось возможным конструировать конфигурации на основе более длинных  $N\alpha$  последовательностей. Подобные конфигурации могут иметь пространственную протяженность, превышающую размер фрагментов, представляя собой ядерные аналоги молекулярных систем. Обзоры по теме даны в [1,2]

Интригующий сценарий существования сложных кластерных систем состоит в том, что может происходить конденсация Бозе-Эйнштейна групп  $\alpha$ -частиц с в условиях, когда  $\alpha$ -частицы, все находящиеся в  $S$ -состоянии (с нулевым угловым моментом) являются хорошо определенными конститuentами симметричной ядерной материи [3]. Своим возникновением такой конденсат обязан наличию сильной 4-нуклонной корреляции (квартетная конденсация фермионов). Для формирования  $\alpha$ -частиц из обычного состояния ядерной материи, которая представляет собой аналог квантовой жидкости, критическая плотность должна быть равна примерно  $\rho_0/5$  ( $\rho_0$  – ядерная плотность насыщения). Существование  $\alpha$ -конденсатной формации, как практически бесконечной симметричной ядерной материи, возможно в астрофизике при малых плотностях и температурах (рис. 1 и 2).

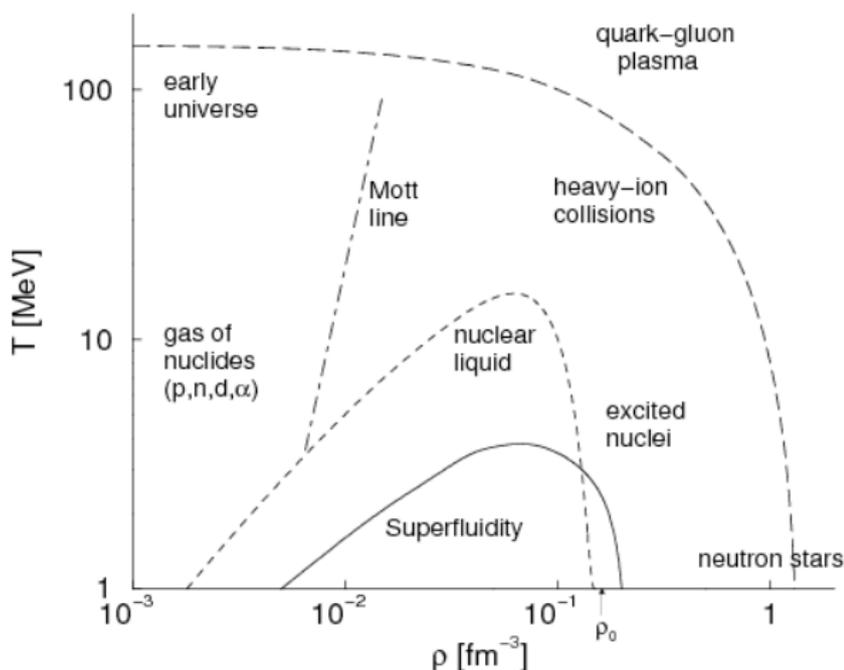
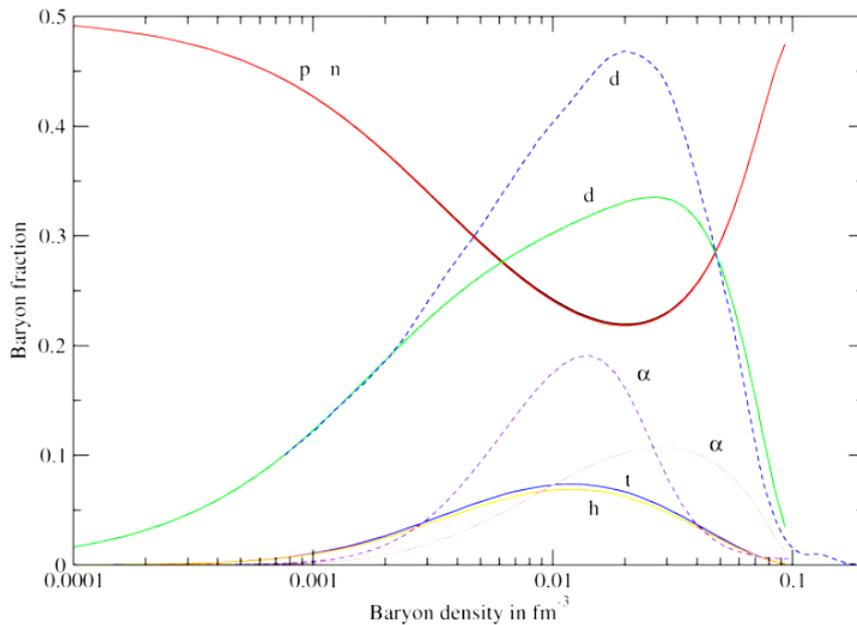


Рис. 1. Фазовая диаграмма ядерной материи.



**Рис. 2.** Соотношение долей кластерных состояний и нуклонов в зависимости от барионной плотности симметричной ядерной материи.

Важный вопрос состоит в том, имеют ли свойства возбужденных состояний конечных ядер над порогом  $N\alpha$  диссоциации отношение к свойствам бесконечной ядерной материи, обладающей к тому же электронной экранировкой? Тем не менее, разрабатываются концепции, в которых полностью развитая  $\alpha$ -кластерная структура  $N\alpha$ -ядер в момент возникновения может проявить сходство с  $\alpha$ -материей. Такой квантовый  $\alpha$ -конденсат мог бы быть аналогичен недавно осуществленной конденсации Бозе-Эйнштейна бозонных атомов в магнито-оптических ловушках, чему и обязано развитие этих представлений. Роль  $\alpha$ -простейших конденсатных состояний приписывается основному  $0^+$  и первому возбужденному состоянию  $2^+$  нестабильного ядра  ${}^8\text{Be}$ .

Хотя твердо установлено, что  $\alpha$ -кластеризация играет важную роль в структуре легких ядер, однако, до сих пор только знаменитое состояние Хойла  $0^+$  в ядре  ${}^{12}\text{C}$  отнесено к разреженному  $\alpha$ -частичному конденсату. Это состояние, возникающее при плотности  $\rho_0/3$ , может быть описано с хорошей точностью, как конфигурация трех  $\alpha$ -частиц, сконденсированных в их системе центра масс на низшей  $0S$  орбите. К этому выводу ведут данные по измерению неупругого форм-фактора рассеяния протонов с возбуждением  $3\alpha$ -состояний. С ростом плотности выше  $\rho_0/3$  возникает связь  $\alpha$ -частиц, модифицированная средой. Ядра с плотностями вблизи плотности насыщения описываются квазичастичной картиной, которая ведет к оболочечной модели. В структуре основного состояния бозонные конститuenty присутствуют всегда в очень малом числе. Они проявляются в эффекте спаривания внешних нуклонов, ведущем к росту энергии связи и стабильности ядер.

Благодаря развитию этой теоретической концепции новый импульс для развития получают эксперименты по изучению  $N\alpha$  состояний, ранее посвященные поиску ядерных молекул. Поиск  $\alpha$ -частичного конденсата требует детальной спектроскопии  $N\alpha$  состояний для выделения состояний с нулевым орбитальным моментом. С ростом исследуемой множественности  $N\alpha$  трудности эксперимента будут быстро нарастать. Например, в качестве «лаборатории» для изучения конденсата предлагается диссоциация  ${}^{40}\text{Ca} \rightarrow 10\alpha$ . Предлагается осуществить и поиск конденсатных состояний  $3^{12}\text{C}$  и  $3^{16}\text{O}$ . Переход в конденсатное состояние должен происходить на самом энергетическом пороге  $N\alpha$  состояния, что будет вести к предельно малым относительным энергиям  $\alpha$ -частиц.

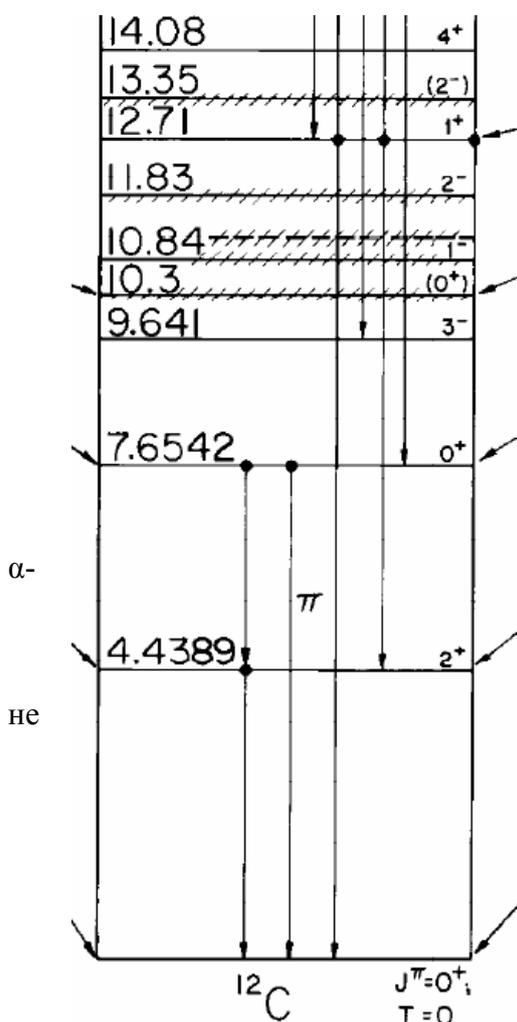
### Физическая проблема

Ядерная эмульсия [4], облученная нейтронами с энергией свыше порога реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  позволяет изучать ансамбли  $\alpha$ -частиц, рожденных при расщеплении ядер углерода из состава эмульсии. Использование моноэнергетических нейтронов, генерируемых в реакции слияния дейтронов с энергией порядка сотен кэВ с тритонами  $d + t \rightarrow n(14.1 \text{ МэВ}) + \alpha$  обеспечивает полноту анализа. Энергия, передаваемая тройкам  $\alpha$ -частицам, оказывается достаточной для измерения пробегов и направлений, и, в то же время, достаточно ограниченной для генерации фоновых событий.

Этот подход использовался в начале 50-х годов с появлением нейтронных генераторов. Его применение быстро остановилось, и, как ни удивительно, ссылки на эксклюзивные измерения этой реакции отсутствуют в центральной компиляции по легким ядрам [5]. Авторы доступных публикаций того периода отмечали ограниченность своих вычислительных возможностей. Использование ядерной эмульсии продолжилось для нейтронной дозиметрии вплоть до 90-х годов. Появление кремниевых детекторов оставило вне поля зрения реакцию  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  в ядерной эмульсии. В настоящее время общий прогресс возрождает интерес к физическим находкам прошлого.

Кластерная структура ядер остается актуальной темой ядерной физики и ядерной астрофизики. Группы нуклонов ярко проявляют себя как составляющие кластеры в легких ядрах. Сведения о вероятностях различных спиновых состояний кластеров в этих ядрах имеют фундаментальное значение. В качестве примера, можно привести выводы о периферической диссоциации релятивистских ядер  $^9\text{Be}$  [6,7], которые подтвердили представления о  $^9\text{Be}$  как суперпозиции нейтрона и состояний  $0^+$  и  $2^+$  ядра  $^8\text{Be}$  [8,9].

Ядро  $^{12}\text{C}$  является признанной «лабораторией» для развития концепций  $\alpha$ -частичной кластеризации в ядерной материи с учетом квантовых эффектов [10].



Существует возможность присутствия в основном состоянии ядра  $^{12}\text{C}_{g.s.}$  пар  $\alpha$ -кластеров, имеющих «скрытый» спин  $S = 2$  (D-волна). Подходящей базисной конфигурацией и в этом случае является первое возбужденное состояние ядра  $^8\text{Be}_{2+}$  со спином и четностью  $S = 2^+$ . В классическом подходе, можно представить противоположно направленное «вращение» двух  $\alpha$ -кластеров с угловыми моментами  $S = 2$  вокруг общего центра, представленного третьим  $\alpha$ -кластером. Тогда остающаяся комбинация «более удаленных вращающихся»  $\alpha$ -кластеров должна иметь угловой момент, соответствующий бы основному состоянию ядра  $^8\text{Be}_{g.s.}$  со спином и четностью  $S = 0^+$  (S-волна). В итоге суперпозиция парных состояний кластеров ведет к нулевому значению спина  $^{12}\text{C}_{g.s.}$ . Конечно, эта упрощенная схема требует квантовомеханического рассмотрения, учитывающего тождественность  $\alpha$ -кластеров. Тем менее, она указывает на проверяемое следствие – отношение сечений образования двух различных состояний  $^8\text{Be}$  в реакциях выбивания  $\alpha$ -частиц из ядер  $^{12}\text{C}_{g.s.}$  без передачи углового момента. При «мгновенном» выбивании одного из  $\alpha$ -кластеров оставшаяся  $\alpha$ -пару может возникать как  $^8\text{Be}_{2+}$  с вероятностью  $2/3$  и как  $^8\text{Be}_{g.s.}$  с вероятностью  $1/3$ .

Такая концепция не противоречит известной последовательности синтеза  $^{12}\text{C}_{g.s.}$ . Резонансное

слияние тройки  $\alpha$ -частиц происходит через второе возбужденное состояние  $0^+_2$  ядра  $^{12}\text{C}$  (или состояние Хойла), находящееся при энергии 7.65 МэВ на 270 кэВ выше порога развала  $^{12}\text{C}_{\text{g.s.}} \rightarrow 3\alpha$ . В этом состоянии каждая пара  $\alpha$ -частиц соответствует  $^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$ . При переходе  $0^+_2 \rightarrow 2^+_1$  в первое возбужденное состояние  $^{12}\text{C}$ , являющегося связанным, и эмиссии фотона в ансамбле  $3\alpha$  возникнуть  $\alpha$ -частичная пара в D-волновом состоянии, чтобы обеспечить сохранение углового момента. Последующий переход к  $^{12}\text{C}_{\text{g.s.}}$ , сопровождаемый эмиссией фотона, ведет к образованию еще одной  $\alpha$ -частичной пары в D-волновом состоянии. Эта пара должна иметь противоположный угловой момент по отношению к первой паре, обеспечивая нулевой спин  $^{12}\text{C}_{\text{g.s.}}$ . Тем самым, ядро  $^{12}\text{C}_{\text{g.s.}}$  приобретает внутреннюю поляризацию. Образно выражаясь, в нем консервируется скрытое «вращение».

Обсуждаемая структура  $^{12}\text{C}_{\text{g.s.}}$  может служить отправным пунктом при выборе подхода для генерации  $3\alpha$ -частичных ансамблей в состоянии Хойла. Предполагается, что состояние Хойла, вслед за  $^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$ , представляет собой конденсат Бозе-Эйнштейна  $\alpha$ -частиц, в котором реальные  $\alpha$ -частицы при предельно низких плотностях и температурах (в ядерных масштабах) скапливаются при нулевом орбитальном моменте. Идентификация состояния Хойла позволяет продвинуться к конденсатным ансамблям большего числа  $\alpha$ -частиц. Предполагается, что для воссоздания конденсата необходимо выполнить «эвакуацию» скрытого вращения из родительского ядра. Кулоновская диссоциация родительского ядра на тяжелом ядре представляется наиболее подходящим процессом, поскольку в ней возможны множественные обмены фотонами.

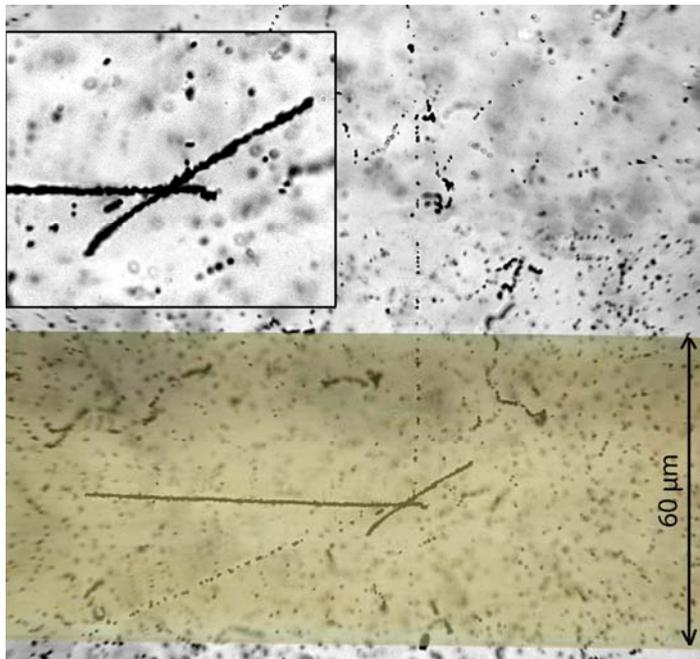
### **Использование ядерной эмульсии в ОИЯИ**

Слои ядерной эмульсии, политой на стеклянную основу, остаются эффективным, гибким и недорогим средством поисковых исследований (рис. 3). Обеспечивая рекордное пространственное разрешение, метод ядерной эмульсии решает эти проблемы, позволяя весьма эффективно вести обзорные исследования на вновь формируемых пучках. Пространственное разрешение ядерной эмульсии БР-2 имеет рекордную величину - 0.5 мкм, а ее чувствительность простирается вплоть до релятивистских однозарядных частиц. Эти возможности можно интуитивно оценить по макрофотографии «молоточкового» распада ядра  $^8\text{He}$ , остановившегося в ядерной эмульсии, на которой совмещены снимок взаимодействия релятивистского ядра серы в эмульсии и микрофотография человеческого волоса (рис. 4). Оба снимка получены в одинаковых условиях с помощью микроскопа и цифровой фотокамеры.

Можно утверждать, что эмульсия дает наилучшую макроскопическую проекцию реального события, произошедшего в масштабе микромира. Точность реконструкции вершины позволяет избавиться от вторичных взаимодействий, так как толщина вещества до начала наблюдения отдельных треков в таком детекторе не превышает нескольких  $\text{мг}/\text{см}^2$ . Ограничение на анализируемую статистику компенсируется недоступностью для полного наблюдения вершин распада в других методах. Содержание в ядерной эмульсии легких ядер С, N и O и водорода оказывается полезным при наблюдении расщеплений кластерного типа.



**Рис. 3.** Фотография слоя ядерной эмульсии на стеклянной подложке и микроскопа с установленной фотокамерой.



**Рис. 4.** Мозаичная макрофотография «молоточкового» распада ядра  $^8\text{He}$ , остановившегося в ядерной эмульсии (горизонтальный след). В распаде образовались пара релятивистских электронов (точечные следы) и пара  $\alpha$ -частиц (короткие противоположно направленные следы). На вставке сверху представлена увеличенная вершина распада. Для иллюстрации разрешения пространственного разрешения образ распада совмещен с макрофотографией человеческого волоса толщиной  $60\ \mu\text{m}$ .

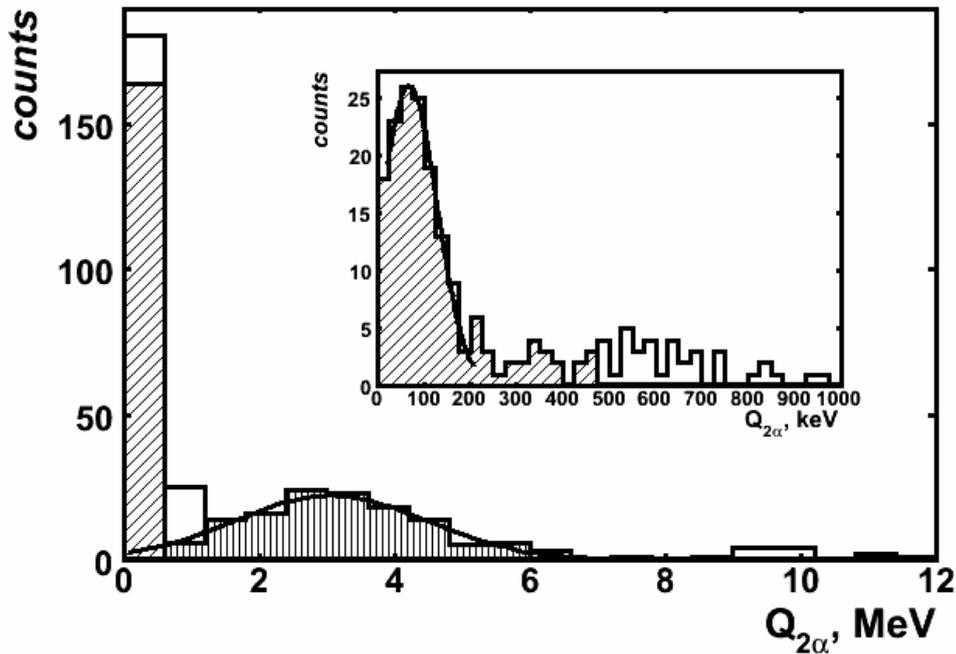


**Рис. 5.** Лабораторная комната просмотровых микроскопов МБИ-9 в ЛФВЭ ОИЯИ.



**Рис. 6.** Прецизионный измерительный микроскоп KSM.

Применения метода ядерной эмульсии сохранилась во многом благодаря исследованиям по диссоциации релятивистских ядер, включая радиоактивные, по проекту БЕККЕРЕЛЬ на нуклотроне ОИЯИ с начала 2000-х годов [11]. На основе этих исследований защищена докторская и четыре кандидатских диссертации. В стадии



**Рис. 7.** Распределение событий фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  (1.2 А ГэВ) по величине энергии  $Q_{2\alpha}$  пары  $\alpha$ -частиц.

подготовки находятся еще три кандидатских диссертации. Факты, собранные в «мозаику» в обзоре [7], могут служить «маяками» в применении концепций ядерной кластеризации, а также при планировании новых экспериментальных исследований с релятивистскими ядрами. На 2012-2014 г. проект БЕККЕРЕЛЬ поддерживается грантом РФФИ и грантами стран-участниц ОИЯИ. Группа ОИЯИ является одной из немногих, где сохранена химическая обработка ядерной эмульсии, поддерживается в работоспособном состоянии значительное число микроскопов (рис 3,5,6), имеются подготовленные лаборанты-микроскописты. Кстати. цена на эмульсию и микроскопы и химическую обработку с течением времени только возростала (в отличии от компьютеров).

Установлено, что фрагментация  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  протекает в основном (около 80%) через состояния  $0^+$  и  $2^+$  ядра  ${}^8\text{Be}$  с близкими вероятностями (рис.7). Для когерентной диссоциации через эти состояния отсутствует различие распределений по суммарным поперечным импульсам  $\alpha$ -пар. Эти выводы подтверждают представления о ядре  ${}^9\text{Be}$ , предполагающие присутствие суперпозиции состояний  $0^+$  и  $2^+$  ядра  ${}^8\text{Be}$  с близкими вероятностями в его основном состоянии. Кроме того, установлено. периферической фрагментации ядер  ${}^{14}\text{N}$  канал  ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{N}$  является лидирующим, проявляя себя как эффективным источник ансамблей  $3\alpha$ . Образование 80%  $3\alpha$  троек соответствует возбуждениям ядра  ${}^{12}\text{C}$  от порога до 14 МэВ. Ядро  ${}^{14}\text{N}$  с вероятностью около 20% фрагментирует через ядро  ${}^8\text{Be}$ .

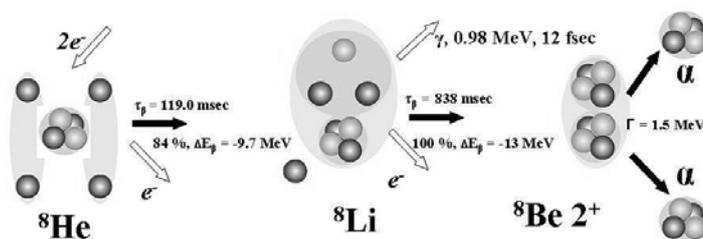
Благодаря рекордному пространственному разрешению и чувствительности метод ядерной эмульсии позволил осуществить в едином подходе «томографию» целого семейства легких ядер, в том числе нейтронодефицитных. В случае периферических взаимодействий релятивистский масштаб соударения ядер не только не препятствует исследованию кластерных аспектов ядерной структуры, но, напротив, дает преимущества для изучения многочастичных систем.

В целом, представленные результаты подтверждают предположение о том, что известные особенности легких ядер определяют картину их релятивистской диссоциации. Распределения по вероятности конечных конфигураций фрагментов позволяет выявить их вклады в структуру исследуемых ядер. Такие распределения имеют индивидуальный характер для каждого из представленных ядер, являясь их своеобразным «автографом».

Сами ядра представляются как разнообразнейшие суперпозиции легких ядер-основ, легчайших ядер-кластеров и нуклонов, в том числе как суперпозиции спиновых состояний. Поэтому выделение какой-то одной или даже пары конфигураций было бы упрощением, определяемым стремлением понять наиболее существенные аспекты ядерных реакций и свойств ядер, а не реальной ситуацией. Представленные данные призваны помочь в оценке степени и влияния таких упрощений.

Подход, основанный на диссоциации релятивистских ядер, открывает новый горизонт в исследовании кластерной структуры ядер и несвязанных кластерных систем. По-существу, пока сделаны совершенно необходимые, но только первые шаги. Диссоциация релятивистских ядер ведет к появлению многочастичных комбинаций с кинематическими характеристиками движения, которые представляют ядерно-астрофизический интерес и которые невозможно сформировать в других лабораторных условиях. С другой стороны при множественной диссоциации нейтроноизбыточных ядер на легкие фрагменты становится неизбежным присутствие значительной нейтронной компоненты, что обуславливается симметричным составом легких ядер-фрагментов. Тем самым возникает перспектива исследования полинейтронных состояний. Кроме того, здесь возникает и прикладной интерес.

Итак, давая новые знания, ядерная фотография будит «ядерное воображение». Нельзя исключить, что полнота наблюдений, обеспечиваемая в ядерной эмульсии, может остаться недостижимой для электронных методов детектирования. В этом случае выводы эмульсионных работ позволят оценить их ограниченность и придать уверенность «богатым» экспериментам с большим разнообразием детекторов.



**Рис. 8.** Схема основного канала каскадного распада изотопа  $^8\text{He}$ ; светлые кружки соответствуют протонам, темные – нейтронам; кластеры выделены темным фоном.

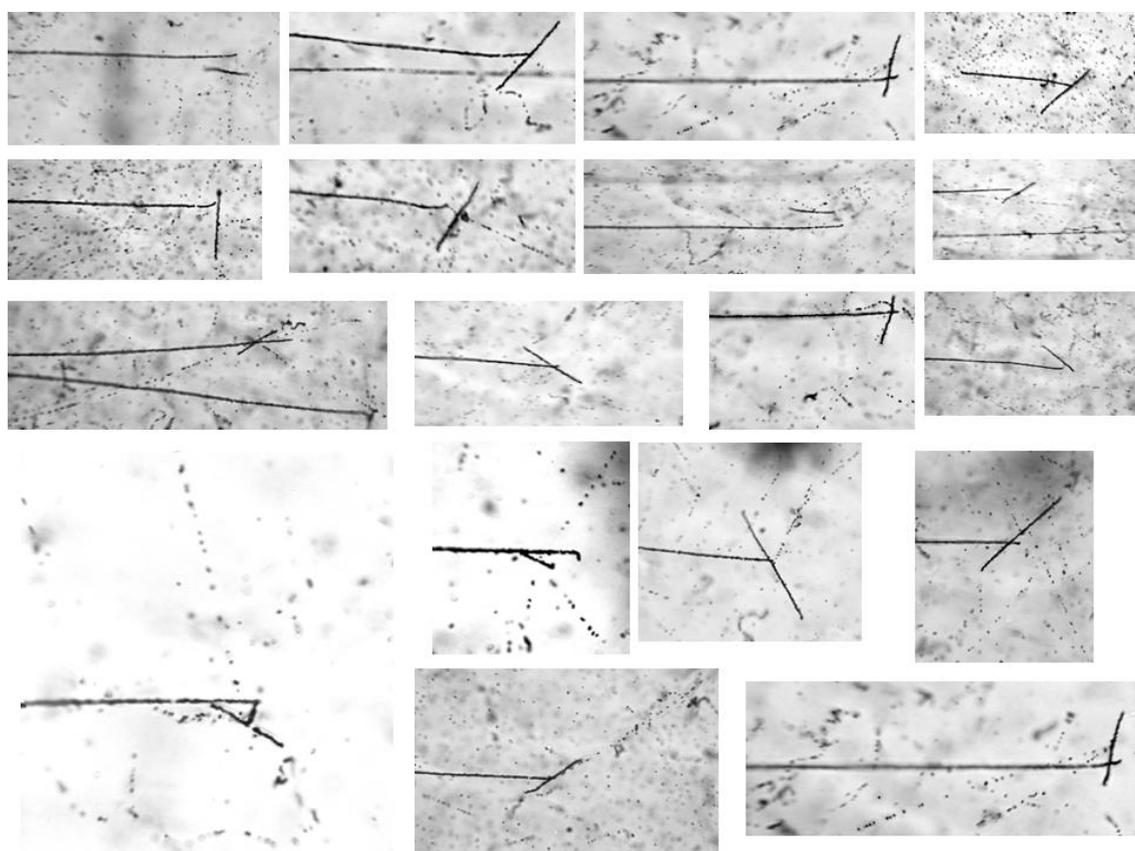
### Калибровка ядерной эмульсии ядрами $^8\text{He}$

Для обоснования перехода от пробегов  $\alpha$ -частиц к значениям энергии на основе программ моделирования необходимо выполнить проверку такой процедуры на реальных физических процессах. Традиционный подход к калибровке ядерной эмульсии, основанный на растворении в материале эмульсии солей радиоактивного тория, сопряжен с очевидными сложностями. Другой вариант – калибровка на пучке  $\alpha$ -частиц также непрост – это и интенсивность, и необходимость снятия изолирующей свет бумаги. Нами впервые была выполнена  $\alpha$ -калибровка методом имплантации ядер  $^8\text{He}$ , результаты которой представлены ниже.

Они составляют методическое обоснование проекта и будут опубликованы в 2013 г. в журнале «Письма в ЭЧАЯ». В диапазоне энергии ядер несколько МэВ на нуклон возникает возможность имплантации радиоактивных ядер в вещество детектора. В таком подходе могут исследоваться не сами имплантируемые ядра, а дочерние состояния, возникающие в их распадах. В частности, в распадах легких радиоактивных ядер возможно заселение  $2\alpha$ - и  $3\alpha$ -частичных состояний. В этой связи заслуживают рассмотрения известные, хотя и несколько забытые, возможности детектирования медленных ядер в ядерной эмульсии. Более полувека назад наблюдались «молоточковые» следы распадов  $^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  от  $\beta$ -распадов остановившихся фрагментов  $^8\text{Li}$  и  $^8\text{B}$ , рожденных в свою очередь частицами высоких энергий при расщеплении ядер из

состава эмульсии [5]. Другой пример – это первое наблюдение  $2\alpha + p$  распада ядра  ${}^9\text{C}$  через состояние  $2^+$  ядра  ${}^8\text{Be}$  [12]. Благодаря созданию установок по получению пучков радиоактивных ядер, ядерная эмульсия оказывается эффективным методом изучения распадов легких экзотических ядер, как с избытком нейтронов, так и протонов.

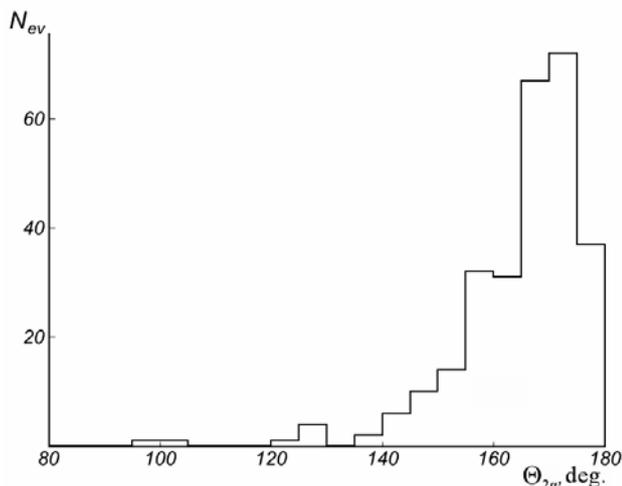
В качестве первого шаг в применении такого подхода в марте 2012 г. ядерная эмульсия была облучена в Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова (ФЛЯР ОИЯИ) ядрами  ${}^8\text{He}$  с энергией около 60 МэВ на сепараторе фрагментов ACCULINNA [13]. Особенности распадов этого изотопа  ${}^8\text{He}$  детально представлены на рис. 8. После остановки и нейтрализации ядра  ${}^8\text{He}$  в веществе, образовавшийся атом  ${}^8\text{He}$  остается несвязанным (благородный газ) и в результате термализации может испытывать дрейф в среде до  $\beta$ -распада. Период полураспада ядра  ${}^8\text{He}$  составляет  $\tau_\beta = (119.0 \pm 1.5) \cdot 10^{-3}$  с. С вероятностью 84% и энергией  $\Delta E = 9.7$  МэВ  $\beta$ -распад этого ядра происходит на связанный уровень 0.98 МэВ ядра  ${}^8\text{Li}$ . Затем ядро  ${}^8\text{Li}$  с периодом полураспада  $\tau_\beta = (838 \pm 6) \cdot 10^{-3}$  с и со 100%-ой вероятностью и энергией  $\Delta E = 13$  МэВ испытывает  $\beta$ -распад на уровень  $2^+$  ядра  ${}^8\text{Be}$  (3.03 МэВ). И наконец, ядро  ${}^8\text{Be}$  из состояния  $2^+$ , имеющее ширину 1.5 МэВ, распадается на пару  $\alpha$ -частиц.



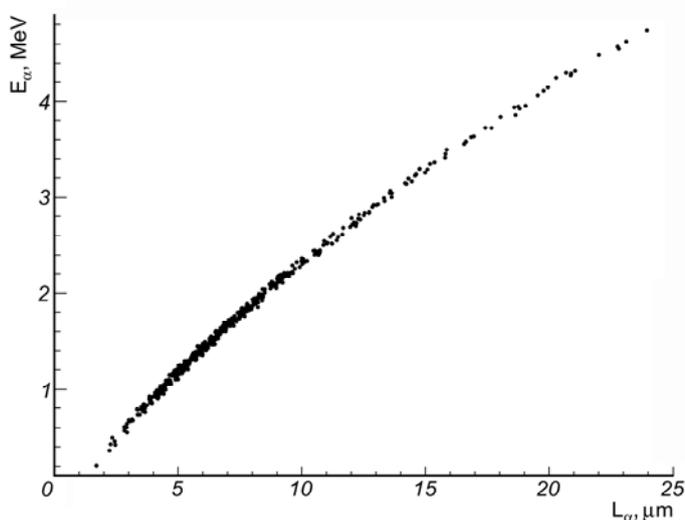
**Рис. 9.** Схема сборки мозаичных макрофотографий распадов ядер  ${}^8\text{He}$ , остановившихся в ядерной эмульсии

На рис. 2 представлена сборка мозаичных макрофотографий распадов ядер  ${}^8\text{He}$ , остановившихся в ядерной эмульсии из нескольких тысяч, наблюдавшихся в данном исследовании. На сайте проекта БЕККЕРЕЛЬ собраны видеозаписи таких распадов, сделанные с помощью микроскопа и фотоаппарата. Первичный поиск  $\beta$  распадов ядер  ${}^8\text{He}$  при сканировании слоя на микроскопе МБИ-9 с 20-кратным увеличением объектива был ориентирован на «молоточковые» события (рис. 3 и 5). Зачастую между местом остановки и самим молоточковым распадом наблюдался разрыв. Такие «разорванные»

события были отнесены к дрейфу термализованных атомов  $^8\text{He}$ , которые возникали в результате нейтрализации ядер  $^8\text{He}$ . Этот эффект определяется природой  $^8\text{He}$  и они идентифицируются особенно надежно. Благодаря доминированию в пучке ядер  $^8\text{He}$  (около 80%) распределение «молоточковых» распадов по площади эмульсии можно представить совместно для всех найденных событий, в том числе 1413 «целых» и 1123 «разорванных». Дальнейшие измерения событий, в которых присутствовал хотя бы один электрон, выполнялись на микроскопе KSM с 90-кратным увеличением. На основе измерения длин следов программа моделирования SRIM [14] позволяет дать оценку кинетической энергии ядер.



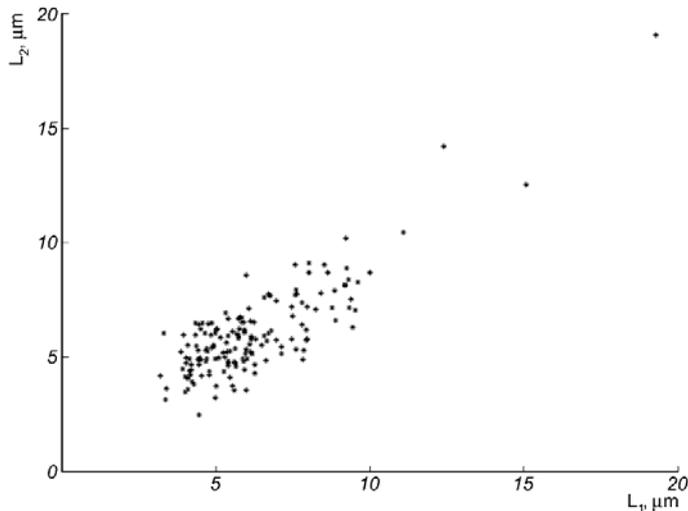
**Рис. 10.** Распределение по углу  $\Theta_{2\alpha}$  в парах  $\alpha$ -частиц в распадах ядер  $^8\text{He}$ .



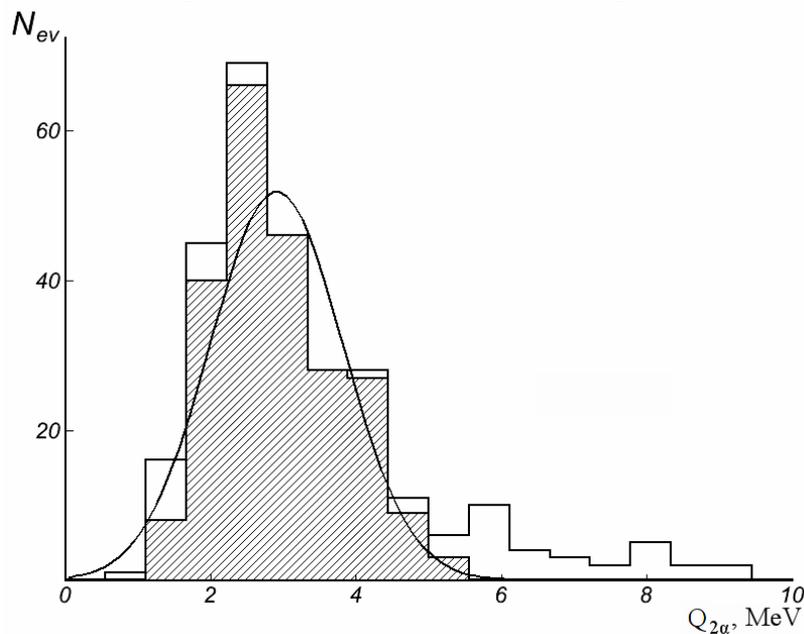
**Рис. 11.** Определение энергии  $\alpha$ -частиц по измеренным пробегам по модели SRIM.

Координаты вершин распадов и остановок распадных  $\alpha$ -частиц были определены для «молоточков» из 136 «целых» и 142 «разорванных» событий. В случае «разорванных» событий определение координаты распада делалось на основе экстраполяции следа электрона на молоточковый след. На этой основе были получены углы эмиссии и пробеги  $\alpha$ -частиц. На рис. 10 представлено распределение углов разлета пар  $\alpha$ -частиц, имеющее среднее значение  $\langle\Theta_{2\alpha}\rangle = (164.9 \pm 0.7)^\circ$  при RMS  $(11.6 \pm 0.5)^\circ$ . Небольшой излом «молоточков» определяется импульсами, уносимыми  $e\nu$ -парами. На рис. 11 представлена связь пробегов  $\alpha$ -частиц  $L_\alpha$  из «молоточков» и значениями энергии

$E_\alpha$ , определяемым по сплайн-интерполяции расчета пробег-энергия по модели SRIM. Среднее значение пробегов  $\alpha$ -частиц имеет значение  $(7.4 \pm 0.2)$   $\mu\text{m}$  при RMS  $(3.8 \pm 0.2)$   $\mu\text{m}$ . Эта величина соответствует среднему значению кинетической энергии  $\langle E(^4\text{He}) \rangle = (1.70 \pm 0.03)$  МэВ при RMS = 0.8 МэВ. В пробегах  $\alpha$ -частиц в парах  $L_1$  и  $L_2$  отчетливо проявляется корреляция (рис. 12). Распределение разностей пробегов  $L_1 - L_2$  (имеет значение RMS 2.0  $\mu\text{m}$ ).



**Рис. 12.** Распределение пробегов  $L_1$  и  $L_2$  в парах  $\alpha$ -частиц в распадах ядер  $^8\text{He}$ .

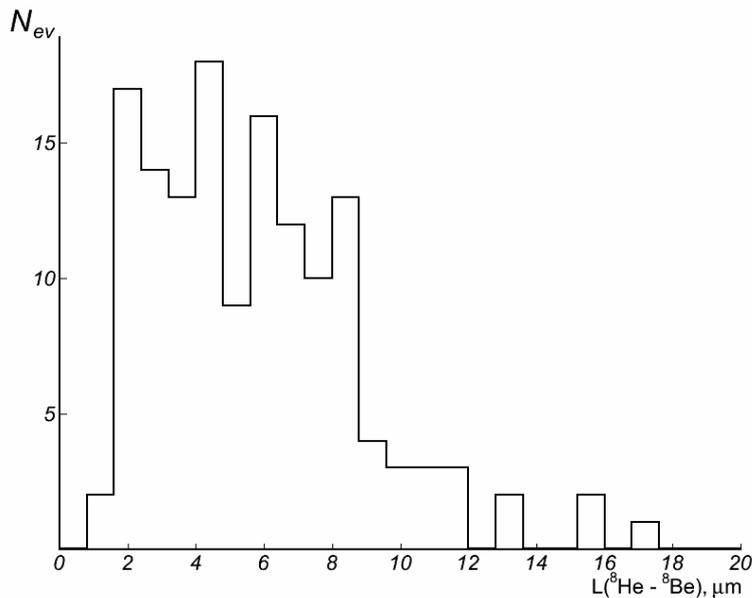


**Рис. 13.** Распределение по величине энергии  $Q_{2\alpha}$  пары  $\alpha$ -частиц в распадах ядер  $^8\text{He}$ ; отвечающих условиям отбора событий  $L_1$  и  $L_2 < 12.5$   $\mu\text{m}$ ,  $\Theta > 145^\circ$ ; линия описание функции Гаусса.

Знание энергии и углов эмиссии  $\alpha$ -частиц позволяет получить распределение энергии  $\alpha$ -распадов  $Q_{2\alpha}$ . Релятивистски-инвариантная переменная  $Q$  определяется как разница между инвариантной массой системы  $M^*$  и массой первичного ядра  $M$ , т. е.  $Q = M^* - M$ . Здесь  $M^*$  определяется как сумма всех произведений 4-импульсов  $P_{i,k}$  фрагментов  $M^{*2} = (\sum P_i)^2 = \sum (P_i \cdot P_k)$ .

В основном, распределение величины  $Q_{2\alpha}$  (рис. 13) соответствует распадам ядра  $^8\text{Be}$  из возбужденного состояния  $2^+$ . Однако, его среднее значение  $\langle Q_{2\alpha} \rangle$  оказалось несколько выше ожидавшегося. Этот факт определяется наличием небольшого «хвоста» в области больших значений  $Q_{2\alpha}$ , явно не соответствующему описанию функцией Гаусса.

Применение условий отбора на пробеги  $L_1$  и  $L_2 < 12.5 \mu\text{м}$ , а также  $\Theta > 145^\circ$ , позволяет получить значение  $\langle Q_{2\alpha} \rangle = (2.9 \pm 0.1) \text{ МэВ}$  при RMS  $(0.85 \pm 0.07) \text{ МэВ}$ , что соответствует  $2^+$  состоянию.



**Рис. 14.** Распределение по расстояниям  $L(\text{}^8\text{He}-\text{}^8\text{Be})$  между точками остановок ядер  $\text{}^8\text{He}$  и вершинами распадов  $\text{}^8\text{Be}(2^+)$  в «разорванных» событиях.

Причина появления «хвоста» в распределении  $Q_{2\alpha}$  неочевидна и требует дальнейшего анализа. Согласно рис. 10 пробеги  $L_1$  и  $L_2$  коррелированы и в области свыше  $12.5 \mu\text{м}$ . Поэтому увеличенные пробеги нельзя отнести к флуктуациям пробегов вследствие рекомбинации ионов  $\text{He}^{+2}$ . Это обстоятельство должно приниматься во внимание при комплексном анализе.

Разрешение ядерной эмульсии позволяет определить расстояния  $L(\text{}^8\text{He}-\text{}^8\text{Be})$  между точками остановки ядер  $\text{}^8\text{He}$  и вершинами распадов  $\text{}^8\text{Be}(2^+)$  в 142 «разорванных» событиях (рис. 14). Среднее значение  $\langle L(\text{}^8\text{He}-\text{}^8\text{Be}) \rangle$ , составившее  $(5.8 \pm 0.3) \mu\text{м}$  при RMS  $(3.1 \pm 0.2) \mu\text{м}$ , может быть сопоставлено среднему значению длины дрейфа термализованных атомов  $\text{}^8\text{He}$ .

Результатом настоящей работы является демонстрация при облучении в пучке ядер  $\text{}^8\text{He}$  возможностей недавно воспроизведенной ядерной эмульсии. Тестовый эксперимент позволил представить независимым образом идентификацию радиоактивных ядер  $\text{}^8\text{He}$  по распадам при остановке в эмульсии, оценить возможность  $\alpha$ -спектрометрии этих распадов, а также впервые наблюдать эффект дрейфа атомов  $\text{}^8\text{He}$ , термализованных в веществе. Статистика «молоточковых» распадов, найденных в настоящем исследовании, составляет небольшую долю от потока ядер  $\text{}^8\text{He}$ , а измеренных распадов около 10% от этой доли. Это ограничение определялось «разумными» затратами человеческого времени и труда.

Использование автоматических микроскопов для поиска и измерения таких распадов откроет перспективу беспрецедентного уровня статистики и детальности. Одним из таких микроскопов является ПАВИКОМ-2 (рис. 15) в ФИАН (г. Москва). Комплекс ПАВИКОМ [15] изначально создавался для обработки ядерных фотоэмульсий, облученной ядрами свинца на ускорителе SPS (ЦЕРН). На ПАВИКОМ могут обрабатываться практически все типы твердотельных трековых детекторов (фотоэмульсии, рентгеновские пленки, майлар, пластик, кристаллы).

В настоящее время ведется обработка анализа изображений распадов ядер  $\text{}^8\text{He}$  в ядерной эмульсии на основе автоматизированного комплекса на основе микроскопа МПЭ-11 с управляемым столиком, видеокамерой и платой захвата изображения. Поставленная здесь задача автоматического анализа расщеплений ядер углерода на три альфа-частицы

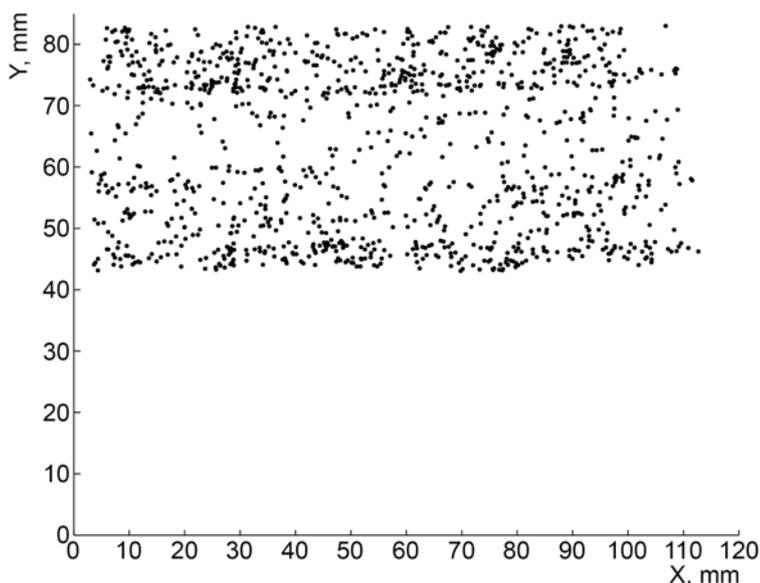
оказывается качественно сложнее. Однако к ней стоит искать подходы, поскольку анализ распадов ядер составляет заманчивую перспективу применения опыта группы ПАВИКОМ. В данном случае проект создаст физические предпосылки для автоматизации.



**Рис. 15.** Автоматизированный комплекс ФИАН на основе микроскопа МПЭ-11 с управляемым столиком, видеокамерой и платой захвата изображения; на экране – изображение облученной пленки.



**Рис. 16.** Макрофотография расщепления  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  ядра углерода нейтроном с энергией 14 МэВ.



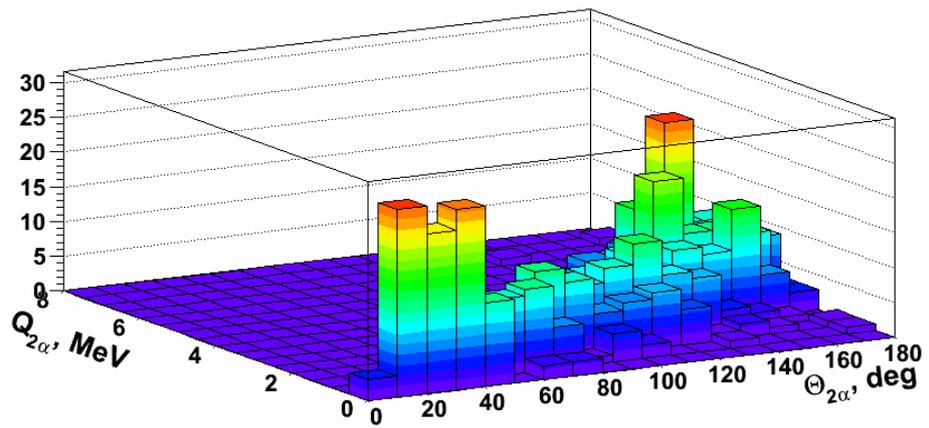
**Рис. 17.** Распределение по площади двух частично просмотренных пластин событий расщепления  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$ , вызванных нейтронами с энергией 14 МэВ.

### Изучение реакции $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$

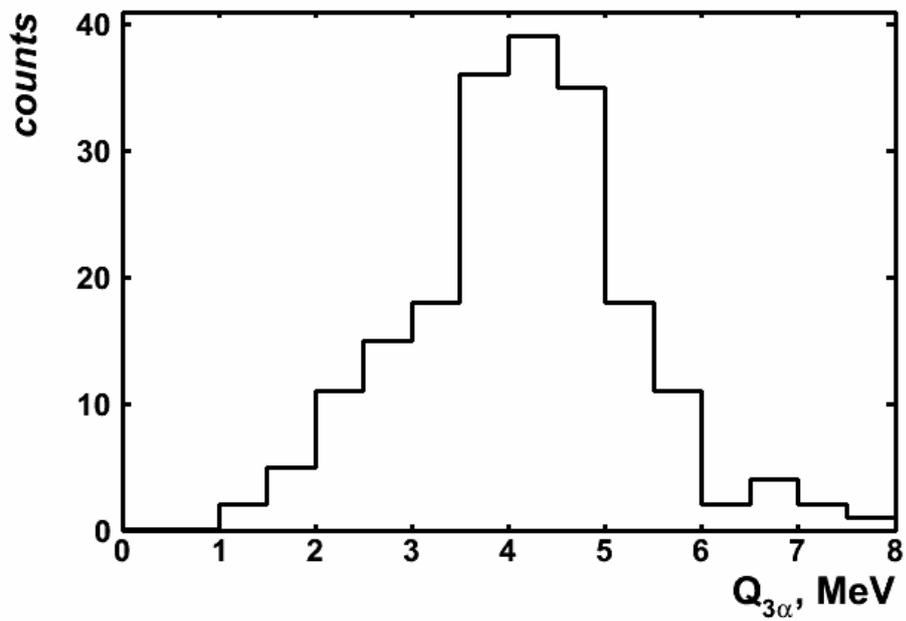
Возможность облучения в интенсивном потоке моноэнергетических нейтронов возникла при попутном использовании генератора нейтронов одного из испытывавшихся приборов ДВИН [16]. Первоначально поставленная задача ограничивалась калибровкой ядерной эмульсии, недавно воспроизведенной компанией «Славич» [17]. Однако в результате достаточно быстрого нахождения значительного числа троек  $\alpha$ -частиц (рис. 16), достигшей 1200 событий (рис. 17), была осознана возможность эксклюзивного анализа «забытой» реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  как задачи ядерной кластеризации.

На статистике 200 событий изучались  $\alpha$ -частичные расщепления ядер  $^{12}\text{C}$  в ядерной эмульсии, облученной нейтронами с энергией 14.1 МэВ. Выполнены измерения пробегов в эмульсии и относительных углов вылета  $\alpha$ -частиц, образовавшихся в реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  и получены распределения на основе программы SRIM по энергии  $\alpha$ -частичных пар (рис. 18). Образование 80%  $3\alpha$  троек соответствует возбуждениям ядра  $^{12}\text{C}$  от порога до 14 МэВ (рис. 19). Вклад в эту реакцию распадов через основное ( $0^+$ ) и первое ( $2^+$ ) возбужденное состояние промежуточных ядер  $^8\text{Be}$  предварительно оценивается около 25% и 30% по данным рис. 20, соответственно. С позиции  $3\alpha$ -кластерной картины эти данные указывают на присутствие суперпозиции состояний  $0^+$  и  $2^+$  ядра  $^8\text{Be}$  с такими вероятностями в основном состоянии ядра  $^{12}\text{C}$ .

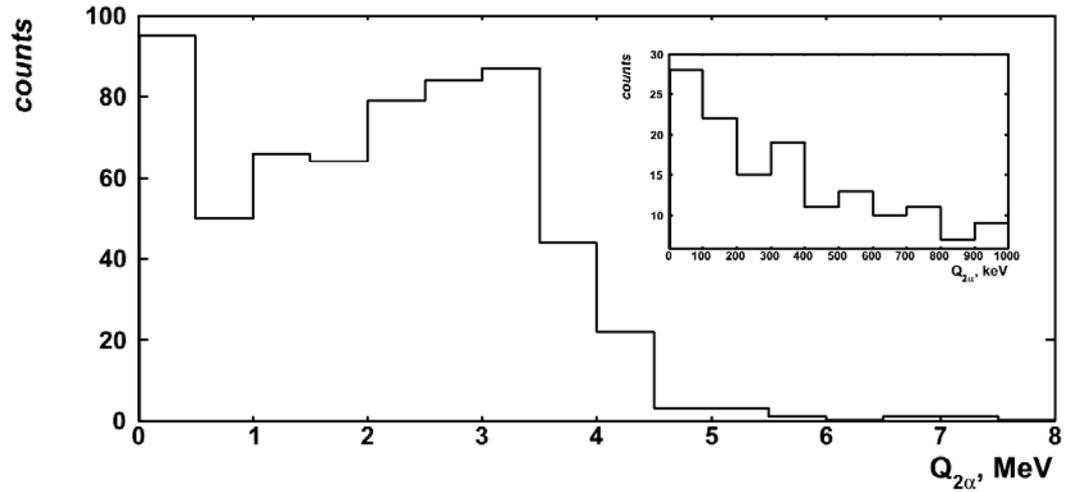
Эти данные носят предварительный характер, однако статистика имеет хорошую перспективу увеличения при интенсификации измерений на микроскопах KSM. Тогда возникнет возможность детального анализа угловых корреляций. Именно на эту задачу, являющуюся дополнительной к основной работе группы, нацелен запрос на грант. Спектр по энергии  $\alpha$ -частичных пар имеет сложность в интерпретации из-за комбинаторики вносимой тройным образованием  $\alpha$ -частиц. Выполнен сравнительный анализ зависимости значений энергии, приписываемых  $\alpha$ -частицам, от их пробега в различных типах эмульсии по программам моделирования SRIM и GEANT4 (рис. 21). Данный эксперимент позволит протестировать предсказания этих моделей. Однако уже сейчас с тем можно утверждать, что значительный вклад распадов  $^8\text{Be}$ , а также сепарация выбитых  $\alpha$ -частиц могут дать основу для интерпретации реакции  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$  на основе моделирования и теоретических моделей.



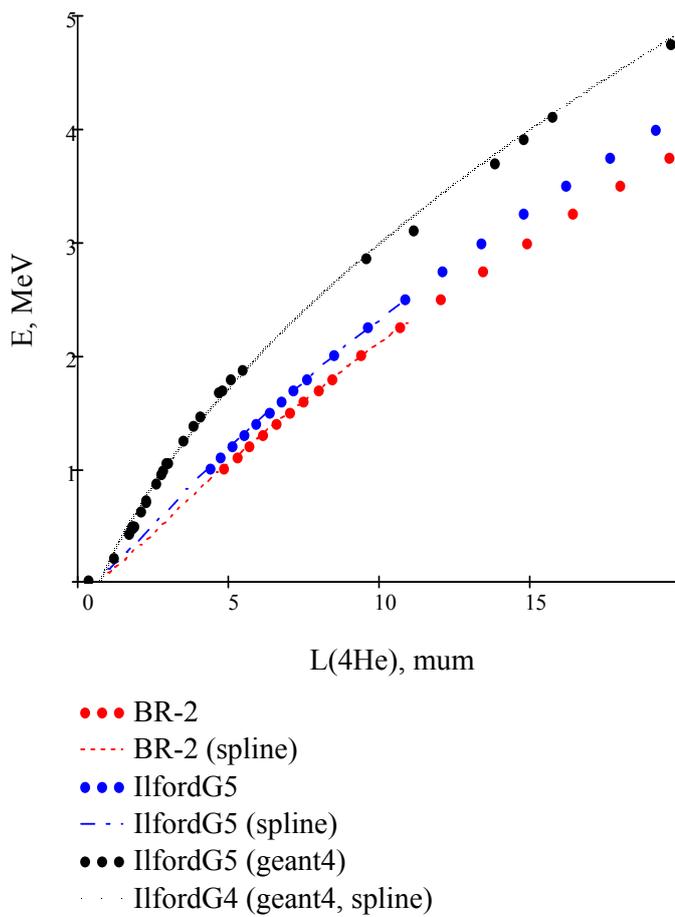
**Рис. 18.** Распределение углов разлета пар  $\alpha$ -частиц  $\Theta_{2\alpha}$  и расчетных значений энергии этих пар  $Q_{2\alpha}$  в расщеплениях  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$ , вызванных нейтронами с энергией 14 МэВ.



**Рис. 19.** Распределение значений энергии троек  $\alpha$ -частиц  $Q_{3\alpha}$  в расщеплениях  $^{12}\text{C}(n,n')3\alpha$ , вызванных нейтронами с энергией 14 МэВ.



**Рис. 20.** Распределение значений энергии пар  $\alpha$ -частиц  $Q_{2\alpha}$  в расщеплениях  $^{12}\text{C}(n,n')^3\alpha$ , вызванных нейтронами с энергией 14 МэВ. На вставке: увеличенное распределение  $Q_{2\alpha}$ , в диапазоне соответствующем распадам через основное состояние ( $0^+$ ) ядер  $^8\text{Be}$ .



**Рис. 21.** Зависимость значений энергии, приписываемых  $\alpha$ -частицам, от их пробега в различных типах эмульсии по программам моделирования SRIM (красные и синие точки) и GEANT4 (черные точки).

## Заключение

Соотношение выходов  $\alpha$ -частичных пар, в рожденных расщеплении ядер  $^{12}\text{C}$  через состояния  $^8\text{Be}_{2+}$  и  $^8\text{Be}_{g.s.}$  вызванных соударениями не сопровождаемыми передачей углового момента, представляется ключевым параметром для проверки спиновой структуры  $^{12}\text{C}$  в рамках картины  $\alpha$ -кластеризации. Анализ взаимодействий в ядерной эмульсии, облученной нейтронами с энергией вблизи порога расщепления  $^{12}\text{C}$ , позволяет определить эту и другие характеристики реакции  $^{12}\text{C}(n,n')^3\alpha$ .

Практическим результатом настоящей работы станет демонстрация возможностей недавно воспроизведенной ядерной эмульсии. Тестовый эксперимент позволил представить независимым образом идентификацию радиоактивных ядер  $^8\text{He}$  по распадам при остановке в эмульсии, оценить возможность  $\alpha$ -спектрометрии этих распадов, а также впервые наблюдать эффект дрейфа атомов  $^8\text{He}$ , термализованных в веществе. Комбинированный анализ распадов ядер  $^8\text{He}$  и реакции  $^{12}\text{C}(n,n')^3\alpha$  будет служить прототипом для исследования распадов ядер,  $^8,9\text{Li}$ ,  $^8,^{12}\text{B}$ ,  $^9\text{C}$ ,  $^{12}\text{N}$ , в которых ядро  $^8\text{Be}$  служит в качестве «маркера»..

Статистика «молоточковых» распадов, найденных в тестовом исследовании, составляет небольшую долю от потока ядер  $^8\text{He}$ , а измеренных распадов около 10% от этой доли. Это ограничение определялось «разумными» затратами человеческого времени и труда. Вместе с тем, ядерная эмульсия, в облученная нейтронами или радиоактивными ядрами, дает основу для применения автоматических микроскопов и программ распознавания изображений, позволяя рассчитывать на беспрецедентную статистику анализируемых распадов. Тем самым может быть достигнут синергетический эффект объединения классической методики и современных технологий. Ядерная эмульсия может служить средством диагностики пучков радиоактивных изотопов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Freer, Rep. Prog. Phys., **70**, 2149 (2007) .
2. W. von Oertzen, M. Freer, Y. Kanada-En'yo, Phys. Rep., **432**, 43 (2006).
3. T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, . Lect. Notes Phys. **848**, 109(2012), Springer.
4. C. F. Powell, P. H. Fowler, and. D. H. Perkins // The Study of Elementary Particles by the Photographic Method: Pergamon Press, 1959, P. 465–472;  
<http://becquerel.jinr.ru/text/books/POWELL.pdf>;  
[http://becquerel.jinr.ru/text/books/Powell\\_F.pdf](http://becquerel.jinr.ru/text/books/Powell_F.pdf).
5. F. Ajzenberg-Selove // Nucl. Phys. A 1988, V. 490, P. 1–266; TUNL Nuclear Data Evaluation Project, <http://www.tunl.duke.edu/NuclData/> .
6. D. A. Artemenkov et al. // Phys. Atom. Nucl. **70**, 1226 (2007); nucl-ex/0605018.
7. P. I. Zarubin Lect. Notes Phys. (2013), Springer, to be published;  
[http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/Zarubin\\_Springer/Zarubin\\_Springer\\_120912\\_OK%20\(1\).pdf](http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/Zarubin_Springer/Zarubin_Springer_120912_OK%20(1).pdf);

[http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/Zarubin\\_Springer/Zarubin\\_Springer\\_120912\\_OK%20\(1\).pdf](http://becquerel.jinr.ru/text/Papers/Zarubin_Springer/Zarubin_Springer_120912_OK%20(1).pdf).

8. Y. L. Parfenova and Ch. Leclercq-Willain, Phys. Rev. C **72**, 054304 (2005).
9. Y. L. Parfenova and Ch. Leclercq-Willain, Phys. Rev. C **72**, 024312(2005).
10. M. Freer et al. Phys. Rev C **76**, 034320 (2007).
11. The BECQUEREL Project <http://becquerel.jinr.ru> .
12. M. S Swami., J. Schneps, and W. F. Fry // Phys. Rev. 1956, V. 103, P.1134–1135.
13. The ACCULINNA Project <http://aculina.jinr.ru/> /
14. Ziegler J. F., Biersack J. P. and Ziegler M. D. SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter 2008, ISBN 0-9654207-1-X., SRIM Co; <http://srim.org/> .
15. A. B. Aleksandrov et al., Nucl. Instr. & Meth. A **535**, 542 (2004)
16. Bystritsky V. M. et al. // Phys, Part. Nucl. Lett., V. 6 P. 505–510; [http://becquerel.jinr.ru/miscellanea/DVIN/DVIN\\_01.12.11/DVIN\\_eng.pdf](http://becquerel.jinr.ru/miscellanea/DVIN/DVIN_01.12.11/DVIN_eng.pdf) ;  
[http://becquerel.jinr.ru/miscellanea/DVIN/DVIN\\_01.12.11/DVIN\\_rus.pdf](http://becquerel.jinr.ru/miscellanea/DVIN/DVIN_01.12.11/DVIN_rus.pdf) .
17. TD Slavich // [www.slavich.ru](http://www.slavich.ru)

#### **Дополнение.**

#### **Резюме подготовленное Prof. M. Freer**

<http://www.birmingham.ac.uk/staff/profiles/physics/freer-martin.aspx>

#### **Study of cluster and spin structure of the $^{12}\text{C}$ nucleus in nuclear track emulsion**

##### *Research Aims*

*State scientific aims (max 800 characters including spaces)*

The aim is to pin down the structure of a key state in  $^{12}\text{C}$  which is responsible for the formation of all organic life. The presence of the Hoyle-state in  $^{12}\text{C}$  enhances the formation of carbon in stellar processes by eight orders of magnitude. If it did not exist nor would human kind. It was discovered over 30 years ago and its structure remains uncertain. The aim of the present proposal is to bring together an expert group from the UK who have been working on this problem, with a group from Russia who have developed a highly novel experimental technique, which promises to provide data which extends what has been achieved to-date.

##### *Research proposal*

*Outline the nature and purpose of your research project including a description of the experimental methods and techniques you will be using (max 4000 characters including spaces)*

By the end of the joint project the aim is to have obtained and analyzed data which will definitively reveal the structure of the Hoyle state.

One of the longest standing problems in nuclear physics is the understanding of the Hoyle-state in carbon-12, the gateway for the synthesis of carbon in stellar nucleosynthesis. It has long been believed that this state is not only special due to its role in facilitating organic life but that it appears to have a rather unusual structure - composed of three alpha-particle clusters. Here 2 protons and 2 neutrons coalesce into alpha-particles and the relevant degrees of freedom become bosonic rather than fermionic. Proving this conjecture has proved rather challenging. There have been significant advances in recent times, in part led by the Birmingham group, but

the situation is by no means definitive. To understand the structure it is necessary to find the excitations of the Hoyle-state – and this is where the advances have been made. However, the states associated with these excitations are weakly formed and high precision, high sensitivity data are required. The Birmingham group have been performing measurements with charged particle beams and charged-particle detectors and spectrometers. The Russian group have developed a technique for using photographic emulsions in which neutrons interact with carbon atoms within the emulsion splitting them into the three alpha-particles. Although dating back to the earliest days of the subject, the advance in the digitization of the images, coupled with the full characterization of the emission patterns of the decay mean that there is great potential for understanding the excitations of the Hoyle state. The technique has hitherto not been used in such studies and there is significant potential for a breakthrough. This proposal brings together the expertise and experience of the UK researchers with the group which has the capability to do the emulsion measurements and analysis. These groups have never worked together and hence offers significant potential for scientific advance.

A second strand to the context of the research lies in the current pursuit to develop first principles calculations of the nuclei - so-called ab initio calculations. Worldwide there is a tremendous effort to take the understanding of the nucleon-nucleon interaction, together with three-body forces, and calculate the structure of nuclei. If such an approach is successful then it should not only be able to predict the structure of "normal" nuclei, but also exotic states such as the Hoyle-state. Consequently the Hoyle state has become a tremendous focus of activity for this community also.

The experimental approach is simple; exposure photographic emulsions to a neutron beam and analyze the tracks made when the  $^{12}\text{C}$  nucleus decays into 3 alpha-particles. The analysis of the events is reasonably painstaking.

Project Work Plan:

Russian:

2013: Experimental measurements. The accumulation of statistics up to 1000 events by neutron irradiating nuclear emulsions microscopes, leading to the  $3\alpha$ -decay of  $^{12}\text{C}$ .

2013-2014: Analysis of the events formed in the emulsions, including the reconstruction of emission angles and centre-of-mass energy of the emitting system.

UK:

2013-14. Participate in measurements and development of theory of the reaction  $^{12}\text{C}(n, n')3\alpha$  and its simulation.

2014-2015. Participate in elements of the analysis and modeling of the  $^{12}\text{C}(n, n')3\alpha$  data to understand implications for excitations of the Hoyle-state.

Both:

2015: publication of research.

This research programme will result in significant knowledge transfer between the groups.

#### *Benefits to individuals/institutions*

*Describe clearly the planned outcomes and any potential benefits that will result from the proposed collaboration for the applicant, co applicant and the respective institutions (max 500 characters including spaces)*

Collectively: potential for advance in a key scientific area, knowledge transfer in terms of science and experimental techniques, develop UK-Russian scientific links in nuclear physics which at present are extremely weak.

#### *Benefits to UK*

*Describe any potential benefits to the UK and UK research base that will result from the proposed collaboration (max 500 characters including spaces)*

Establish UK connections with the leading Russian nuclear physics institute - a place which is leading in the discovery of new atomic elements (latest is element 118). Broaden base of experimental techniques. In the current research environment what has been developed by Dr. Zarubin is highly novel.

*Benefits to Overseas Country*

*Describe any potential benefits to the overseas country (co-applicant's country) that will result from the proposed collaboration (max 500 characters including spaces)*

Opportunity to be involved in a high impact research area and collaborate with arguably the leading research group in this area. Ability to develop a detailed understanding of the scientific and analytical challenges around the study of light nuclei.

*Lay Report*

*Provide a lay summary of your proposed project. This should be understandable by an A-level science student. Explain why you have chosen to work in this subject area and what it is about your proposed research that you find particularly exciting, interesting or important. Also explain the potential impact or wider benefits to society of your research (max of 3,500 characters including spaces)*

In science there are a number of outstanding challenges, not least of which is "how did we get here?". This question may be traced back to the event of the Big Bang (as we currently believe) where there was a transition from energy to matter, through a phase called the quark-gluon-plasma, the condensation to hadrons, nucleons and protons to form light nuclei and then it stopped. The rest of the formation of the elements had to wait for the formation of stars in which protons are transformed to alpha-particles and then in the red giant phase alpha-particles to heavier nuclei. A (and perhaps the) key step in this is the formation of carbon-12. It turns out that without the existence of a key state in this nucleus that there would be hardly any carbon at all. This was realized in the 1950s by Sir Fred Hoyle who anthropomorphically predicted the existence of this state.

Over the last 50 years it has been realized that this state is not only important for the understanding of the formation of the elements (carbon and heavier), but that it may hold a key for understanding nuclear matter and the nature of the strong interaction within the nucleus. For many years the dream of theoretical nuclear physics has been to attempt to calculate the properties of nuclei from first principles. These first principles are based on understanding the force between two nucleons and then building a nucleus based on all of the two nucleon interactions. This is slightly complicated by the fact that inside a nucleus there is an additional component to the force that is only present when three nucleons are present - called 3-body forces. Nevertheless, it is now possible with these approaches to reach the nucleus  $^{12}\text{C}$  - for many such models this is the limit.

What has become clear is that the Hoyle-state has a very unusual structure where rather than being described as a collection of 12 nucleons (6 protons and 6 neutrons) it behaves as a collection of 3 alpha-particles. Showing that this is the case and indeed how those alpha-particles may be arranged is the challenge of the current project. In fact it is possible that this make flag a completely new state of nuclear matter - a bosonic state.

This proposal is to join forces between a UK group who have been working on this problem for a number of years with a Russian team who have a different experimental approach. The idea is to examine the explosion of  $^{12}\text{C}$  into three alpha-particles when it is struck by a neutron. The carbon nucleus is within a photographic emulsion and the tracks of the 3 alpha-particles can be found by examining the emulsion after irradiation with neutrons. By examining the emission angles and the energies (which come from the length of the tracks) it is possible to reconstruct the properties of  $^{12}\text{C}$  the instant before it decayed. We hope that this new approach will provide an insight into the nature of this very special nuclear state.