

Исследование взаимодействий релятивистских ядер в эмульсии - программа «Беккерель» по облучению эмульсий в пучках нуклотрона. *В рамках темы «Исследование множественных процессов в 4π геометрии и создание установки СФЕРА. Подготовка и проведение первоочередных экспериментов».*

Проект Беккерель

**Ю. С. Анисимов, В. Браднова, С. В. Бородин, Л. В. Дуднакова,
А. Д. Коваленко, В. А. Краснов, И. И. Марьин, Е. Б. Плеханов,
Н. В. Прозорова, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, П. И. Зарубин**

**Лаборатория высоких энергий,
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна**

В. В. Ужинский

**Лаборатория информационных технологий,
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна**

**М. И. Адамович, М. М. Чернявский, В. А. Дронов, С. П. Харламов,
К. А. Котельников, В. Г. Ларионова, Г. И. Орлова, Н. Г. Пересадько,
Н. Г. Полухина, Н. А. Салманова**

Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

С. Вокал

Университет им. К. Шафарика, Кошице, Словакия

Аннотация

Программа облучения эмульсий в пучках нуклотрона «Беккерель» предусматривает продолжение облучения ядерных эмульсий во вновь формируемых пучках нуклотрона для детального исследования процессов фрагментации легких радиоактивных ядер, а также для получения обзорной информации по зарядовым состояниям вторичных частиц при облучении ядрами со средним и тяжелым весом. Планируемые результаты позволят прояснить актуальные вопросы кластерной структуры легких радиоактивных ядер, а также проявление коллективных эффектов в плотной среде сталкивающихся ядер. Благодаря наилучшему пространственному, ядерные эмульсии позволят получить уникальные результаты по этим направлениям.

Облучения будут выполнены на вторичных пучках радиоактивных ядер гелия, бериллия, бора, углерода, азота, сформированных на основе первичных пучков стабильных ядер нуклотрона. При получении на нуклотроне пучков тяжелых ядер будут выполнены облучения ядрами висмута.

В рамках этой программы объединены возможности групп, обладающих просмотровым и измерительным оборудованием (микроскопы) и оборудованием проявления эмульсий. Особый интерес представляет использование эмульсионным сотрудничеством полностью автоматизированного микроскопного комплекса в ФИАН им. П. Н. Лебедева.

Эмульсионное сотрудничество обладает уникальной информацией и опытом обработки как по взаимодействиям легких ядер полученными в Дубне, так и на тяжелых при энергиях БНЛ и ЦЕРН (сотрудничество ЕМУ). В настоящее время особый интерес представляют результаты и возможности этой методики по когерентной диссоциации ядер лития, углерода, кислорода, магния и серы, которые открывают новые возможности в понимании актуальных вопросов структуры ядра. Преимущества, предоставляемые при использовании пучка нуклотрона для исследования фрагментации состоят в мгновенном характере реакции, достижении режима предельной фрагментации, коллимации продуктов фрагментации в узком конусе, а также минимальные ионизационные потери продуктов реакций.

Эмульсии дают особые преимущества при исследованиях с нейтронодефицитными ядрами. Особый интерес представляет поиск доказательств наличия протонного гало для радиоактивных ядер играющих важную роль в астрофизических процессах ядерного синтеза, таких как ${}^8\text{B}$. Именно это направление работы представляется наиболее актуальным на ближайшие годы.

**Постановка вопросов исследования:
нуклеосинтез и кластеризация в ядрах**

Одной из основных целей современной физики атомного ядра становится масштабная задача осознания богатства таблицы изотопов как ступенек в творении окружающего мира. Это разнообразие позволяет осуществить творение мира стабильных ядер в Природе при весьма разнообразных сценариях. Радиоактивные ядра, резонансные состояния ядер – не просто шлейф отходов от звездных реакций горения и процессов взрывного типа в космосе, а необходимые «станции ожидания» на пути наиболее эффективной генерации стабильных ядер. Наблюдения за ядерной активностью космоса, включая радиоактивные ядра, могут подсказать неожиданные решения в области термоядерного синтеза энергии.

Эти утверждения подкрепляются наблюдениями последних лет на спутниках ACE и SOHO. Их спектрометры анализируют изотопный и ионный состав галактических и солнечных частиц. При изотопном анализе наблюдаются радиоактивные изотопы алюминия, хлора, марганца с периодами полураспада порядка миллионов лет (слайд 1). Это соответствует характерному времени обращения релятивистских ядер вокруг Млечного пути. Обнаружен изотоп ${}^7\text{Be}$ – совсем свежий свидетель ядерных превращений на Солнце с периодом полураспада 53 дня. Таким образом, Природа обеспечивает часы в виде радиоактивных ядер для анализа астрофизических картины мира.

Микроскопическое устройство ядер определяет устройство мира в грандиозных масштабах. Оно отражается в распространенности изотопов в космических лучах, веществе звезд, планет, туманностей. Изучение структуры ядер имеет несомненную и глубокую связь с ядерными аспектами астрофизических явлений.

Исследования легких ядер, лежащих в области границы нейтронной стабильности, сформировали в последние годы актуальное направление исследований – физика ядер с экзотической структурой (слайд 2). Были установлены новые явления в структуре легких ядер и протекании ядерных реакций. В этой области наблюдаются аномально большие радиусы ядер, образование разделенных в пространстве нуклонных ядерных кластеров (слайд 3). Малые энергии связи ядерных кластеров позволяют определить структуру таких ядер молекулярно-подобную. В основном, это радиоактивные ядра, а из стабильных ядер их ближайшие соседи – дейтрон, изотопы ${}^3\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$.

Большие успехи достигнуты в изучении структуры ядер с избытком и предельным числом нейтронов. Не исключено, что нейтронное гало у легких ядер может играть роль катализатора в звездных термоядерных процессах – ведь таким образом снижается проблема кулоновского отталкивания при слиянии ядер. В свою очередь это ведет к упрощению цепочки генерации изотопов углерода, кислорода, азота – важнейшей ступеньки к более тяжелым элементам. Например, слияние двух изотопов ${}^6\text{He}$ ведет к образованию изотопа ${}^{12}\text{Be}$, который быстро распадается в основной изотоп углерода. Это своего рода «черный вход» в известный CNO цикл, минуя образование нестабильного ядра ${}^8\text{Be}$.

Экспериментальные исследования структуры ядер с избытком протонов (или дефицитом нейтронов) практически только планируются. Основной целью таких экспериментов является определение свойств ядер вблизи границы протонной стабильности ядер, изучение структурной связи избыточных протонов, изучение влияния заряда на образование кластерных структур и на образование протонного гало, а также изучение нестабильных остаточных ядер.

Структура таких ядер может оказаться еще одним ключом к пониманию процессов синтеза элементов в звездах, на Солнце, а также в изначальных процессах нуклеосинтеза при возникновении Вселенной. Она оказывается в основе так называемых быстрых процессов захвата протонов. Наличие протонного гало (сильно удаленного от остова ядра протона) становится «трамплином» генерации изотопов при продвижении вдоль границы протонной стабильности, с последующим распадом в область стабильных изотопов. Оно решает проблему кулоновского отталкивания при ядерном синтезе. Главное преимущество перед механизмом быстрого захвата нейтронов – стабильность протона, а, значит, уход от требования взрывного характера звездного термоядерного процесса. Ядерная система может состоянием типа гало «дождаться» β^+ распада и поглотить нейтрон.

Одним из кандидатов в систему типа протонного гало является ядро ${}^8\text{B}$. С его участием выход в солнечный CNO цикл, важный для генерации ядер ${}^4\text{He}$, может происходить в результате присоединения к ${}^7\text{Be}$ протона и последующим присоединением ядра ${}^4\text{He}$. Образующееся ядро ${}^{12}\text{N}$ распадается в стабильный изотоп ${}^{12}\text{C}$. Преимущество здесь

по сравнению с известным вариантом через ядро ${}^8\text{Be}$, предложенным Ф. Хойлом, во времени жизни ${}^8\text{B}$ на 16 порядков больше чем у ядра ${}^8\text{Be}$.

Другой пример - это присоединение еще одного протона к ядру ${}^8\text{B}$ с образованием радиоактивного изотопа ${}^9\text{C}$. Присоединение к ${}^9\text{C}$ ядра ${}^4\text{He}$ приводит к образованию изотопа ${}^{13}\text{N}$, промежуточного в CNO цикле. При этом обходится нестабильное ядро ${}^9\text{B}$. Такие примеры кластерных ядерных систем можно приводить и еще, включая возбужденные состояния радиоактивных ядер.

Выяснение применимости картины кластеризации в легких ядрах и составляет основную цель предлагаемого цикла исследований. Мы обосновываем подход к изучению кластеризации в ядрах на основе опыта по изучению фрагментации ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^6\text{He}$ в веществе эмульсии при релятивистских энергиях. Предлагается программа дальнейшего изучения фрагментации изотопов Be, B, C, N с дефицитом нейтронов.

Участники проекта выбрали для него название – Беккерель. Это название предложено не только в честь великого основателя фотографического метода наблюдения радиоактивности. Оно содержит одну из первых целей проекта в английском варианте названия – поиск кластерной структуры изотопов бериллия в процессах релятивистской фрагментации.

Ядерная физика на при релятивистских энергиях

Эксперименты с пучками ядер при энергии порядка нескольких ГэВ признаются одним из наиболее перспективных путей понимания основных свойств и внутренней структуры радиоактивных и несвязных ядер. Используя такие пучки можно произвести на лету пучки изотопов путем реакций развала, обмена зарядом или деления. В таком подходе отсутствует ограничение на время жизни исследуемого релятивистского нуклида в практически важном диапазоне. Методическим преимуществом для регистрации протоноизбыточных ядер является снижение эффектов ионизационных потерь в релятивистской области.

Базисом для применения такого подхода является явление предельной фрагментации ядер. Оно установлено в ранних работах по релятивистской ядерной физике на синхрофазотроне. Установлено, что в целом картина фрагментации (рассыпания) одного из сталкивающихся ядер имеет ослабленную зависимость от характеристик или фрагментации другого ядра. Исследование фрагментации релятивистских ядер могут эффективно дополнить классические эксперименты по развалу ядер, используемых как мишень. В таком подходе порог детектирования близок к нулю, что делает возможным исследовать процессы фрагментации при весьма слабом возмущении ядра.

Экспериментальный подход, базирующийся на регистрации фрагментов ядра-снаряда, выдвигает ультимативное требование к методике измерений обеспечивающей предельно возможное угловое разрешение и идентификацию фрагментов в узком переднем конусе. Кроме того, процесс фрагментации ведет к заметно меньшей ионизации производимой продуктами реакции по сравнению с сигналом от первичного ядра. Это обстоятельство накладывает особое требование на широту диапазона чувствительности от начального ядра вплоть до частиц с минимальной ионизацией. Таковы специфические требования к эксперименту при выборе синхротрона как инструмента исследования структуры ядра. Осуществление измерений в полном телесном угле уже не имеет такое значение как предельное угловое разрешение в узком угловом конусе релятивистской фрагментации.

Легкие ядра в эмульсии

Методика ядерных фотоэмульсий всегда обеспечивала обзорные наблюдения по физике микромира благодаря высокой достоверности наблюдаемых событий, прекрасному пространственному разрешению и максимально полной наблюдаемости следов заряженных частиц. В ряде важных случаев она позволяет измерять импульсы, идентифицировать частицы. Поэтому именно она представляется эффективным способом изучать процессы

релятивистской фрагментации благодаря высокому разрешению эмульсий и возможности наблюдения реакций в полной геометрии. Особое преимущество имеет наблюдение в эмульсиях ядер с дефицитом нейтронов, благодаря более полной наблюдаемости продуктов реакции.

Физика релятивистских ядер сохраняет ее в своем арсенале экспериментальных средств. За последнее десятилетие международное сотрудничество EMU, объединившее физиков-эмульсионщиков пяти континентов, на пучках релятивистских ядер свинца ЦЕРН получило обширный обзорный материал по глобальным особенностям соударения. В рамках поиска эффектов образования кварк-глюонной плазмы эта информация позволила провести настройку теоретических моделей описывающих соударения ядер. Не в последнюю очередь это было сделано благодаря вкладу дубненских участников сотрудничества. Он включал в себя не только просмотр, но и химическую обработку облученного материала в ЛВЭ. Один из практических итогов, состоит в том, что классическая методика сохранила «форму» к моменту получения выведенного пучка на нуклотроне. Использование этой экспериментальной культуры – основа для нового экспериментального исследования в области классической физики атомного ядра.

Важным импульсом для осознания указанных выше возможностей при исследовании легких ядер стали результаты по взаимодействиям релятивистских ядер ${}^6\text{Li}$ с ядрами эмульсии, полученные группами Каирского университета, Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (Москва) и Петербургского института ядерной физики РАН (Гатчина). Опишем результаты этого исследования, опираясь на работу группы проф. М. И. Адамовича из ФИАН (слайд 7).

Стопка из эмульсионных слоев была облучена пучком ядер ${}^6\text{Li}$ на синхрофазотроне. Во время облучения пучок направлялся параллельно плоскости эмульсии. Первой интригующей особенностью обнаруженной тремя группами оказался резко уменьшенный средний пробег ядер ${}^6\text{Li}$ по сравнению с ожидавшимся значением. Полученное значение соответствовало бы скорее ядру с массовым числом A равным 11. Это указывает на необычно большой радиус распределения нуклонов в ядре ${}^6\text{Li}$. С использованием геометрической модели перекрытия его значение было оценено как $2,7 \pm 0,1$ фм, что находится в разумном согласии с известными данными (слайд 8).

Другая отличительная особенность ядра ${}^6\text{Li}$ была получена посредством анализа многократного рассеяния треков (слайд 9). Во-первых, был установлен необычно высокий выход релятивистских дейтронов. Последующий анализ включал ядра ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$. Было показано, что фрагментация ядер ${}^6\text{Li}$ в форме кластеров ${}^3\text{He}$ и трития на порядок слабее, чем структура сформированная α -частицей и дейтроном (слайд 10). Это объясняет усиленный выход дейтронов как отражение структуры из слабосвязанных кластеров α -частицы и дейтрона.

Канал фрагментации ${}^6\text{Li} \rightarrow \alpha$ указывает на пониженное значение среднего поперечного импульса α -частиц $\langle p_{\perp}^{\alpha} \rangle = 0,13 \pm 0,1$ ГэВ/с. Известно, что для взаимодействий ядер ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$ в эмульсии это значение равно $\langle p_{\perp}^{\alpha} \rangle = 0,24 \pm 0,01$ ГэВ/с. В духе соотношения неопределенности этот факт является еще одним указанием на увеличенный размер ядер ${}^6\text{Li}$.

Как «золотые» можно рассматривать 31 событие когерентной диссоциации ядер ${}^6\text{Li}$ не сопровождаемые возбуждением ядра мишени (слайд 11). Среди них 23 события соответствуют каналу диссоциации $\alpha + d$, 4 - ${}^3\text{He} + t$, 4 - $t + d + p$, 0 - $d + d + d$. Эта топология демонстрирует кластерную структуру ${}^6\text{Li}$ наиболее очевидным образом. Более того, благодаря полностью восстановленной кинематике стало возможным восстановить уровни возбуждения ядра ${}^6\text{Li}$ 2,19, 4,31 МэВ с изоспином $T=0$. Напротив, уровень 3,56 МэВ имеющий изоспин $T=1$ отсутствует из-за изоспина системы $\alpha + d$ $T=0$.

Обсуждаемое изучение ядра ${}^6\text{Li}$ указало на высокую вероятность процесса обмена зарядом ${}^6\text{Li} \rightarrow {}^6\text{He}$ на ядрах материала эмульсий [2], [3]. Как и ожидалось, он сопровождается рождением заряженного мезона. Этот результат стимулировал эксперимент в 1999 г. по облучению эмульсий вновь сформированным пучком ядер трития и ${}^6\text{He}$ синхрофазотрона ОИЯИ. Такой смешанный пучок является неизбежной особенностью регистрации, так как оба ядра имеют одинаковое отношение Z/A и не могут быть разделены при магнитном анализе. Полученная доля ядер ${}^6\text{He}$ в пучке составила величину около 0,01. Частицы с зарядом 2 легко различимы при визуальном анализе облученной эмульсии (слайд 12).

Как самый первый результат анализ фрагментации ${}^6\text{He} \rightarrow \alpha$ указывает на узость распределения по поперечному импульсу α -частиц при среднем значении $\langle p_{\perp}^{\alpha} \rangle \approx 50$ МэВ. Таким образом, оно даже уже чем для случая фрагментации ядра ${}^6\text{Li}$. Кроме того, интересно отметить, что впервые в эмульсии наблюдались события перезарядки $t \rightarrow {}^3\text{He}$ (около 20 событий, пример на слайде 3).

Основываясь на исследованиях ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^6\text{He}$, мы ожидаем, что эмульсионная методика позволит достичь более глубокого понимания структуры легких ядер вдоль линии протонной стабильности. Очевидно, что исследования релятивистской фрагментации нейтронодефицитных ядер ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^9\text{C}$, ${}^{10}\text{C}$, ${}^{11}\text{C}$, ${}^{12}\text{N}$ должны лечь в основу будущих облучений. Эмульсионная методика имеет преимущества благодаря наиболее полному наблюдению конечных состояний. К тому же разделение в магнитном анализе нейтронодефицитных изотопов становится проще при росте отношения Z/A .

Поиск кластерной структуры ядра ${}^7\text{Be}$ может рассматриваться как естественное развитие изучения ядра ${}^6\text{Li}$. Такая структура может проявлять себя в вероятностях фрагментации ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Li}p$, ${}^7\text{Be} \rightarrow \alpha dp$ и др. Следуя этой линии, представляет интерес исследовать кластерную структуру стабильного изотопа ${}^{10}\text{B}$ по каналам диссоциации ${}^{10}\text{B} \rightarrow ({}^8\text{Be})d \rightarrow \alpha\alpha d$, ${}^{10}\text{B} \rightarrow {}^6\text{Li}\alpha$ и др.

Таким образом, можно сделать вывод, что эмульсионная методика может стать важным источником достаточно полной информации по проблемам кластеризации и протонного гало в ядрах. Информация по ядерной фрагментации может обеспечить ценные данные по свойствам несвязанных ядер типа ${}^5\text{He}$, ${}^5\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$ являющихся важными «посредниками» в звездном нуклеосинтезе. Эмульсионная методика может стать важным источником достаточно глубокой информации по проблемам кластеризации и протонного гало в нестабильных ядрах.

Вторичные пучки ускорителя релятивистских ядер

В настоящее время в Лаборатории высоких энергий активно обсуждаются предложения по формированию релятивистских пучков радиоактивных изотопов бериллия, бора, углерода, азота. Подход, основанный на использовании зарядово-обменного процесса вместо процесса развала ядер, представляется плодотворным при энергии пучка несколько ГэВ на нуклон. В этом случае сохраняется массовое число начального ядра и, возможно, задается кластерный характер его внутренней структуры.

Следующие процессы могут быть использованы для получения нестабильных релятивистских ядер ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{B} \rightarrow {}^{10}\text{C}$, ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N}$ и др. Определенным преимуществом при формировании вторичных пучков в сторону нарастания заряда является уменьшение в магнитном канале относительного фона других фрагментов. Повторимся, что эмульсионная методика будет иметь преимущества для изучения этих ядер благодаря наиболее полному наблюдению конечных состояний.

Среди возможных применений такого подхода можно рассматривать формирование пучка на двух последовательных перезарядках (двух мишенях), например, ${}^{10}\text{B} \rightarrow {}^{10}\text{C} \rightarrow {}^9\text{C}$ ${}^{11}\text{B} \rightarrow {}^{11}\text{C} \rightarrow {}^{11}\text{N}$ (пересечение границы стабильности), ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} \rightarrow {}^{12}\text{Be}$. Последняя цепочка может привести к наблюдению процесса когерентной диссоциации ${}^{12}\text{Be} \rightarrow {}^6\text{He}{}^6\text{He}$ важного для проверки гипотезы о ядерно-молекулярной природе этого нуклида. Задел по идентификации ${}^6\text{He}$ в эмульсии здесь будет как нельзя более кстати.

Интересный пучок ядер ${}^8\text{B}$ может быть получен в реакциях развала стабильных изотопов, например, бора. Будучи предоставлен для исследований эмульсионной методикой, такой пучок может дать больше ясности в проблеме существования протонного гало. Он позволит выполнить измерения относительной силы процессов диссоциации ${}^8\text{B}$ в ${}^7\text{Be}$ и протон к другим возможным. Вслед за этим становится актуальным формирование пучка изотопа ${}^9\text{C}$.

Таким образом, комбинация новых пучков и классической методики может принести к новым интригующим и доказательным находкам.

Дальнейшее облучение эмульсий

Наиболее успешно с помощью фотоэмульсионного метода могут быть изучены ядра с избытком протонов. Нуклоны в протоноизбыточных ядрах с большой вероятностью образуют в этих ядрах заряженные кластеры, которые при распаде регистрируются в фотоэмульсии.

Следует особо отметить, что с помощью фотоэмульсий регистрируются многочастичные распады ядер, или события мультифрагментации. Наглядным примером могут служить успешные эмульсионные работы по исследованию распада ядер ^{12}C на 3 α -частицы и ядер ^{16}O на 4 α -частицы (слайды 4, 5, 6). Кроме того, распады ядер с избытком протонов с большой вероятностью могут проходить с образованием промежуточных ядерных резонансов, распадающихся на заряженные частицы. Фотоэмульсия может служить уникальным универсальным детектором многочастичных реакций и, в частности, продуктов распада таких резонансов.

Рассмотрим перспективы исследования фрагментации релятивистских радиоактивных ядер ^7Be , ^8B , ^9C , ^{10}C (слайд 13) имеющих в своем составе избыток протонов и стабильных ядер ^6Li и ^7Li . В фотоэмульсиях, облученных релятивистскими ядрами, регистрируются взаимодействия исследуемых ядер с ядрами фотоэмульсии. Для всех частиц определяются заряды по плотности ионизации следов и плотности δ -электронов. С большой точностью измеряются углы вылета всех заряженных частиц относительно направления первичного ядра и относительные углы между частицами. По величине средних углов многократного кулоновского рассеяния частиц в фотоэмульсии оцениваются массы всех релятивистских заряженных фрагментов. По продуктам распадов идентифицируются каналы мультифрагментации и реконструируются каналы распадов ядер на заряженные фрагменты.

Такие данные дают сведения о структурной связи избыточных протонов и структуре центральной части ядра, сведения о вероятностях формирования в ядре заряженных кластеров и об их импульсных распределениях в ядре. Измеряются относительные импульсы продуктов распада. По таким данным можно получить сведения об энергии возбуждения фрагментирующего ядра.

Особенностью ядра ^8B является рекордно малая энергия связи одного из протонов. Поэтому наиболее вероятно, что у ядра ^8B имеется остов в виде ядра ^7Be и слабо связанный с остовом протон, пространственное распределение которого во многом определяет значение радиуса ядра ^8B . В работе получают распределения по поперечному импульсу релятивистских протонов и ядер ^7Be . И распределение относительного поперечного импульса продуктов диссоциации. Измеряются вероятности отдельных каналов диссоциации $^8\text{B} \rightarrow ^7\text{Be} + p$, $^8\text{B} \rightarrow ^6\text{Li} + p + p$. По таким данным можно судить о структуре и протонной оболочке ядра ^8B .

Из всех рассматриваемых нами ядер ядро ^9C имеет наибольшее отношения числа протонов к числу нейтронов. Это ядро имеет еще один дополнительный протон относительно ядра ^8B . Но энергия связи этого добавочного протона значительно больше энергии связи внешнего протона в ядре ^8B . Поэтому у ядра ^9C , по-видимому, не образуется двухпротонной внешней оболочки. В работе будут измерены распределения продуктов фрагментации по поперечным импульсам, будут изучены каналы диссоциации ядра $^9\text{C} \rightarrow ^8\text{B} + p$, $^9\text{C} \rightarrow ^3\text{He} + ^3\text{He} + ^3\text{He}$ и др.

Ядро ^{10}C образуется из ядра ^9C присоединением одного нейтрона. Однако, добавление нейтрона, по-видимому, не приводит к образованию в ядре ^{10}C кластеров в виде дейтрона или в виде ядра ^3He . Двухкластерные структуры в виде ядер ^7Be и ^3He или в виде ядра ^8B и дейтрона маловероятны из-за большой энергии связи этих ядер в ядре ^{10}C . В случае одного внешнего протона центральной частью ядра служит нестабильное ядро ^9B . В другой возможной структуре с двумя внешними протонами центральная часть ядра представляет другое, тоже нестабильное ядро ^8Be . Такие структуры, по-видимому, по динамике должны быть сходны с бороминовскими структурами нейтроноизбыточных ядер. В данном случае один или два внешних протона удерживают от распада ядерные резонансы.

Распад ядра ^{10}C может происходить путем каскадных распадов с образованием в промежуточном состоянии нестабильных промежуточных ядер ^9B , ^8Be и ^6Be . В таких распадах в конечном состоянии образуются по четыре заряженных фрагмента. Обращаем внимание, что при работе с фотоэмульсиями имеется возможность получения экспериментальных данных о таких многочастичных распадах и изучение распадов

нестабильных ядер ${}^9\text{B}$, ${}^8\text{Be}$ и ${}^6\text{Be}$. Трудности анализа этих данных в разделении разных каналов связаны с тем, что различия в относительных импульсах между конечными продуктами распада в этих каналах могут быть незначительными.

Исследование фрагментации и неупругих взаимодействий ядра ${}^7\text{Be}$ с ядрами представляет интерес, как для ядра, которое, по-видимому, может являться остовом в ядре ${}^8\text{B}$. Кроме того, представляет интерес одним методом исследовать кластерную структуру этого ядра совместно с исследованием структур близких по нуклонному составу и структуре ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. В экспериментах будут определены относительные вероятности в каналах ${}^3\text{He}+{}^4\text{He}$ и ${}^6\text{Li}+p$, будут получены распределения по импульсам продуктов диссоциации и распределения по импульсам фрагментов, образованных в неупругих соударениях. Полученные данные позволят оценить вероятность кластеризации нуклонов в ядре. В исследования неупругих взаимодействий ядер ${}^7\text{Li}$ по распределениям однозарядных и двухзарядных фрагментов по массам и по импульсам. По вероятностям диссоциации ядра по разным каналам можно будет сделать заключение о вероятности образования двухкластерной структуры ${}^3\text{H}+{}^4\text{He}$ ядра ${}^7\text{Li}$.

Ядерная физика и распознавание образов

У скептиков дальнейшего использования ядерных эмульсий есть два аргумента – их стоимость и, главное, трудоемкость обработки. Однако и в этих вопросах в последние годы наблюдается прогресс основанный на использовании компьютерных и информационных технологий.

Расцвет использования эмульсий пришелся на пятидесятые годы. Были получены пионерские результаты по физике элементарных частиц. С точки зрения производства материала была решена проблема получения толстых слоев эмульсии (600 микрон), позволивших получать объемные образы событий. А его высокая однородность открыла возможности спектрометрии и идентификации частиц. Советские специалисты решили эту проблему самостоятельно. По существу, достигнутый уровень не преодолен и поныне. Это сложившаяся культура.

В настоящее время эмульсии изготавливаются японской фирмой ФУДЖИ и Московским НИИХИМФОТОПРОЕКТ. Классик в этой области фирма ИЛЬФОРД уже утратила технологию. Когда потребности исследований по физике ядра вызовут оживление интереса к эмульсиям, удовлетворить его будет непросто. Разумная поддержка этой технологии в рамках актуальных исследований позволит сохранить фотографический метод регистрации частиц к периоду автоматического анализа изображений следов частиц.

Быстро прогрессирующее применение автоматических сканирующих микроскопов и программирования распознавания образов позволяет ожидать возрождения этой классической экспериментальной методики на совершенно новом уровне компьютерных технологий. В настоящее время в ФИАН создается полностью автоматизированный измерительный комплекс для изучения процессов в физике частиц высоких энергий ПАВИКОМ (слайд 14). ПАВИКОМ создается для повышения эффективности экспериментальных исследований, проводимых при помощи эмульсионных и других трековых детекторов рядом институтов страны в ядерной физике, физике космических лучей, а также в работах по поиску осцилляций нейтрино. Оптические изображения на установках регистрируются при помощи CCD-камер, оцифровываются и вводятся в компьютер. Таким образом, обработка ядерных эмульсий производится в полностью автоматическом режиме без применения визуального труда микроскописта.

По сравнению с "полуавтоматическими микроскопами", использовавшимися до сих пор, главным преимуществом ПАВИКОМ является возможность проводить измерения следов заряженных частиц в ядерных фотоэмульсиях, следов ядер высоких энергий в рентгеновских пленках и в твердотельных детекторах при полной автоматизации процесса измерений без применения крайне трудоемкого визуального труда микроскопистов. Причем обработка экспериментального материала ускоряется приблизительно в тысячу раз. Это оказалось возможным благодаря применению современных достижений прецизионной механики и возможностям средств вычислительной техники и программного математического обеспечения. В самые последние годы подобного типа полные автоматы

запущены или запускаются в ЦЕРН, научных центрах Японии, Италии и в некоторых других странах.

В России ПАВИКОМ - единственный комплекс подобного типа. Его создание означает революционное преобразование экспериментов, использующих эмульсионную технику регистрации быстрых частиц. При этом его возможности таковы, что он не только полностью удовлетворяет потребности упомянутых исследований ФИАН, но и предоставляет возможности для работы других российских лабораторий и институтов, так что фактически он играет роль центра коллективного пользования. В тех исследованиях, которые ведутся в рамках международных коллабораций, только благодаря ПАВИКОМУ появляется возможность российским участникам быть равноправными партнерами, а не выполнять второстепенные работы. В перспективе обрабатывающий центр такого типа может стать источником «экспорта информации» для «физики на расстоянии» (вспомним это определение из 70-х).

И у групп ЛВЭ был уже опыт обращения к возможностям ПАВИКОМа. Первый раз - для анализа лавсановых пленочных детекторов облученных на установке ЭНЕРГИЯ для получения пространственной картины потока нейтронов в массивной мишени. Применени трековых детекторов на основе лавсана вызвано высоким уровнем электромагнитного фона при работе синхрофазотрона, высокой эффективностью регистрации осколков деления лавсаном его низким собственным фоном и относительной простотой технологии обработки.

Группой ПАВИКОМа (руководитель Н. Г. Полухина) была разработана и широко применяется методика автоматического распознавания и подсчета треков на пленках большой площади. ПАВИКОМ, предназначенный для обработки материалов трековых детекторов, повышает ее скорость в сотни и тысячи раз. Распознавание таких треков, выделение их на фоне дефектов пленки и их подсчет не является трудной задачей. Достигнутая эффективность работы программы подсчета следов от осколков деления не менее 95%. Это указывает на принципиальную применимость методики автоматизированного просмотра. Был получен значительный объем материала при облучении уран-свинцовой сборки. В настоящее время выполнено его компьютерное распознавание и ведется физический анализ.

Группа ФИАН выполнила и опытное сканирование редких событий когерентной диссоциации ядер ${}^6\text{Li}$ в эмульсии. При сканировании слои эмульсии разделялся на несколько зон резкого изображения. Итогом стала съемка своеобразного фильма из десятков кадров, отражающих движение оптики микроскопа в трех измерениях. Уже сейчас можно сказать, что демонстрация таких трехмерных образов редких событий становится частью научной аргументации. Возможно, их использование и в подлинно электронных журналах и в гиперссылках Интернета.

Актуальной задачей становится разработка алгоритмов проводки треков и точных координатных измерений. Здесь требуется привлечение программистов специализирующихся в области алгоритмов распознавания образов. Задачи релятивистской ядерной физики и ядерной астрофизики могут продвинуть прогресс компьютерных технологий опираясь на объективно существующие проблемы.

В Лаборатории высоких энергий предлагается дальнейший перевод имеющихся микроскопов на полуавтоматический режим измерения. Необходимы умеренные затраты по приобретению персональных компьютеров и изготовлению интерфейсов для них.

Заключение

В проводимых исследованиях взаимодействий легких радиоактивных ядер с ядрами фотоэмульсии одним методом систематически изучается структура нескольких протонноизбыточных ядер. Обращено внимание на поиск проявления структуры подобной протонному гало и структур с нестабильной центральной частью ядра. В работе будет определено полное сечение неупругих взаимодействий ядер в фотоэмульсии, что позволит оценить радиусы ядер. В фотоэмульсии измеряются полный заряд фрагментов и

регистрируются события с перезарядкой первичного ядра. В итоге будут обобщены результаты изучения исследуемых ядер. Полученные результаты будут ценными для понимания особенностей структуры таких ядер.

Полученные экспериментальные данные будут использованы для сравнения с результатами модельных расчетов. Проводимые исследования будут стимулировать развитие эмульсионной методики во многих лабораториях, участвующих в этих исследованиях. Результаты этих работ могут быть использованы при планировании дальнейших исследований на пучках нуклотрона, в частности, для формирования триггеров реакций при регистрации частиц электронными методами.

Основные ссылки

[1] P.G.Hansen, A. S.Jensen Nuclear halos Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1995 45:591-634.

[2] A.H.Wuosamaa, R.R. Betts, M.Freer, B.R.Fulton Recent advances in the study of nuclear clusters Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1995 45:89-131.

[3] M.I.Adamovich et al. Interactions of Relativistic ${}^6\text{Li}$ nuclei with Photoemulsion Nuclei Phys.At. Nucl., vol. 62, N8, 1999, pp 1378-1387.

Этапы работы

2002 г

Формирование первичного пучка ${}^{10}\text{B}$, облучение эмульсий.

Формирование вторичного пучка ${}^7\text{Be}$ на основе процесса перезарядки ядер ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be}$, облучение эмульсий. Сканирование, анализ, измерения.

2003 г.

Формирование вторичных пучков ${}^{10}\text{C}$ и ${}^{12}\text{N}$ на основе процесса перезарядки ядер ${}^{10}\text{B} \rightarrow {}^{10}\text{C}$ и ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N}$, облучение эмульсий. Сканирование, анализ, измерения.

Облучение на тяжелых ядрах.

2004 г.

Формирование вторичных пучков ${}^8\text{B}$ и ${}^9\text{C}$ на основе процесса перезарядки и фрагментации ядер ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} \rightarrow {}^8\text{B}$ и ${}^{13}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} \rightarrow {}^9\text{C}$, облучение эмульсий. Сканирование, анализ, измерения. Облучение на тяжелых ядрах.

2005-7

Облучение на легких нейтроноизбыточных изотопах бора и бериллия для обоснования задачи поиска ядерно-молекулярных эффектов. Сканирование, анализ, измерения.

Ожидаемые результаты по завершении проекта

1. Получение облученного материала и создание баз данных при облучении эмульсий пучками легких радиоактивных и тяжелых ядер.
2. Измерение основных характеристик взаимодействий, извлечение вероятностей когерентной фрагментации, измерение угловых и импульсных спектров.
3. Выводы по кластерной структуре легких ядер, проблеме нуклонного гало, наличию коллективных эффектов при соударениях с высокой множественностью.

Сметная стоимость, запрашиваемая от ОИЯИ на 2003 год:	24 тыс. USD
Сметная стоимость, запрашиваемая от ОИЯИ на 2004 год:	24 тыс. USD
Сметная стоимость, запрашиваемая от ОИЯИ на 2005 год:	24 тыс. USD
Сметная стоимость, запрашиваемая от ОИЯИ на 2006 год:	24 тыс. USD
Сметная стоимость, запрашиваемая от ОИЯИ на 2007 год:	24 тыс. USD

Трудоёмкость выполняемых работ

Настройка пучка в зависимости от поставленной задачи (от суток до двух), облучение кассеты с ядерной фотоэмульсией примерно 15 мин (в последнем облучении 4-5 дек. 2001 г. из-за низкой интенсивности = 6 час.).

Проявка пластин размером $10 \times 20 \text{ см}^2 \times 550 \text{ мк}$ в зависимости от их количества до 1,5 месяца.

30 пластин такого размера составляют примерно 0.3 литра эмульсии, один литр эмульсии на сегодня равен 208 000 руб. (7000\$).

Для нормальной работы одной группы необходимо 20 пластин. 21 пластина из последнего облучения разделились на 3 группы.

Число групп, желающих работать с эмульсионными пластинами более 10. Для обеспечения нормальной работы 10 групп необходимо 3 литра эмульсии на одно облучение.

Набор статистики одной лаборанткой составляет в зависимости от интенсивности облучения на одной пластине 2 месяца. (2 месяца \times 20 пластин / 6-8 чел. = 5-7 месяцев).

При этом определяется длина просмотра, ведется подсчет событий.

Обработка статистического материала зависит от «размера звезд», обработка событий в эксперименте Ag+Em и Pb+Em проводилась намного дольше, чем обработка событий в пластинах, облученных в ноябре 1999 г. тритием и гелием-6

На поиск 11 событий перезарядки трития в гелий-6 в нашей группе ушло 1,5 месяца, за это же время еще двумя группами из ФИАНа было найдено 23 подобных события. В ноябре 2001 г. была сдана в печать статья по этому материалу. События обрабатывались по программе определения множественности, углового распределения, идентификации частиц,

Первые материалы по облучению эмульсий В-10 уже получены, планируем в конце года подать в печать статью.

Предложения по развитию полуавтоматических измерений

В фотоэмульсионной группе имеется микроскопный парк для измерений взаимодействий следов в ядерной фотоэмульсии, состоящий из четырёх микроскопов KSM (фирмы ЦЕЙС, стоящих на специальных фундаментах), одного микроскопа МПЭИ-1 (производство ЛОМО), шести микроскопов МБИ-9 (производство ЛОМО). На одном из микроскопов KSM задействована полуавтоматическая система измерений.

При изучении ядро-ядерных или адрон-ядерных взаимодействий в эмульсии измерения осуществляются визуально большим числом операторов-лаборантов при ручном передвижении столика с эмульсией под микроскопом. При этом координаты трека определяются наведением шкалы окуляра на зерна следа перемещением вручную столика микроскопа (с визуальным отсчетом координат по шкалам микровинтов). Чрезвычайно утомительный и трудоёмкий процесс измерений, требующий максимум внимания от измерителя, очень медленен, особенно в тех случаях, когда в поле зрения микроскопа оказывается несколько сотен следов заряженных частиц. Обработка одного события с множественностью несколько сотен треков может занять две-три недели только измерений, а затем оператором проводится набивка этих измеренных координат в отдельный файл компьютера для дальнейшей их обработки и проверки, согласно заданной программы.

Более эффективны и менее трудоёмки измерения на полуавтоматической системе измерений следов в ядерной фотоэмульсии. Полуавтоматическая система измерений в фотоэмульсионной группе состоит из микроскопа KSM, на котором находятся специальные датчики и компьютера «Правец». Датчики на микроскопе соединены кабелем микросхемой в компьютере, где находится специальная микросхема. Измеритель проводит измерения, а с помощью полуавтоматической системы по командам с компьютера производится автоматическая запись координат следов в память машины, на экране дисплея высвечиваются координаты измеряемых следов, полученных в результате измерений. Нажатием кнопки или педели осуществляется регистрация координат и ввод их в компьютер в отдельный файл. Затем проводится обработка данных по заданной программе. Полуавтоматическая система намного эффективнее измерений вручную, но, к сожалению, в фотоэмульсионной группе только одна такая система. Поэтому необходимо создать ещё несколько таких полуавтоматических систем, для чего понадобятся компьютеры, датчики и микросхемы.

Однако уже существуют системы полной автоматизации, где полностью исключены действия вручную и требуется лишь одно нажатие кнопки для обработки пластины эмульсии, сразу приводящее к записи в компьютер данных. Накопление данных о треках в компьютере происходит в тысячи раз быстрее. Имеющийся опыт использования новых автоматизированных систем при изучении множественной генерации показывает, что обработка одного слоя эмульсии, содержащего десятки событий изучаемого типа, требует несколько десятков минут, а не несколько недель на одно событие. Ясно, что переход на новую технику полностью автоматизированных измерений в ядерных фотоэмульсиях необходим, для эффективной работы фотоэмульсионной группы, что сделает наши исследования более осмысленными и конкурентоспособными в области физики высоких энергий и астрофизики.

Обработка ядерной фотоэмульсии

Проявочная установка включает в себя следующие узлы:

1. Проявочное оборудование:

- а) проявочный блок (состоит из специальных бачков для пропитки в воде, в проявителе, стоп ванне и промывании слоев);
- б) устройства этажерок (набора полок, на которые помещаются фотоэмульсионные слои предварительно наклеенные на стеклянной основе);
- в) шкаф - термостат, для проведения "горячей" стадии пропитанных в холодном проявителе эмульсионных слоев.

2) Фиксажный блок с системой фиксажно-промывочной циркуляции:

- а) фиксажный блок (состоит из бачков, в которые закладываются этажерки с проявленными фотоэмульсионными слоями);
- б) система фиксажно-промывочной циркуляции подает раствор фиксажа в фиксажный блок из запасных баков. После отфиксирования фотоэмульсии система позволяет переключение на подачу промывочной воды;
- в) блок теплообменника (для охлаждения фиксажа и в летних месяцах также промывочной воды);
- г) контрольно-регулирующая аппаратура (ротаметры, термометры, вентили);
- д) система приготовления фиксажных растворов (приготовление в объемах недельной потребности, фильтрация и транспорт фиксажа в запасные баки).

3) Холодильная установка

(обеспечивает охлаждение растворов, проявителя, стоп ванны, фиксажа и промывочных вод):

- а) фреоновые компрессоры;
- б) испаритель рассольного типа;
- в) батарея теплообменников;
- г) циркуляционная рассольная система с насосом.

4) Дистилляторная

(обеспечение дистиллированной водой для приготовления проявочных растворов):

- а) электродистиллятор;
- б) баки сборники;
- в) насос.

5) Регенерация серебра:

- а) бак - сборник;
- б) система осаждения серебра;
- в) насос.

б) Вспомогательные системы для выполнения разных задач:

- а) система для растворения эмульсионного геля, для полива и загрузки жидкой фотоэмульсии разными компонентами для изменения ее состава;
- б) система для сушки политой фотоэмульсии;
- в) система для сушки проявленной фотоэмульсии;
- г) система для нанесения координатной сетки.

Аппаратура, используемая в проявочном центре, рассчитана на круглосуточную посменную обработку эмульсионных слоев формата 10x10, 10x15 и 10x20 см с предварительной наклейкой. Допускается возможность проведения различных экспериментов на имеющейся аппаратуре (проявление эмульсии в бесподложечном виде, с "мокрой", теплой стадией и др.). На установке может обрабатываться до 100 слоев в день формата 10x20 (или эквивалентного количества

слоев другого формата). Месячная производительность установки составляет до 10-литров сухой эмульсии.

Из выше перечисленного оборудования желательно модернизировать следующее:

- а) замена устаревших узлов проявочной установки (система охлаждения обрабатываемых растворов,
- б) насосы для перекачки растворов,
- в) электронные цифровые весы до 10 кг и до 1 кг
- г) из-за резко возросшей стоимости сухой эмульсии, на основе ранее действующей у коллектива технологии по поливу эмульсионного геля, проверить возможность возврата к этой технологии. Для чего необходимо заменить пришедшее в негодность (и неиспользуемое ныне) оборудование на новое, что дополнительно позволит внедрить элементы загрузки ядерной фотоэмульсии различными компонентами в зависимости от задачи, поставленной экспериментаторами.
- д) в расходах не забывать покупку эмульсии с учетом роста ее стоимости

