

P1-2010-75

П. И. Зарубин (Сотрудничество BESCQUEREL)

**ПЕРИФЕРИЧЕСКАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР**

Доклад на Третьих Черенковских чтениях «Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц», Москва, ФИАН, 6 апреля 2010 г.

Зарубин П. И. (Сотрудничество BECQUEREL)  
Периферическая фрагментация релятивистских ядер

P1-2010-75

Кратко изложены современные концепции нуклонной кластеризации. Представлены применения экспериментальных методов релятивистской ядерной физики для развития физики нуклонных кластеров. Дан краткий обзор исследований, выполненных методом ядерной эмульсии. Обсуждается значение наблюдений процессов когерентной диссоциации релятивистских ядер для исследования ядерной кластеризации. Согласно наблюдениям в ядерной эмульсии, степень когерентной диссоциации может достигать полного развала как для легких ядер O, Ne, Mg и Si, так и тяжелых ядер Au, Pb и U. Это явление может служить источником кластерных систем беспрецедентной сложности. Картина когерентной диссоциации изучена для разнообразных ядер, соседствующих в начале таблицы изотопов, в том числе радиоактивных.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Zarubin P. I. (on behalf of the BECQUEREL Collaboration)  
Peripheral Fragmentation of Relativistic Nuclei

P1-2010-75

The modern concepts of nucleon clustering are described in brief. The application of experimental methods of relativistic nuclear physics for the development of nucleon cluster physics is presented. A short review of research performed by the nuclear emulsion technique is given. The significance of observations of coherent dissociation of relativistic nuclei for the study of nuclear clustering is discussed. According to observations in nuclear emulsion, the degree of coherent dissociation may reach complete dissociation both for light nuclei O, Ne, Mg and Si, and for heavy nuclei Au, Pb and U. This phenomenon may be a source of cluster systems of unprecedented complexity. Pattern of coherent dissociation for a large variety of nuclei, adjacent to the beginning of the table of isotopes, including radioactive ones, is studied.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

*Памяти  
Галины Ивановны Орловой*

## **ВВЕДЕНИЕ**

В начале 1970-х гг. на синхрофазотроне ОИЯИ в Дубне и ускорителе бевалак в Беркли были получены пучки ядер с энергией несколько ГэВ на нуклон. Тем самым возникли предпосылки применения теоретических концепций и экспериментальных методов физики высоких энергий для развития релятивистской теории атомных ядер [1]. Были проведены циклы исследований методом ядерной эмульсии на магнитных спектрометрах и на пузырьковых камерах. Их определяющей тенденцией стало стремление к поиску общих закономерностей в описании спектров фрагментов ядер [2–5]. На этом пути были определены условия выхода на режим предельной фрагментации и масштабно-инвариантное поведение спектров вторичных частиц. В ситуации некоррелированного образования групп релятивистских фрагментов описание их спектров могло бы свестись к построению суперпозиции универсальных функций. Однако, удовлетворяя обобщающим принципам, физика релятивистской фрагментации оказалась богаче и сложнее.

С развитием исследований по релятивистской ядерной физике на ускорительном комплексе синхрофазотрон–нуклотрон была создана целая система магнитооптических каналов транспортировки пучков. Эти каналы могут быть использованы для формирования вторичных пучков релятивистских радиоактивных ядер, что позволяет расширить область экспериментов по ядерной физике [6]. Благодаря открытию и исследованию экзотических ядер, сделанному в 1980-е гг. на пучках бевалака, ядерная физика остается на переднем фронте исследований микромира. Были установлены принципиально новые явления в структуре ряда легких радиоактивных ядер и протекании ядерных реакций [7, 8]. В этой области наблюдаются аномально большие радиусы ядер, объясняемые на основе молекулярно-подобных ядерных структур, состоящих из разделенных в пространстве нуклонных ядерных кластеров. Это открытие способствовало созданию пучков радиоактивных ядер на многих ускорителях с энергиями от десятков МэВ до 1 ГэВ на нуклон.

Пучки стабильных и радиоактивных ядер качественным образом расширяют возможности для изучения ядерной структуры [9, 10], в том числе кла-

степеней свободы [11–13]. Получаемые сведения имеют ключевое значение в проблемах не только ядерной физики, но и ядерной астрофизики [14, 15], физики космических лучей [16] и ядерной геологии. При продвижении к релятивистскому масштабу энергии ядер, ведущему к кинематической коллимации релятивистских фрагментов, возникают принципиальные преимущества экспериментального плана. Подходы, основанные на релятивистской инвариантности при теоретическом описании систем движущихся фрагментов, позволяют обеспечить единство интерпретации с выводами о фрагментации покоящихся ядер. Составляя самостоятельный раздел физики ядра, исследование явлений ядерной кластеризации в физике высоких энергий имеет принципиальное значение для развития таких разделов физики промежуточных энергий, как изобарные степени свободы в ядрах и реакции перезарядки [17], гиперядра [18], явления предельной фрагментации ядер. Например, привлечение сведений о конечных кластерных состояниях было бы весьма ценным при проведении комплексных экспериментов по кумулятивному рождению частиц, направленных на исследование кварк-партоновых степеней свободы в легких ядрах [6].

В последние годы особый интерес проявляется к периферическим ядроядерным взаимодействиям как источнику сведений о кластерных особенностях легких атомных ядер, в том числе радиоактивных. В принципе, периферические реакции объединяют ключевые наблюдаемые характеристики кластерных состояний. Периферическая фрагментация представляется мощным средством кластерной спектроскопии благодаря проявляющейся в ней тенденции конфигурационного перекрытия структуры основного состояния фрагментирующего ядра и конечных состояний. В наиболее периферических взаимодействиях, протекающих без перекрытия плотностей сталкивающихся ядер, кластерные системы сохраняются наиболее полно. Именно в них отличия и сходства различных типов кластеризации легчайших ядер проявляются наиболее ярко. Классификация взаимодействий и их теоретическое описание такого типа взаимодействий упрощается с ростом энергии соударения.

В 2002 г. вновь образованным сотрудничеством BECQUEREL [19–23] была выдвинута программа облучений ядерной эмульсии, целью которой стало получение картины периферической фрагментации для целого семейства легких ядер, соседствующих в начале таблицы изотопов (рис. 1). Облучения слоев эмульсии проведены в пучках изотопов бериллия, бора, углерода и азота, в том числе радиоактивных, которые впервые формировались на ну-клотроне ОИЯИ. Выбор метода ядерной эмульсии обусловлен его рекордной разрешающей способностью, до сих пор сохраняющей уникальность при наблюдении следов в конусе релятивистской фрагментации [24, 25]. Этот метод позволяет не только единообразно и детально изучить структуру релятивистской фрагментации, но и рассчитывать на обнаружение новых явлений в физике кластеров. Пространственное разрешение ядерной эмульсии

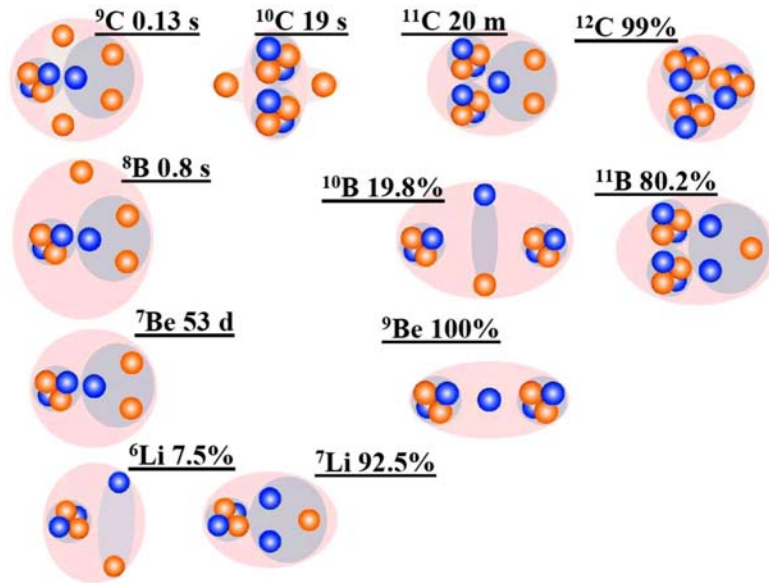


Рис. 1. Диаграмма кластерных степеней свободы: в стабильных и нейтронодефицитных ядрах указаны распространенности изотопов или времена жизни; светлые кружки соответствуют протонам, темные — нейтронам; темным фоном выделены кластеры

БР-2 имеет рекордную величину 0,5 мкм, а ее чувствительность простирается от наиболее высокозарядных релятивистских ионов вплоть до релятивистских однозарядных частиц. Эти возможности можно интуитивно оценить по фотографии, на которой совмещены снимок взаимодействия релятивистского ядра серы в эмульсии и микрофотография человеческого волоса (рис. 2). 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.

Для иллюстрации достоинств эмульсионного метода при наблюдении релятивистских фрагментов на рис. 3 представлена микрофотография события фрагментации ядра  $^{28}\text{Si}$ . На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в узком угловом конусе вместе с четырьмя сопровождающими однозарядными частицами в широком конусе и тремя осколками ядра мишени. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить три фрагмента Н и пять фрагментов He. Наиболее плотный след на нижней фотографии (третий сверху) идентифицирован как очень узкая по углу пара фрагментов с зарядами  $Z_{\text{fr}} = 2$ , соответствующая

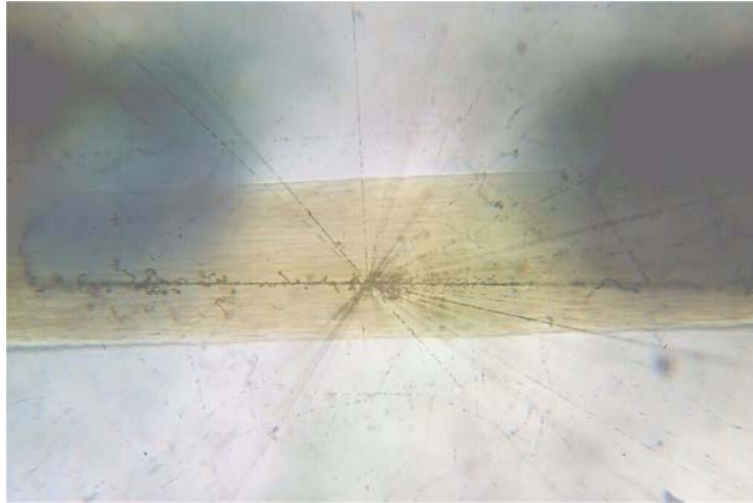


Рис. 2. Совмещенные фотографии взаимодействия релятивистского ядра  $^{32}\text{S}$  и волоса, полученные с помощью микроскопа МБИ-9 при 60-кратном увеличении и цифровой фотокамеры

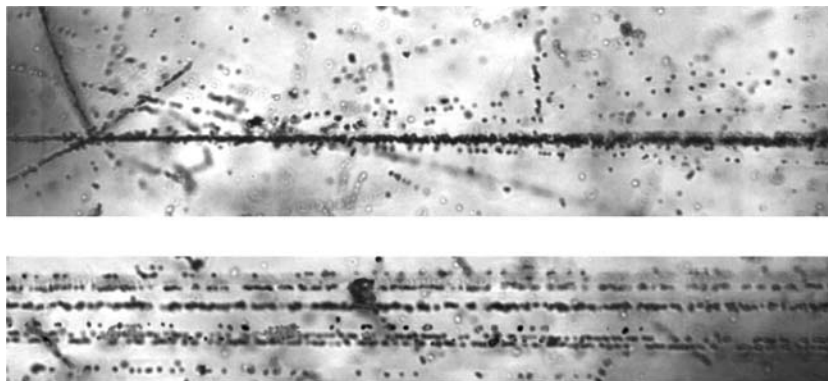


Рис. 3. Событие фрагментации ядра  $^{28}\text{Si}$  с энергией 3,65 А ГэВ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии

распаду ядра  $^8\text{Be}$ . Трехмерный образ события реконструирован как плоская проекция с помощью автоматического микроскопа ФИАН комплекса ПАВИКОМ. Основной интерес представляет группа фрагментов Н и Не налетающего ядра в узком конусе с суммарным зарядом  $\sum Z_{\text{fr}} = 13$ . Так как пучок направляется параллельно плоскости эмульсионного слоя, следы релятивист-

ских фрагментов долго остаются в одном слое, что достаточно для наблюдения их 3-мерного образа, угловых измерений и измерений многократного рассеяния. В более широком конусе также видны следы рожденных мезонов с минимальной ионизацией. Кроме того, в вершине взаимодействия присутствуют следы сильноионизирующих осколков ядра мишени с энергией от нескольких МэВ до нескольких десятков МэВ. Таким образом, в периферическом соударении отчетливо проявляется разделение областей фрагментации ядра-снаряда и мишени.

Совпадая с именем знаменитого ученого, аббревиатура BECQUEREL указывает на центральные задачи этого эксперимента — Beryllium (Boron) Clustering Quest in Relativistic Multifragmentation. Напомним, что открытие А. Беккерелем явления радиоактивности сделало его одновременно и автором фотографического метода ее детектирования. С тех пор поиски новых явлений в физике микромира мотивируют все новые и новые волны интереса к применению ядерной фотографии. В русле этой исследовательской традиции развивалось и настоящее исследование.

Еще в пионерских исследованиях по физике космических лучей, выполненных в 1940-е гг. путем подъема стоек ядерной эмульсии в стратосферу, наблюдались события фрагментации релятивистских ядер, достигающие полной диссоциации на ядра водорода и гелия [26]. Такие события описаны в классической книге С. Пауэлла, П. Фаулера и Д. Перкинса среди других основополагающих наблюдений, открытых методом ядерных эмульсий [24]. Их микрофотографии, увидевшие свет более полувека назад, и в наши дни могут служить образцом наглядности при обнаружении новых явлений. Последующее использование эмульсии на ускорителях высоких энергий дало знания типа и энергии ядер, что позволило использовать ядерную эмульсию уже для достаточно точной спектроскопии целых ансамблей релятивистских фрагментов. Со временем наблюдение образов событий стало считаться чем-то само собой разумеющимся и не требующим демонстрации. Представление наблюдений все больше заменялось языком классификации событий, не очевидным специалистам по другим методикам. С ослаблением интереса к ядерной эмульсии, вызванным трудоемкостью измерений, стала забываться и ценность этой классификации.

Чтобы сделать результаты доступными для восприятия вне эмульсионного сообщества, в нашем исследовании получила продолжение начальная идея — демонстрация уникальных по полноте наблюдаемости ядерных взаимодействий. Создана коллекция видеоматериалов о периферических взаимодействиях релятивистских ядер от легчайших ядер до ядер свинца (сайт сотрудничества [23]) с использованием современных технических средств [27, 28]. Образы событий в этой коллекции служат для ясного понимания и аргументации обсуждаемых процессов, а также мотивацией для будущего развития метода на основе автоматических сканирующих микроскопов [27–29].

Использование ядерной эмульсии в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ (ныне Лаборатория физики высоких энергий имени В.И.Векслера и А.М.Балдина) началось с облучений протонами на синхрофазотроне ОИЯИ в 1950-х гг., выполненных под руководством проф. К.Д.Толстова [30]. Анализ неупругих взаимодействий протонов с ядрами эмульсии указал на существование и значительную роль периферических взаимодействий. В таких взаимодействиях происходит малая передача энергии и налетающие протоны мало изменяют направление своего движения. Зачастую протоны испытывали диссоциацию с рождением групп мезонов на тяжелых ядрах, которые участвовали как целое и видимым образом не разрушались. Позже такие процессы, названные когерентной диссоциацией, изучались в эмульсии, облученной протонами на ускорителе У-70 Института физики высоких энергий [31, 32].

Становление в начале 1970-х гг. нового научного направления — релятивистской ядерной физики — сразу было поддержано сложившимися исследовательскими сообществами, имеющими большой опыт и технологическую базу для применения ядерных эмульсий (основные этапы в работах [33–70]). Сам метод, ставший к тому времени классическим, получил новую мотивацию для дальнейшего применения. Ядерная эмульсия систематически облучалась релятивистскими ядрами, впервые ускорявшимися на синхрофазотроне ОИЯИ, бевалаке, а затем на ускорителях AGS (Брукхейвенская национальная лаборатория, США), FNAL (США) и SPS (ЦЕРН). Проявленные стопки слоев передавались для анализа в научные центры и университеты всего мира, что послужило развитию традиций, заложенных еще в первых эмульсионных сотрудничествах по физике частиц.

Исследования периода с 1970-х по 1990-е гг. были посвящены получению обзорных сведений о соударениях релятивистских ядер с ядрами из состава эмульсии. Как правило, поиск событий и последующий анализ велся без выборки, что составляло очевидное достоинство, поскольку обеспечивал систематичность наблюдений, однако неизбежно ограничивал статистику редких событий. Эмульсионный метод внес свой вклад в установление предельной фрагментации и масштабной инвариантности, фундаментальных свойств, характеризующих столкновения релятивистских составных систем. Особое внимание уделялось центральным взаимодействиям с возможно большей множественностью вторичных частиц (рис. 4) как кандидатам в экзотические события. Весьма трудоемкий анализ таких событий мотивировался поиском экзотической ядерной материи в условиях наибольшей концентрации плотности материи и энергии — это и внутриядерный каскад, и ударные волны в ядерной материи, и, в наибольшей степени, кварк-глюонная плазма.

Среди наблюдавшихся взаимодействий несколько процентов составляли события периферической фрагментации ядер в узкие струи, состоящие из легких ядер, нуклонных кластеров и нуклонов с суммарным зарядом, близким к заряду начального ядра [38, 39, 44, 48, 49, 56–70]. Зачастую периферические



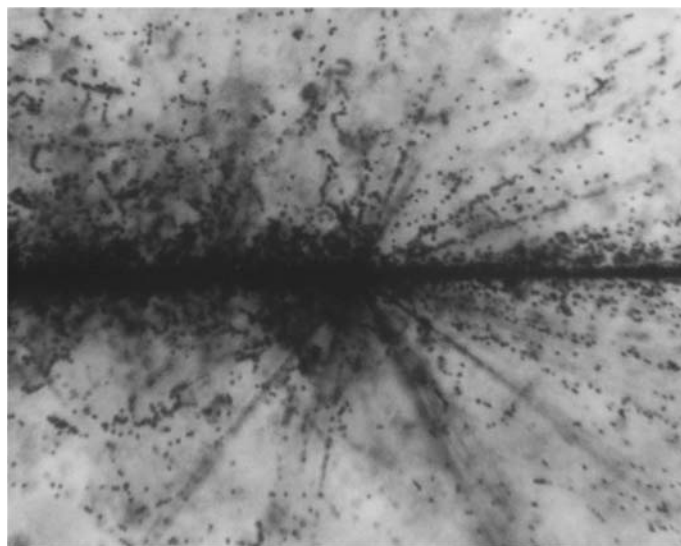


Рис. 4. Центральное соударение ядра Au с энергией 10,7 А ГэВ с ядром из состава ядерной эмульсии

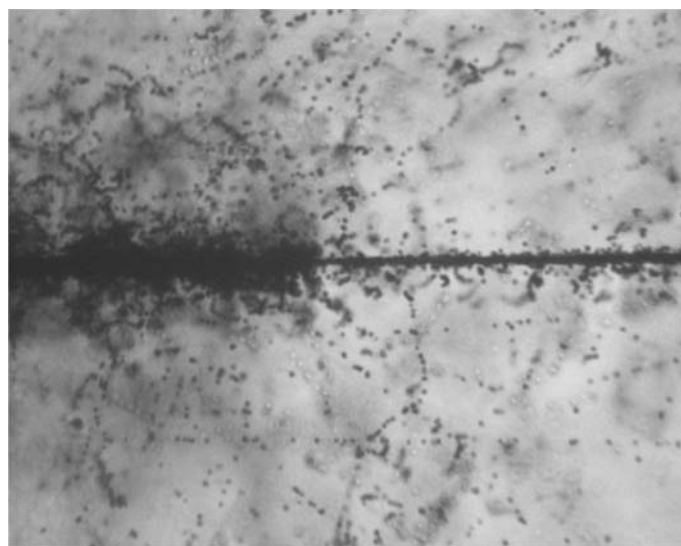


Рис. 5. Периферическое соударение ядра Au с энергией 10,7 А ГэВ с ядром из состава ядерной эмульсии

события не сопровождались образованием фрагментов мишени или заряженных мезонов. Они проявляли аналогию с когерентной диссоциацией высокоэнергичных адронов, протекая при многократно более низких энергетических порогах по суммарной массе образующихся кластерных фрагментов. Один из наиболее ярких примеров приведен на рис. 5, где отчетливо виден срыв ионизации как результат множественной фрагментации. В отношении событий этого класса ядерная эмульсия была и остается единственным средством наблюдения.

Конечно, ядерная эмульсия не обеспечивает полного импульсного анализа. Однако благодаря развитию релятивистской физики малонуклонных систем на основе магнитных спектрометров (циклы исследований [71–75]) и пузырьковых камер (циклы исследований [76–86]) становится возможным привлечение возникающих в ней представлений как опоры для кластерной физики. При построении физической картины фрагментации кластерных ядер оказывается продуктивным комбинирование получаемых выводов.

Можно было бы предположить, что генерация групп фрагментов протекает не только в состоянии непрерывного спектра. В наиболее «деликатных» соударениях при периферической диссоциации возможно заселение и квантовых состояний, расположенных сразу над порогами распада на кластеры. В то же время нуклонные кластеры, образовавшиеся в периферической диссоциации релятивистского ядра, могут испытывать ядерное дифракционное рассеяние [73, 74]. Возможно, при образовании в периферической диссоциации существует взаимосвязь двух квантово-механических эффектов — образование кластеров через возбужденное состояние вблизи массового порога и их дифракционное рассеяние на ядре мишени. Таким образом, релятивистские соударения, протекающие при больших прицельных параметрах, потенциально могут сохранять уникальную по полноте информацию о квантово-механических аспектах образования и распада множественных систем легчайших ядер. Это предположение не кажется тривиальным и требует экспериментальных проверок на конкретных и отчетливо интерпретируемых примерах легких кластерных ядер. Положительные выводы дадут основания для развития на новой основе представлений о физике систем, состоящих из нескольких нуклонных кластеров, а также для поиска необычных конфигураций из нуклонных кластеров.

В последнее десятилетие получила развитие концепция барионной материи, находящейся в холодной разреженной фазе с кластеризацией нуклонов в легчайшие ядра  ${}^4\text{He}$  ( $\alpha$  —  $\alpha$ -частица),  ${}^3\text{He}$  ( $h$  — гелион),  ${}^2\text{H}$  ( $d$  — дейтрон) и  ${}^3\text{H}$  ( $t$  — тритон). Глубокие теоретические разработки, выполненные в этом направлении, дают мотивацию новым экспериментам по кластерной спектроскопии, ориентируя на изучение кластерных ансамблей  $\alpha$ ,  $h$ ,  $d$  и  $t$  как целостных квантовых систем [87–110]. Поскольку макроскопические кластерные состояния могут играть роль промежуточной фазы в астрофиз-

зических процессах, эти исследования приобретают значение, выходящее за рамки проблем ядерной структуры.

К периферическим взаимодействиям ядер, несмотря на их несомненную эстетику, был проявлен ограниченный интерес. Изучение их природы оказалось в тени «романтической» физики центральных соударений. Не менее важно и то, что хотя возможности релятивистского подхода к изучению ядерной структуры были осознаны, его применение оказалось затруднительным. Электронные эксперименты не смогли приблизиться к детальности наблюдения продуктов релятивистской фрагментации, обеспечиваемой в ядерной эмульсии. Продолжительная пауза в развитии электронных экспериментов в части полной регистрации следов в узком угловом конусе релятивистской фрагментации придала актуальность дальнейшему применению ядерной эмульсии [111–116].

При наборе статистики особый интерес представляют события без рожденных мезонов ( $n_s = 0$ ), которые вылетают между областями фрагментации налетающего ядра и ядра мишени. Наиболее ясно интерпретируются события когерентной диссоциации, в которых отсутствуют и фрагменты ядер мишени ( $n_b = 0, n_g = 0, n_s = 0$ ). События такого типа из-за отсутствия следов сильноионизирующих частиц  $n_h$  ( $n_h = n_b + n_g$ ) были названы «белыми звездами» [48, 49, 116]. Они возникают при минимальной передаче энергии фрагментирующему ядру. Их доля от общего числа неупругих событий составляет несколько процентов. Название «белые звезды» удачно отражает не только внешний вид события, но и «срыв» ионизации при переходе от следа первичного ядра к узкому конусу вторичных следов (в пределе до  $Z_{pr}$  раз). Эта особенность составляет основную трудность их изучения электронными методами, ведь чем ярче эффект периферической фрагментации, тем труднее ее зарегистрировать. Напротив, в эмульсионном эксперименте ее рост ведет к большей надежности наблюдения. Исследование структуры «белых звезд», образованных в диссоциации легкими кластерными ядрами, как имеющих прямое отношение к данной проблеме, составляет центральный интерес для исследования.

Соотношение каналов с различным составом заряженных фрагментов (зарядовая топология) является центральной характеристикой периферических взаимодействий релятивистских ядер. При энергии налетающего ядра 1 А ГэВ достигается режим предельной фрагментации ядер, что соответствует неизменности изотопического состава фрагментов при дальнейшем увеличении энергии соударения и изменении состава ядер мишени. Зарядовая топология когерентной диссоциации была исследована для ядер  $^{12}\text{C}$  [38],  $^{16}\text{O}$  [48, 49],  $^{22}\text{Ne}$  [42, 58, 59],  $^{24}\text{Mg}$  [62],  $^{28}\text{Si}$  [56, 57, 60, 61, 64, 63] при энергиях в несколько ГэВ на нуклон. Эти результаты суммированы в работе [116].

В начале 1970-х гг. на синхрофазотроне ОИЯИ был получен пучок ядер  $^{12}\text{C}$  с энергией 3,65 А ГэВ и выполнены облучения эмульсионных стопок



Рис. 6. Фрагментация релятивистского ядра  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\text{He}$  с импульсом 4,5 А ГэВ/с в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии; верхнее фото: вершина взаимодействия и струя фрагментов в очень узком угловом конусе; среднее фото: смещение от вершины взаимодействия по направлению движения фрагментов; нижнее фото: дальнейшее смещение вдоль струи фрагментов — при таком удалении от вершины взаимодействия становятся отчетливо различимыми три фрагмента He

[38, 117–120]. При прослеживании по первичным следам на полной длине около 338 м были обнаружены 2468 неупругих взаимодействий. Отношение этих величин ведет к среднему значению пробега  $\lambda(^{12}\text{C}) = (13,7 \pm 0,3)$  см, соответствующему геометрической модели перекрытия плотностей сталкивающихся ядер. Эта статистика включала 28 событий когерентной диссоциации («белые звезды») со средним пробегом около 10 м. Столь значительная величина пробега отражает малую вероятность соударения с прицельными параметрами в области дифракционной диссоциации. Единственным вариантом их топологии оказалась тройка двухзарядных следов  $3\alpha$  в конусе  $\theta < 3^\circ$  (рис. 6). Канал развала  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  имеет наиболее низкий порог (7,37 МэВ) при диссоциации ядер мишени  $^{12}\text{C}$  и является классическим процессом проявления кластерной структуры [121]. В данном случае он надежно наблюдался в обратной кинематике релятивистской фрагментации. Другие каналы диссоциации  $\sum Z_{\text{fr}} = 6$  сопровождалась фрагментами мишени или мезонами. Об  $\alpha$ -частичной кластеризации ядра  $^{12}\text{C}$  свидетельствует и малый выход релятивистских фрагментов с  $Z_{\text{fr}} > 2$  (не более 150 событий) при доминировании He и H. Доминирование  $\alpha$ -кластеризации ведет к предположению о значительной роли фрагментации через несвязанное ядро  $^8\text{Be}$  с его распадом на  $2\alpha$ . Предложение о прояснении механизма диссоциации привело к целенапра-

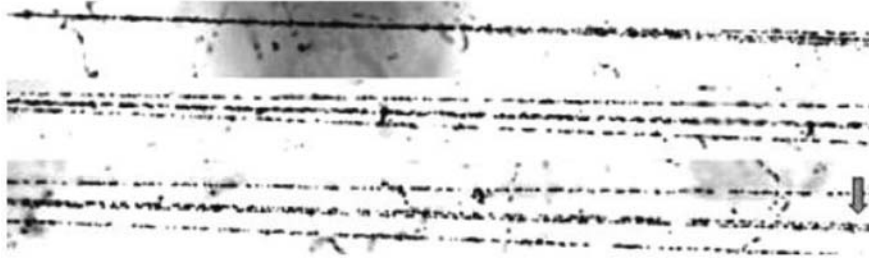


Рис. 7. Фрагментация релятивистского ядра  $^{16}\text{O} \rightarrow 4\text{He}$  с импульсом 4,5 А ГэВ/с в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в очень узком угловом конусе; среднее фото: смещение от вершины взаимодействия по направлению движения фрагментов, становятся различимыми два фрагмента He и очень узкая пара треков; нижнее фото: дальнейшее смещение вдоль струи фрагментов с целью разделения узкой пары фрагментов He, являющихся продуктами промежуточного нестабильного ядра  $^8\text{Be}$

вленному исследованию процесса  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ , выполненному по инициативе проф. Г. М. Чернова [117–120].

«Белые звезды»  $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$  (рис. 7) изучались на статистике 641 события, найденного при ускоренном поиске [122]. Тем самым продемонстрирована принципиальная для эмульсионного метода возможность ориентированного исследования на большой статистике или редких процессов с сечениями  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  от неупругого сечения. Решающими факторами для такой статистики в сложном канале оказалась ориентация на ускоренный поиск по площади событий именно этого канала, толщина мишени (в эмульсии она достигает  $80 \text{ г/см}^2$ ) и полная геометрическая эффективность его наблюдения.

Результаты электронных экспериментов в этой области практически отсутствуют. В качестве примера этих утверждений можно привести результаты с магнитного спектрометра HISS, в котором была предпринята попытка исследовать канал фрагментации  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  при 2,1 А ГэВ, являющийся критическим тестом спектроскопических возможностей [123, 124]. Используя методику дрейфовых камер, авторы не смогли наблюдать узких пар  $\alpha$ -частиц с относительными импульсами менее 75 МэВ/с от распадов из основного состояния  $^8\text{Be}$ , и, как следствие, большую часть  $3\alpha$ -частичного спектра в наиболее важной области возбуждений от порога до 30 МэВ пришлось реконструировать моделированием.

В настоящее время в GSI (Дармштадт) развивается эксперимент SPALLADIN, нацеленный на полный анализ во времяпроекционной камере реля-

тивистской фрагментации ядер Fe на водородной мишени с перспективой измерений на ядрах вплоть до Au на будущем ускорителе GSI после 2013 г. Вопрос об изучении кулоновской диссоциации на тяжелых ядрах мишени не ставится. Обсуждаются и постановки с более легкими ядрами: сотрудничество обещает реконструировать релятивистскую фрагментацию вплоть до  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  («down to»), что весьма успешно сделано эмульсионным методом еще в 1970-х гг. Одновременная регистрация однозарядных релятивистских фрагментов даже не обсуждается.

Таким образом, кажущаяся простота детального исследования конуса релятивистской фрагментации по сравнению с центральными соударениями релятивистских ядер оказывается обманчивой. Отмечая физические выводы эмульсионных экспериментов, можно сказать, что с первого цикла измерений примененный подход зарекомендовал себя мощным средством исследования  $\alpha$ -кластеризации, гарантирующим не только уникальные наблюдения, но и статистическую обеспеченность. Более того, он позволил сделать уникальные наблюдения фрагментации более тяжелых ядер.

Прогресс в развитии синхрофазотрона как источника релятивистских ядер, достигнутый в 1980-е гг., позволил выполнить облучения эмульсионных стопок в пучках ядер  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$  и  $^{32}\text{S}$ . Полученные сведения о структуре периферической фрагментации этих ядер, в особенности о статистике «белых звезд», сохраняют свою уникальность и имеют перспективу применения для будущих экспериментов, более того — служат их вдохновляющей мотивацией.

Проиллюстрируем это утверждение на основе массива измерений неупругих взаимодействиях ядер  $^{22}\text{Ne}$  с энергией 3,22 А ГэВ, имеющего наибольшую статистику. В таблице прослеживается распределение по зарядовой топологии событий с сохранением суммарного заряда ядра  $\sum Z_{\text{fr}} = 10$  в конусе фрагментации и без образования мезонов ( $n_s = 0$ ) от множественности следов мишени  $n_b$  и  $n_g$ . Присутствуют каналы от отделения одиночных фрагментов  $Z_{\text{fr}} = 1$  и 2 от «холодного остатка» первичного ядра  $^{22}\text{Ne}$  до его полного разрушения на легчайшие ядра (рис. 8). Очевидная особенность — доминирование в статистике именно «белых звезд», что позволяет выделить их как особый класс взаимодействий в ядерной эмульсии, который имеет хорошие перспективы для детального исследования.

В образовании  $N\alpha$ -частичных ансамблей могло проявиться ядерное состояние, аналогичное разреженному бозе-газу. Среди событий  $^{22}\text{Ne} \rightarrow 5\alpha$  обнаружены 3 «белых звезды». Из них в двух «золотых» событиях  $\alpha$ -частичные треки содержатся внутри конуса  $1^\circ$ . Для этих двух событий значения  $Q'$  оцениваются как весьма малые — 400 и 600 кэВ на нуклон. Детектирование таких «холодных»  $5\alpha$ -состояний является серьезным аргументом в пользу поисков фазового перехода кластерных состояний в разреженный бозе-газ методом релятивистской фрагментации, мотивирующим исследова-

Распределение взаимодействий ядер  $^{22}\text{Ne}$  с энергией 3,22 А ГэВ по множественности следов фрагментов мишени  $n_b$  и  $n_g$  для каналов диссоциации с сохранением суммарного заряда ядра  $\sum Z_{\text{fr}} = 10$  в конусе фрагментации и без образования мезонов ( $n_s = 0$ ). В скобках — доля канала в процентах

$n_b$	0	0	1	2	3	> 3
$n_g$	0	1	0	0	0	0
F + H	26 (19,5)	9 (15,0)	13 (44,8)	2	—	1
O + He	54 (40,6)	19 (31,7)	2 (6,9)	—	1	1
O + 2H	12 (9,0)	7 (11,7)	—	—	—	—
N + He + H	12 (9,0)	7 (11,7)	4 (13,8)	1	—	—
N + 3H	3 (2,3)	3 (5,0)	—	—	—	—
C + 2He	5 (3,8)	3 (5,0)	3 (10,3)	1	—	—
C + 2He + 2H	5 (3,8)	3 (5,0)	3 (10,3)	—	—	—
C + 4H	2 (1,0)	—	—	—	—	—
B + Li + H	1 (0,8)	—	—	—	—	—
B + 2He + H	2 (1,5)	1 (1,7)	—	—	—	—
B + He + 3H	2 (1,5)	1 (1,7)	—	—	—	—
B + 5H	1 (0,8)	—	1 (3,4)	—	—	—
2Be + 2H	—	1 (1,7)	—	—	1	—
Be + Li + 3H	1 (0,8)	—	—	—	—	—
Be + 3He	2 (1,5)	—	—	—	—	—
Be + He + 4H	1 (0,8)	—	—	—	—	—
Li + 3He + H	—	1 (1,7)	—	—	—	—
5He	3 (2,3)	—	1 (3,4)	2	—	1
4He + 2H	1 (0,8)	5 (8,3)	2 (6,9)	—	—	—

ния более легких  $N\alpha$ -систем как потенциальных «кирпичиков» этого квантового состояния.

События множественной фрагментации релятивистских ядер вплоть до полного разрушения на легчайшие ядра и нуклоны без возбуждения ядер мишени надежно наблюдались для ядер Au [68–70] и Pb (рис. 9) и даже U [44]. Как таковое, существование этого явления не вызывает сомнения. Возможно, что в нем подтверждается существенная роль эффекта дальнедействующих квантово-электродинамических взаимодействий. Большие электрические заряды тяжелых ионов, движущихся с релятивистскими скоростями, и порождаемые ими сильные электрические и магнитные поля делают возможным наблюдение процессов многофотонных обменов и нового типа квантовых переходов и ядерных возбуждений, которые практически невозможно наблюдать из-за их малости в электрон-ядерных взаимодействиях. Возбуждение кратных (двойных, тройных и т. п.) гигантских ядерных резонансов различных мультипольностей может приводить к появлению неожиданных и даже

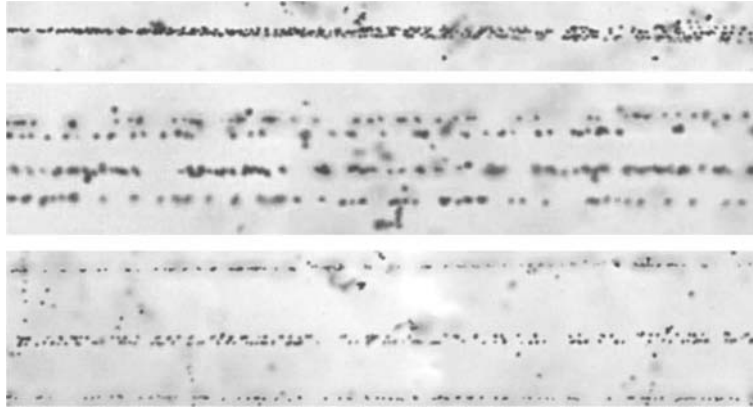


Рис. 8. Фрагментация релятивистского ядра  $\text{Ne} \rightarrow 5\text{He}$  с импульсом  $4,5 \text{ А ГэВ/с}$  в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии; на верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в очень узком угловом конусе; среднее фото: смещение от вершины взаимодействия по направлению движения фрагментов, становятся различимыми три фрагмента  $\text{He}$  и очень узкая пара треков; нижнее фото: дальнейшее смещение вдоль струи фрагментов с целью разделения узкой пары  $\text{He}$  фрагментов, являющихся продуктами промежуточного нестабильного ядра  ${}^8\text{Be}$

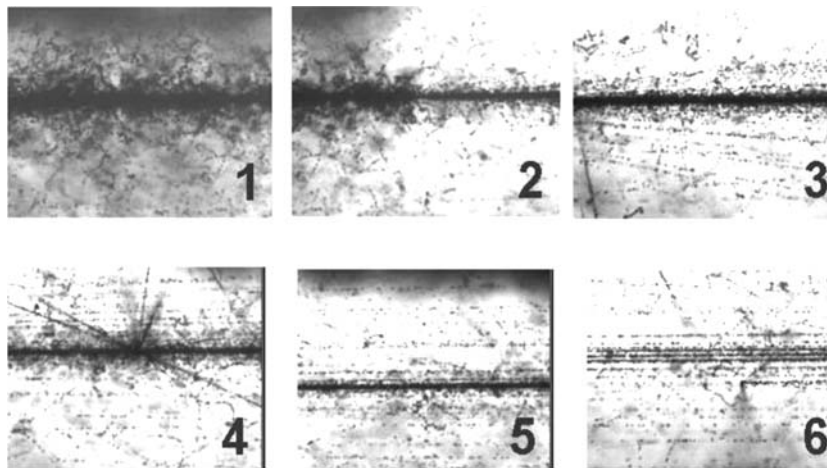


Рис. 9. Последовательные фотокадры когерентной диссоциации ядра  $\text{Pb}$  при  $160 \text{ А ГэВ}$ : первичный след (1), вершина диссоциации (2), расхождение следов (3–6); на 4-м кадре видна первая вторичная вершина; 6-й кадр соответствует удалению от вершины около  $3 \text{ см}$



экзотических конфигураций нуклонных кластеров в конечных состояниях распадов этих резонансов.

Можно обрисовать исследовательский горизонт, на который указывают эти результаты. Представленные выводы мотивируют дальнейшие исследования систем ядерных кластеров методом релятивистской фрагментации. Механизмы множественного развала легких ядер могут лежать в основе множественной когерентной диссоциации и самых тяжелых ядер. По существу, были сделаны пусть и совершенно необходимые, но только первые шаги в этом направлении.

Ультрапериферические столкновения с диссоциацией ядер могут привести к появлению в конечном состоянии многочастичных комбинаций легчайших ядер с кинематическими характеристиками относительного движения, которые представляют ядерно-астрофизический интерес и которые трудно сформировать в каких-либо других лабораторных условиях. Подчеркнем соответствие между масштабом относительных энергий релятивистских фрагментов и диапазоном температур важнейших процессов в природе — от нуклеосинтеза в Солнце до взрывов сверхновых.

Углубленное исследование когерентной диссоциации тяжелых ядер приведет к постановкам новых физических задач и развитию экспериментальной техники. Например, для исследования электромагнитной диссоциации ядер с энергиями порядка 10 А ГэВ на мишенях из свинца представляется весьма перспективным использование адронных калориметров, что позволит детектировать релятивистские нейтроны-фрагменты. В случае полного разрушения тяжелых ядер на легкие фрагменты присутствие нейтронной компоненты обусловлено симметричностью легких ядер.

Нельзя исключить, что полнота наблюдений всех продуктов реакции, обеспечиваемая в ядерной эмульсии, может так и остаться недостижимой в других подходах из-за беспрецедентно высокого уровня методических требований к полному наблюдению картины когерентной диссоциации релятивистских ядер. В этом случае результаты эмульсионных работ позволят оценить ограниченность электронных методов детектирования и придать уверенность их выводам. В этом состоит дополнительное значение использования метода ядерной эмульсии и в настоящей работе.

Предельная ограниченность статистики «белых звезд» и нарастающие сложности измерений, казалось, вели к выводу, что эмульсионный метод себя исчерпал. Однако вновь полученные данные по взаимодействиям релятивистских ядер  ${}^6\text{Li}$  в ядерной эмульсии [127, 128] способствовали очередному осознанию его возможностей и возрождению интереса для решения задач кластерной структуры. При продвижении к более тяжелым ядрам эта группа кластерных ядер оказалась как бы забытой, может быть, потому, что не могла инициировать яркие события с множеством следов. Тем не менее именно для этих ядер удалось найти физические эффекты, связанные с изменениями в

только формирующейся ядерной структуре. Поэтому эта группа ядер заслуживает систематических исследований методом релятивистской фрагментации в эмульсии. Ядро  ${}^6\text{Li}$  является единственным среди стабильных ядер, за исключением дейтрона, относящимся к экзотическим ядрам, которые характеризуются усиленными сечениями взаимодействия и узкими импульсными распределениями фрагментов из-за увеличенных размеров и слабой связи нуклонов. Структура  $\alpha + d$  ядра  ${}^6\text{Li}$  проявилась в релятивистской фрагментации в эмульсии (рис. 10).

Развитие проекта BECQUEREL сделало актуальным вопрос о привлечении тритона как кластерного элемента в структуре ядер. Он был разрешен за относительно короткий срок благодаря ориентации на анализ исключительно «белых звезд» в реакции  ${}^7\text{Li} \rightarrow \text{He} + \text{H}$  [129, 130]. Новые данные стимулировали теоретический анализ вкладов в сечение ядерной дифракционной диссоциации и электромагнитных взаимодействий на смеси ядер состава эмульсии [130]. Первый тип взаимодействия охватывает диапазон по переданному поперечному импульсу  $50 < P_T < 500$  МэВ/с, а второй — существенно более узкий: с  $P_T < 50$  МэВ/с. Их сечения, отличаясь на порядок, составляют 40,7 и 4 мб соответственно. Предсказывается весьма сложная форма для зависимости сечения от  $P_T$ . Хотя статистика и не противоречит данным, однако недостаточна для детального сравнения. Поскольку пороги диссоциации других кластерных ядер отличаются не сильно, то можно считать это разделение механизмов реакции  $P_T$  сохраняющим значение и для них.

На подготовительном этапе к проекту BECQUEREL был получен опыт анализа ядерной эмульсии, облученной в пучковом «коктейле» в виде смеси радиоактивных релятивистских ядер  ${}^6\text{He}$  (рис. 11 и 12) и  ${}^3\text{H}$  (рис. 13 и 14) [131, 132]. Впервые наблюдались события когерентной диссоциации ядер

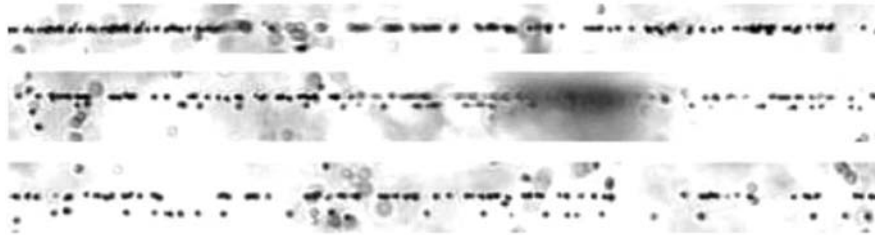


Рис. 10. Фрагментация релятивистского ядра  ${}^6\text{Li}$  на одно- и двухзарядный фрагмент в эмульсии; на верхней фотографии видна вершина взаимодействия и узкая струя из двух фрагментов; при смещении вдоль струи фрагментов (нижние фотографии) отчетливо разделяются один однозарядный и один двухзарядный фрагменты

${}^6\text{He}$ , в которых средний поперечный импульс, переданный  $\alpha$ -частицам, равен приблизительно  $0,035 \text{ ГэВ}/c$ . Столь малое значение поперечного импульса по сравнению с его значением для процессов фрагментации указывает на яркое проявление основной структурной особенности этого ядра — нейтронного гало — в процессах когерентной диссоциации. Этот эксперимент был проведен в завершающий период работы синхрофазотрона (1999 г.) и опирался на предшествующую работу по формированию пучка  ${}^3\text{H}$  [133, 134]. Он стал прототипом для начала новых экспериментов на нуклотроне ОИЯИ, на котором начала с 2001 г. функционировать система вывода пучка.

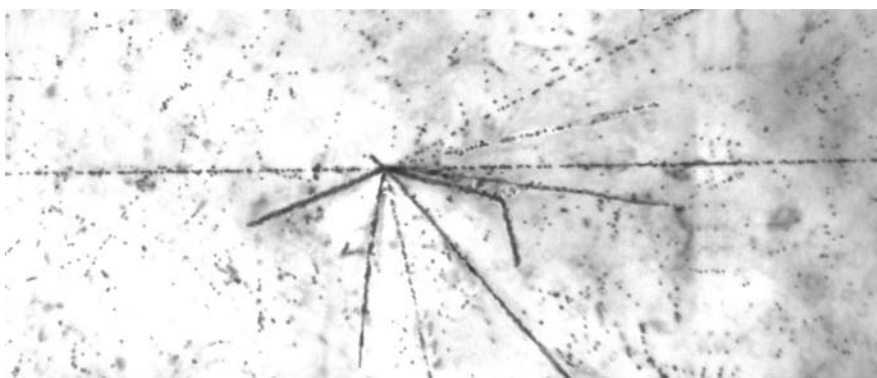


Рис. 11. Событие фрагментации  ${}^6\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}$ : входящая слева частица с зарядом  $Z_{\text{пр}} = 2$  создала вершину взаимодействия с 8 фрагментами и почти не отклоняющийся релятивистский след  $Z_{\text{фр}} = 2$

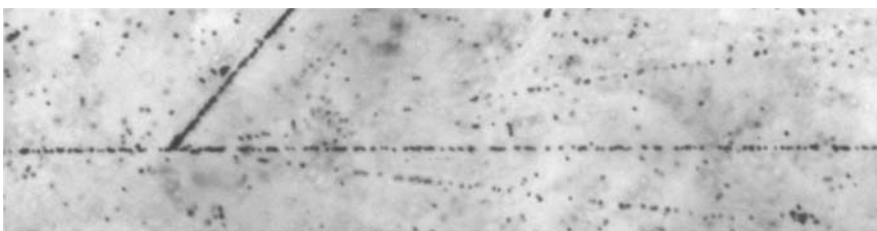


Рис. 12. Событие фрагментации  ${}^6\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}$ : входящая слева частица с зарядом  $Z_{\text{пр}} = 2$  создала вершину взаимодействия с фрагментом мишени, парой мезонов и почти не отклоняющийся релятивистский фрагмент  $Z_{\text{фр}} = 2$

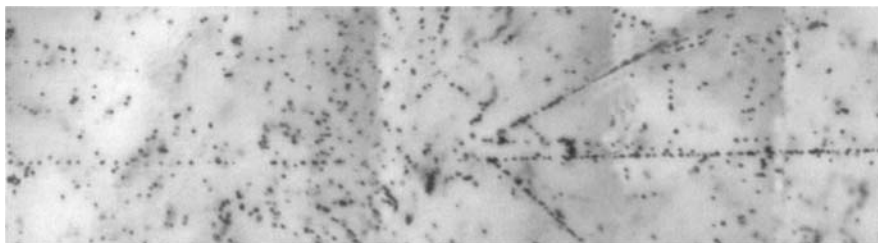


Рис. 13. Событие релятивистской перезарядки  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$  с образованием мезона; верхний трек не принадлежит событию

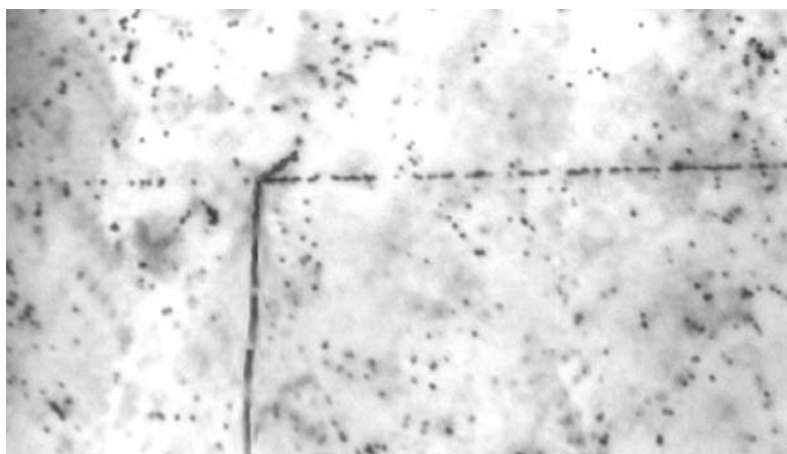


Рис. 14. Событие релятивистской перезарядки  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$  без образования мезона и с образованием пары осколков

В 2002 г. выполнено облучение эмульсии ядрами  ${}^{10}\text{B}$  (рис. 15 и 16), что оказалось весьма продуктивным шагом к проекту BECQUEREL. В диссоциации этого ядра была установлена лидирующая роль кластеризации на основе дейтрона  $2\alpha + d$  [136, 137]. Опыт ускорения ядер  ${}^{10}\text{B}$  позволил поставить задачи получения вторичных пучков изотопов  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^8\text{B}$  в оптимальных условиях для облучения эмульсии [132]. Выводы, сделанные о фрагментации ядра  ${}^{10}\text{B}$ , мотивировали облучения ядрами  ${}^{14}\text{N}$ , а также ядрами  ${}^{11}\text{B}$  для поиска кластеризации на основе тритона  $2\alpha + t$  [138]. Интерес к ядру  ${}^{11}\text{B}$  ускорил уже представленный выше анализ кластеризации  $\alpha + t$  на материале предшествующих облучений ядрами  ${}^7\text{Li}$ .

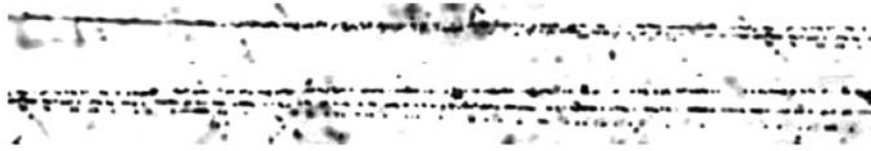


Рис. 15. Диссоциация ядра  $^{10}\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$  при энергии 1 А ГэВ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии

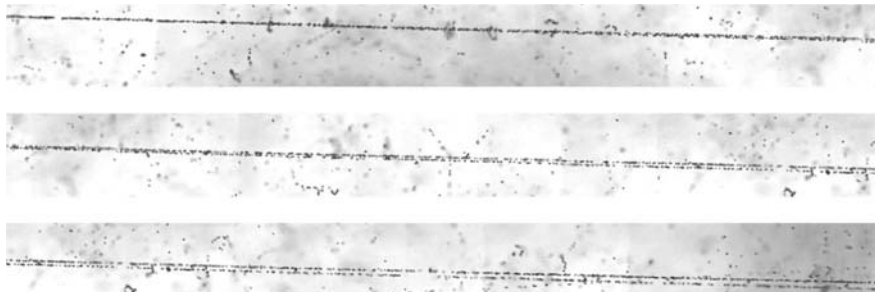


Рис. 16. Диссоциация ядра  $^{10}\text{B} \rightarrow \text{Li} + \text{He}$  при энергии 1 А ГэВ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии

Для развития представлений о кластеризации на основе  $^3\text{He}$  в 2004–2005 гг. выполнено облучение во вторичном пучке ядер  $^7\text{Be}$  (рис. 17) [132, 139]. Таким образом, исследование кластеризации расширилось на легкие ядра с нечетным числом протонов или нейтронов. Установлено, что особенности когерентной диссоциации нейтронодефицитных релятивистских ядер  $^7\text{Be}$  в периферических взаимодействиях в основном объясняются двухкластерной структурой  $^3\text{He} + ^4\text{He}$  ядра  $^7\text{Be}$ . В составе двухзарядных фрагментов, рожденных в диссоциации релятивистских ядер  $^7\text{Be}$ , содержание фрагментов  $^3\text{He}$  вдвое превышает содержание фрагментов  $^4\text{He}$ , что указывает на проявление  $^3\text{He}$  типа кластеризации в релятивистских процессах. Этот тип кластеризации наиболее ярко проявляется в лидировании канала  $^4\text{He} + ^3\text{He}$  при когерентной диссоциации ядер  $^7\text{Be}$ , не сопровождаемой испусканием нейтронов.

Для обоснованного применения метода релятивистской фрагментации к исследованию  $N\alpha$ -систем необходимо исследовать динамику образования пар  $\alpha$ -частиц на высоком уровне статистической обеспеченности и в наиболее

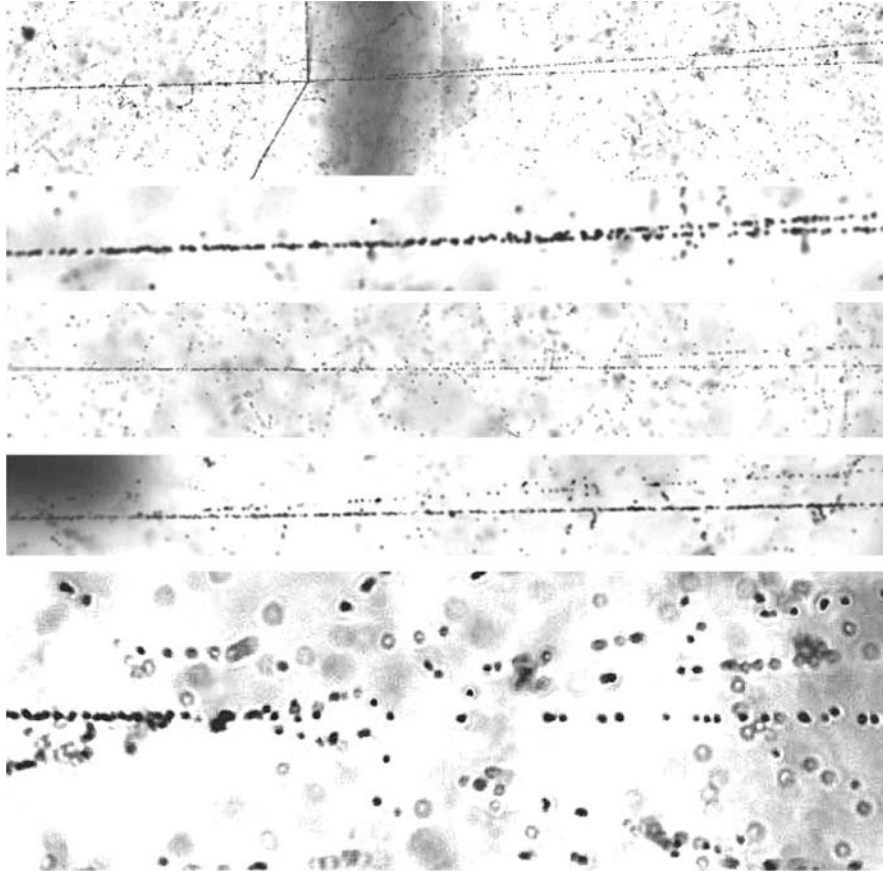


Рис. 17. Примеры событий периферической диссоциации ядра  ${}^7\text{Be}$  в эмульсии; на верхней фотографии — расщепление на два фрагмента He с образованием двух осколков ядра мишени; ниже — «белые звезды» с расщеплением на  $2\text{He}$ ,  $\text{He} + 2\text{H}$ ,  $\text{Li} + \text{H}$  и  $4\text{H}$

простых условиях (без комбинаторного фона). Эта информация позволит ответить на следующие вопросы. Прежде всего, имеет ли фрагментация релятивистских ядер отношение к их низкоэнергетическим кластерным возбуждениям? И является ли адекватным для исследования кластерных степеней свободы ядер использование эмульсионного метода, возможности которого ограничиваются наилучшими измерениями углов вылета фрагментов? Экспериментальные ответы на эти вопросы было предложено получить при анализе релятивистской фрагментации ядра  ${}^9\text{Be}$  на пару  $\alpha$ -частиц [140–142]. Продол-

жение исследования структуры ядра  ${}^9\text{Be}$  представляет ценность как одного из ключевых объектов для ядерной физики нескольких тел и ядерной астрофизики [143–147].

Сотрудничеством BECQUEREL впервые было выполнено исследование структуры  $2\alpha + n$  ядра  ${}^9\text{Be}$  методом релятивистской фрагментации (рис. 18). Установлено, что в основном фрагментация  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  (81 %) протекает через состояния  $0^+$  и  $2^+$  ядра  ${}^8\text{Be}$  с близкими вероятностями. Для когерентной диссоциации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  на тяжелых ядрах наблюдается уменьшение среднего значения поперечного импульса  $P_{T\text{sum}}\alpha$ -пары по сравнению с взаимодействиями на протонах мишени. Для основной части событий когерентной диссоциации распределение величин суммарного поперечного импульса  $P_{T\text{sum}}$  пар  $\alpha$ -частиц может быть объяснено в рамках статистической модели [148, 149] недостающим поперечным импульсом нейтрона — фрагмента ядра  ${}^9\text{Be}$ . Отсутствует значимое различие распределений по  $P_{T\text{sum}}$  для событий когерентной диссоциации через состояния  $0^+$  и  $2^+$  ядра  ${}^8\text{Be}$ . Это обстоятельство указывает на схожий механизм возникновения  $\alpha$ -пар и их одновременное присутствие с близкими весами в основном состоянии ядра  ${}^9\text{Be}$ .

В целом, представленные данные можно рассматривать как доказательство того, что в структуре ядра  ${}^9\text{Be}$  с высокой вероятностью имеется кор в виде двух состояний ядра  ${}^8\text{Be}$  и внешнего нейтрона. Полученные результаты согласуются с теоретическими работами по описанию структуры ядра  ${}^9\text{Be}$ , предполагающими присутствие в его основном состоянии состояния  $0^+$  и  $2^+$  ядра  ${}^8\text{Be}$  приблизительно с одинаковыми весами.

«Белая» звезда



Звезда с протоном отдачи ( $g$ -частицей)



Звезда с тяжелым осколком ( $b$ -частицей)

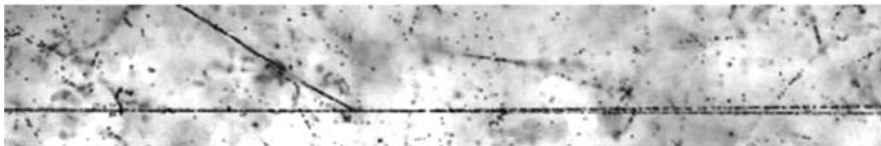


Рис. 18. События фрагментации ядра  ${}^9\text{Be}$  с образованием двух  $\alpha$ -частиц в переднем конусе фрагментации

Нечетно-нечетное ядро  $^{14}\text{N}$  представляет интерес как промежуточное звено между кластерным ядром  $^{12}\text{C}$  и дважды магическим ядром  $^{16}\text{O}$ . Изучение ядра  $^{14}\text{N}$  позволяет расширить представления об эволюции усложняющейся кластерной структуры и разнообразных конфигураций легчайших ядер за пределами  $\alpha$ -частичной кластеризации, например  $^3\text{He}+^6\text{He}+^4\text{He}+^1\text{H}$ . Детальное исследование диссоциации релятивистских ядер  $^{14}\text{N}$  важно и для различных применений. Будучи главным компонентом атмосферы Земли, ядра  $^{14}\text{N}$  могут быть источником легких редкоземельных элементов Li, Be и B, а также дейтерия. Генерация этих элементов космическими частицами высоких энергий должна происходить в результате бомбардировки земной атмосферы за время ее существования. Поэтому выводы о кластерной структуре  $^{14}\text{N}$ , получаемые при наблюдении его фрагментации в обратной кинематике, могут иметь приложения для понимания распространенности легких изотопов. Потенциально пучки ядер  $^{14}\text{N}$  могут применяться в радиационной терапии, что придает практический интерес получению сведений о кластерных особенностях фрагментации.

Сотрудничеством BECQUEREL впервые изучена детальная картина релятивистской диссоциации ядер  $^{14}\text{N}$  в ядерной фотографической эмульсии, облученной на нуклотроне ОИЯИ [150, 151]. Уникальные возможности эмульсионного метода позволили систематически изучить зарядовую топологию, угловые распределения и изотопический состав релятивистских фрагментов ядер  $^{14}\text{N}$  как в наиболее периферических взаимодействиях («белых звездах»), так и в событиях с образованием фрагментов ядер мишени и мезонов. Установлено, что множественный канал диссоциации  $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$  лидирует в распределении по зарядовой топологии фрагментов (рис. 19). Он дает вклад примерно 50% как для «белых» звезд, так и для событий с образованием фрагментов мишени и мезонов. Таким образом, ядро  $^{14}\text{N}$  оказывается наиболее эффективным источником образования  $3\alpha$ -частичных систем. Получена значительная статистика для канала диссоциации  $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$ , позволившая оценить по угловым измерениям энергетический масштаб образующихся в периферической фрагментации  $3\alpha$ -частичных систем. Установлено, что 80% взаимодействий соответствуют кластерным возбуждениям ядра  $^{12}\text{C}$  с энергиями от порога диссоциации до 14 МэВ.



Рис. 19. Фрагментация релятивистского ядра  $^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$



Выполнена оценка образования ядра  ${}^8\text{Be}$  для канала фрагментации  ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$ . Из анализа угловых корреляций следует, что ядро  ${}^{14}\text{N}$  с вероятностью не менее 20 % фрагментируют через образование промежуточного состояния  ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ . Установлено заметное снижение доли дейтронов по отношению к протонам в канале  ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + \text{H}$  по сравнению с ранее изученными случаями релятивистской фрагментации более легких ядер. Впервые изучены спектры по суммарному поперечному импульсу  $\alpha$ -фрагментов в событиях  ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + X$ . Среднее значение величины суммарного переданного системе из  $3\alpha$ -частиц поперечного импульса для «белых звезд» существенно меньше, чем для полупериферических взаимодействий, сопровождающихся образованием одного или нескольких фрагментов ядра-мишени. Впервые для ядра  ${}^{14}\text{N}$  были идентифицированы процессы релятивистской диссоциации  ${}^{11}\text{C} + {}^3\text{He}$ ,  ${}^6\text{He} + {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + p$ ,  ${}^4\text{He} + 2{}^3\text{He} + d$ , для которых характерны глубокая перегруппировка  $\alpha$ -частичной структуры этого ядра и преодоление высоких энергетических порогов. Кроме того, обнаружены процессы неупругой перезарядки  ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He} + 2\text{H}$ ,  ${}^{14}\text{N} \rightarrow 3\text{He}$ ,  ${}^{14}\text{N} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$ .

Метод ядерной эмульсии демонстрирует особые преимущества для изучения когерентной диссоциации нейтронодефицитных ядер, обеспечивает наибольшую полноту наблюдения. Сотрудничеством BECQUEREL изучена фрагментация ядер  ${}^8\text{B}$  с энергией 1,2 А ГэВ (рис. 20 и 21) [114, 152, 153]. Благодаря рекордно малой энергии связи внешнего протона (всего 138 кэВ) ядро  ${}^8\text{B}$  является наиболее чувствительным к вкладу электромагнитного взаимодействия с ядром мишени. В сильных полях тяжелых ядер могут происходить развалы ускоренного ядра  ${}^8\text{B}$  на легчайшие ядра He и H. Процесс кулоновской диссоциации является особенно простым и в то же время ценным механизмом, так как возмущение, вносимое полем ядра-мишени, известно достаточно точно [154, 155].

Совокупность данных этого облучения по измерению зарядов пучковых следов, зарядовой топологии фрагментов в периферических столкновениях, по угловым характеристикам, а также по идентификации релятивистских фрагментов  $p$ ,  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$  указывает на то, что в пучке, использованном для облучения эмульсии, доминируют именно ядра  ${}^8\text{B}$ . Таким образом, получено подтверждение того, что на нуклотроне ОИЯИ впервые успешно решена задача пучка ядер  ${}^8\text{B}$ . Получена систематическая картина распределения по зарядовым комбинациям фрагментов в периферических взаимодействиях ядер  ${}^8\text{B}$  в ядерной эмульсии. Главный вывод состоит в том, что в событиях без образования фрагментов ядер мишени и мезонов вклад канала диссоциации  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$  является лидирующим. Анализ угловых корреляций в событиях с фрагментами мишени и без них позволил обосновать отбор событий электромагнитной диссоциации  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$  по суммарному поперечному импульсу фрагментов  $P_T({}^8\text{B}^*) < 150 \text{ МэВ}/c$ , по парной энергии возбуждения  $Q_{p\text{Be}} < 5 \text{ МэВ}$  и по азимутальному углу  $\varepsilon_{p\text{Be}} > \pi/2$  разлета фрагментов

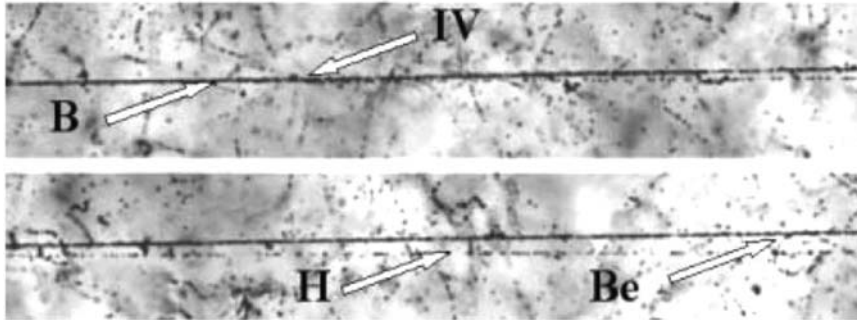


Рис. 20. Диссоциация ядра  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$  с энергией 1,2 А ГэВ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На верхней фотографии указана вершина взаимодействия IV. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить фрагмент Be и фрагмент H

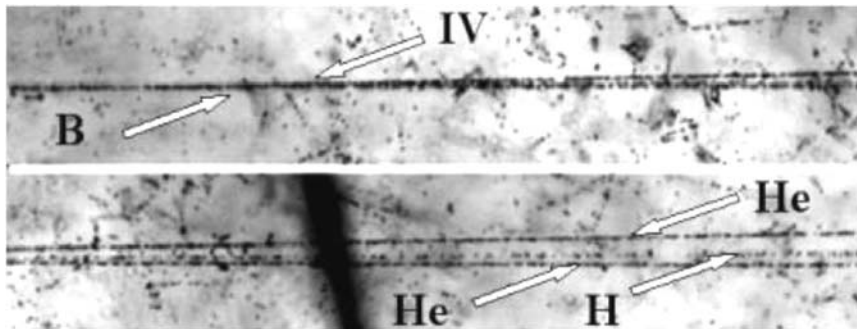


Рис. 21. Диссоциация ядра  ${}^8\text{B} \rightarrow 2\text{He} + \text{H}$  с энергией 1,2 А ГэВ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и струя фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить 2 фрагмента He и фрагмент H (трек в середине)

${}^7\text{Be}$  и  $p$ . Для событий  ${}^7\text{Be} + p$  без образования фрагментов ядер мишени и рожденных мезонов впервые получена оценка сечения электромагнитной диссоциации на ядрах из состава эмульсии. Экстраполяция этого значения на ядро свинца указывает на согласие с теоретическими расчетами.

Впервые наблюдались события периферической диссоциации ядра  ${}^{10}\text{C}$ . Получено указание на то, что канал диссоциации  ${}^{10}\text{C} \rightarrow 2\text{He} + 2\text{H}$  преобладает в событиях без образования фрагментов ядер мишени и заряженных мезонов. Идентификация изотопа  ${}^{10}\text{C}$  указывает на перспективность форми-

рования пучка  $^{10}\text{C}$  в реакции перезарядки  $^{10}\text{B} \rightarrow ^{10}\text{C}$  в условиях, удобных для исследований в эмульсии. Выводы этого этапа представляют ценность для сравнительного анализа результатов, которые могут быть получены по облучениям эмульсии ядрами  $^{9,10}\text{C}$  и  $^{12}\text{N}$ , выполненных недавно во вторичных пучках нуклотрона ОИЯИ.

Опыт анализа и выводы по кластерной структуре диссоциации ядер  $^7\text{Be}$  и  $^8\text{B}$  позволили продвинуться к следующему изотопу на границе стабильности —  $^9\text{C}$  [156]. Можно ожидать, что в когерентной диссоциации ядра  $^9\text{C}$  должна воспроизводиться картина, уже полученная для ядер  $^7\text{Be}$  и  $^8\text{B}$  с добавлением двух или одного протонов. Благодаря стабильности кора в виде ядра  $^7\text{Be}$  ядро  $^9\text{C}$  может служить более удобным пробником динамики когерентной диссоциации, чем изотопы, в которых основу составляет несвязанное ядро  $^8\text{Be}$ . Впервые изучалась фрагментация релятивистских ядер  $^9\text{C}$  и идентифицированы события в каналах когерентной диссоциации  $^9\text{C}$  на  $^8\text{B} + p$  и  $^7\text{Be} + 2p$ . Схожее соотношение каналов, содержащих  $2\text{He}$  и  $\text{He} + 2\text{H}$ , при диссоциации ядер  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$  и  $^9\text{C}$  указывает на проявление ядра  $^7\text{Be}$  как основы (кора) в ядре  $^9\text{C}$ . Впервые идентифицированы события когерентной диссоциации ядра  $^9\text{C}$  в  $^3\text{He}$ . Для протекания такого процесса необходима перегруппировка нейтрона из  $\alpha$ -кластера в коре  $^7\text{Be}$  и образование кластера  $^3\text{He}$  с преодолением высокого энергетического порога. Это наблюдение указывает на перспективность исследования более сложных конфигураций кластеров  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  в релятивистской фрагментации.

Главные достижения и основные выводы представленного цикла исследований состоят в следующем.

1. Предложена программа изучения нуклонной кластеризации на основе  $\alpha$ -частиц, дейтронов, тритонов и ядер  $^3\text{He}$  при диссоциации легких релятивистских ядер в ядерной эмульсии. Ядерная эмульсия была облучена на нуклотроне ОИЯИ целым семейством кластерных ядер, включая радиоактивные изотопы, и получен обзорный материал об образовании кластерных ансамблей.

2. Впервые исследована периферическая фрагментация релятивистских изотопов  $^{10,11}\text{B}$ , для которой обнаружено лидирование канала  $2\text{He} + \text{H}$ . Для когерентной диссоциации ядра  $^{10}\text{B}$  по этому каналу установлена кластеризация на основе дейтронов, а для ядер  $^{11}\text{B}$  — тритонов. Установлено, что диссоциация ядра  $^7\text{Be}$  определяется кластеризацией на основе ядра  $^3\text{He}$ .

3. Впервые установлено, что диссоциация ядра  $^9\text{Be}$  по  $2\alpha$ -частичному каналу преимущественно протекает через основное и первое возбужденное состояния ядра  $^8\text{Be}$  с близкими вкладами, что соответствует теоретическому описанию основного состояния ядра  $^9\text{Be}$ .

4. Установлено лидирование диссоциации  $3\text{He} + \text{H}$  для релятивистского ядра  $^{14}\text{N}$  и ее соответствие области  $3\alpha$ -кластерных возбуждений ядра  $^{12}\text{C}$ ; вклад распадов основного состояния ядра  $^8\text{Be}$  составляет не менее 20 %.

5. Установлены экспериментальные критерии электромагнитной диссоциации радиоактивного ядра  ${}^8\text{B}$  по лидирующему каналу  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$ , и получена оценка сечения электромагнитной диссоциации, экстраполяция которого на ядро свинца указывает на согласие с теоретическими расчетами.

6. Впервые изучена когерентная диссоциация радиоактивных ядер  ${}^9\text{C}$ , в которой идентифицированы канал  ${}^3\text{He}$ , связанный с глубокой перестройкой основного состояния ядра  ${}^9\text{C}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Балдин А. М.* Физика релятивистских ядер // ЭЧАЯ. 1977. Т. 8. С. 429–477.
2. *Baldin A. M., Didenko L. A.* Asymptotic properties of hadron matter in relative four velocity space // Fortsch. Phys. 1990. V. 38. P. 261.
3. *Балдин А. М., Балдин А. А.* Релятивистская ядерная физика: пространство относительных 4-скоростей, симметрии решений, принцип ослабления корреляций, подобие, промежуточные асимптотики // ЭЧАЯ. 1998. Т. 29. С. 578.
4. *Malakhov A. I.* Asymptotic Laws in Relativistic Nuclear Physics and Their Experimental Verification // ЭЧАЯ. 2000. V. 31. P. 229.
5. *Malakhov A. I.* Research Program for the Nuclotron // Nucl. Phys. A. 2004. V. 734. P. 82.
6. *Зарубин П. И.* Перспективы экспериментов на ускорительном комплексе синхрофазотрон–нуклотрон // ЭЧАЯ. 1995. Т. 26. С. 523–561.
7. *Hansen P. G., Jensen A. S., Jonson B.* Nuclear Halos // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1995. V. 45. P. 591.
8. *Hansen P. G., Tolstevin J. A.* Direct Reactions with Exotic Nuclei // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2003. V. 53. P. 219.
9. *Aumann T.* Reactions with fast radioactive beams of neutron-rich nuclei // Eur. J. Phys. A. 2005. V. 26. P. 441.
10. *Geesaman D. F., Gelbke C. K., Janssens R. V. F.* Physics of Rare Isotope Accelerator // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2006. V. 56. P. 53.
11. *Wuosmaa A. H. et al.* Recent Advances in the Study of Nuclear Clusters // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1995. V. 45. P. 89.
12. *von Oertzen W., Freer M., Kanada-En'yo Y.* Nuclear clusters and nuclear molecules // Phys. Rep. 2006. V. 432. P. 43.
13. *Freer M.* The clustered nucleus — cluster structures in stable and unstable nuclei // Rep. Prog. Phys. 2007. V. 70. P. 2149–2210.
14. *Bertulani C. A., Baur G.* Electromagnetic processes in relativistic heavy ion collisions // Phys. Rep. 1988. V. 163. P. 299–408.
15. *Baur G., Rebel H.* Coulomb Breakup of Nuclei – Applications to Astrophysics // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1996. V. 46. P. 321.

16. *Strong A. W., Mockalenko I. V., Ptushkin V. S.* Cosmic-Ray Propagation and Interactions in the Galaxy // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2003. V. 57. P. 285.
17. *Строковский Е. А., Гареев Ф. А., Ратис Ю. Л.* Дельта-изобарные возбуждения атомных ядер в зарядово-обменных реакциях // *ЭЧАЯ.* 1993. Т. 24. С. 603.
18. *Батусов Ю. А. и др.* Альфа-распады гиперядер  ${}_{\Lambda}^{10}\text{Be}$  и  ${}_{\Lambda}^{10}\text{B}$  на нуклотроне — ключ к разгадке некоторых головоломок в безлептонных процессах // *ЭЧАЯ.* 2005. Т. 36. С. 318.
19. *Bradnova V. et al.* Beryllium (Boron) Clustering Quest in Relativistic Multifragmentation // *ЯФ.* 2003. V. 66, No 3. P. 1694–1698.
20. *Bradnova V. et al.* Nuclear Clustering Quest in Relativistic Multifragmentation // *Few Body Systems Suppl.* 2002. V. 14. P. 241–244.
21. *Bradnova V. et al.* Nuclear Clustering in Processes of Relativistic Multifragmentation // *Nucl. Phys. A.* 2004. V. 734. P. E92–E95.
22. *Bradnova V. et al.* Studies of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Processes // *Acta Phys. Slov.* 2004. V. 54, No. 4. P. 351–365.
23. <http://becquerel.lhe.jinr.ru/>  
[http://becquerel.jinr.ru.](http://becquerel.jinr.ru)
24. *Пауэлл С., Фаулер П., Перкинс Д.* Исследование элементарных частиц фотографическим методом // М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
25. *Barkas W. H.* Nuclear research emulsions. N. Y. and London: Acad. Press, 1963.
26. *Bradt H. L., Peters B.* The heavy nuclei of the primary cosmic radiation // *Phys. Rev.* 1950. V. 77. P. 54.
27. *Aleksandrov A. B. et al.* Completely automated measurement facility (PAVICOM) for track-detector data processing // *NIM A.* 2004. V. 535. P. 542.
28. *Фейнберг Е. Л., Котельников К. А., Полухина Н. Г.* Полностью автоматизированный измерительный комплекс (ПАВИКОМ) для обработки материала трековых детекторов // *ЭЧАЯ.* 2004. Т. 35. С. 762.
29. *De Serio M. et al.* High precision measurements with nuclear emulsions using fast automated microscopes // *NIM A.* 2005. V. 554. P. 247.
30. *Толстов К. Д.* Результаты и некоторые перспективы эмульсионных исследований взаимодействий частиц и атомных ядер. Автореферат докторской диссертации 2723, Радиевый институт имени В. Г. Хлопина. Дубна, 1966.
31. *Antonova M. G. et al.* General Characteristics of Proton-Nucleus Interactions in Nuclear Emulsion at 67 GeV/c // *Phys. Lett. B.* 1972. V. 39. P. 282.
32. *Antonova M. G. et al.* Coherent Production of Particles by 67 GeV/c Protons on Emulsion Nuclei // *Phys. Lett. B.* 1972. V. 39. P. 285.
33. *Адамович М. И. и др.* Стриппинг дейтронов 9,38 ГэВ/с на ядрах эмульсии. Препринт ОИЯИ Р1-6386. Дубна, 1972.
34. *Толстов К. Д. и др.* Неупругие взаимодействия  $\alpha$ -частиц с импульсом 17 ГэВ/с с ядрами. Препринт ОИЯИ Р1-8313. Дубна, 1974.

35. Galstyan J. A. et al. Interactions of 9.4 GeV/c Deuterons in an Emulsion: Multiplicity and Angular Distribution // Nucl. Phys. A. 1973. V. 208. P. 626.
36. Dalkhazhav N. et al. 9.38 GeV/c deuteron stripping on photoemulsion nuclei // Nucl. Phys. A. 1974. V. 222. P. 614.
37. Силеш Э. и др. Взаимодействие дейтронов 2,43 ГэВ/с с ядрами эмульсии // ЯФ. 1972. Т. 16. С. 109.
38. Марин А. и др. Взаимодействия ядер  $^{12}\text{C}$  с импульсом 4,5 ГэВ/с на нуклон с ядрами эмульсии и каскадно-испарительная модель // ЯФ. 1979. Т. 29, №1. С. 105–117.
39. Heckman H. H. et al. Fragmentation of  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  and  $^{16}\text{O}$  nuclei in nuclear emulsion at 2.1 GeV/nucleon // Phys. Rev. C. 1978. V. 17. P. 1735.
40. Chernov G. M. et al. Interactions of Relativistic Nitrogen Nuclei in an Emulsion at 2.1 GeV/nucleon // Nucl. Phys. A. 1977. V. 280. P. 478.
41. Chernov G. M. et al. Fragmentation of Relativistic  $^{56}\text{Fe}$  Nuclei in Emulsion // Nucl. Phys. A. 1984. V. 412. P. 534.
42. Андреева Н. П. и др. Фрагментация релятивистских ядер  $^{22}\text{Ne}$  на ядрах эмульсии // ЯФ. 1988. Т. 47. С. 157.
43. Андреева Н. П. и др. Неупругие взаимодействия ядер кремния с ядрами эмульсии при импульсе 4,5 А ГэВ/с // ЯФ. 1990. Т. 51. С. 1047.
44. Friedlander E. M., Heckman H. H., Karant Y. J. Nuclear Collisions of Uranium Nuclei up to 1 GeV/nucleon // Phys. Rev. C. 2003. V. 27. P. 2436.
45. Jain P. L. et al. Fission of Uranium Nuclei in Flight at Relativistic Energies // Phys. Rev. 1984. V. 52. P. 1763.
46. Adamovich M. I. et al. Production of Helium ( $Z = 2$ ) projectile fragments in  $^{16}\text{O}$ -Emulsion Interactions from  $E/A = 2$  to 200 GeV // Phys. Rev. C. 1989. V. 20. P. 66.
47. Adamovich M. I. et al. Helium Production in 10.7 А GeV Au Induced Nucleus-Nucleus Collisions // Phys. Lett. B. 1994. V. 338. P. 397.
48. Baroni G. et al. Electromagnetic dissociation of 200 GeV/nucleon  $^{16}\text{O}$  and  $^{32}\text{S}$  ions in nuclear emulsion // Nucl. Phys. A. 1990. V. 516. P. 673.
49. Baroni G. et al. The Electromagnetic and Hadronic Diffractive Dissociation of  $^{16}\text{O}$  ions // Nucl. Phys. A. 1992. V. 540. P. 646.
50. Adamovich M. I. et al. He Production in 158 А GeV/c Pb on Pb Interactions // Phys. Lett. B. 1997. V. 390. P. 445.
51. Adamovich M. I. et al. Scaling Properties of Charged Particle Multiplicity Distributions in Oxygen Induced Emulsion Interactions at 14.6, 60 and 200 А GeV // Phys. Lett. B. 1989. V. 223. P. 262.
52. Adamovich M. I. et al. Limiting Fragmentation in Oxygen-Induced Emulsion Interactions at 14.6, 60 and 200 GeV/c // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 62. P. 2801.

53. *Adamovich M.I. et al.* Rapidity Density Distributions and Their Fluctuations in violent Au-induced Nuclear Interactions at 11.6 A GeV/c // *Phys. Lett. B.* 1994. V. 322. P. 166.
54. *Краснов С.А. и др.* Исследование полного разрушения свинца ядрами магния-24 при импульсе 4,5 А ГэВ/с. Препринт ОИЯИ Р1-88-389. Дубна, 1988.
55. *Андреева Н.П. и др.* Характеристики полного разрушения ядер Ag, Вг ядрами  $^{22}\text{Ne}$  и  $^{28}\text{Si}$  импульсом 4,1–4,5 А ГэВ/с // *ЯФ.* 1992. Т. 55. С. 1010.
56. *Adamovich M.I. et al.*  $^{28}\text{Si}$  ( $^{32}\text{S}$ ) Fragmentation at 3.7, 14.6 A and 200 A GeV // *Nucl. Phys. A.* 1995. V. 351. P. 311.
57. *Краснов С.А., ..., Соловьева З.И., ...* Топологические характеристики фрагментации релятивистских ядер  $^{28}\text{Si}$  на ядрах эмульсии. Препринт ОИЯИ Р1-88-252. Дубна, 1988.
58. *Андреева Н.П., ..., Соловьева З.И., ...* Топологические характеристики процесса фрагментации релятивистских ядер  $^{22}\text{Ne}$  с импульсом 4,1 А ГэВ/с на ядрах эмульсии. Препринт ОИЯИ Р1-85-692. Дубна, 1988.
59. *El-Naghy A. et al.* Fragmentation of  $^{22}\text{Ne}$  in Emulsion at 4.1 A // *J. Phys. G.* 1988. V. 14. P. 1125.
60. *El-Nadi M. et al.* Nuclear Multifragmentation of  $^{32}\text{S}$  and  $^{28}\text{Si}$  in Emulsion Nuclei // *J. Phys. G.* 1998. V. 24. P. 2265.
61. *El-Nadi M. et al.* Fragmentation of  $^{28}\text{Si}$  Nuclei in Nuclear Emulsion // *J. Phys. G.* 1999. V. 25. P. 1169.
62. *Jilany M.A.* Nuclear Fragmentation in Interactions of 3.7 A GeV  $^{24}\text{Mg}$  Projectiles with Emulsion Targets // *Phys. Rev. C.* 2004. V. 79. P. 014901.
63. *Богданов В.Г. и др.* Наблюдение распада (деления) релятивистских ядер  $^{24}\text{Mg}$  и  $^{28}\text{Si}$  на два близких по заряду фрагмента // *Письма в ЖЭТФ.* 1986. Т. 44. С. 306.
64. *Вокал С., ..., Соловьева З.И., ...* Образование двух многозарядных фрагментов при фрагментации релятивистского ядра  $^{28}\text{Si}$  на ядрах эмульсии. Препринт ОИЯИ Р1-91-85. Дубна. 1991.
65. *Singh G. et al.* Electromagnetic Dissociation of  $^{32}\text{S}$  at Ultrarelativistic Energy in Nuclear Emulsion // *Phys. Rev. C.* 1990. V. 3. P. 999.
66. *Singh G., Jain P.L.* Electromagnetic Dissociation of Relativistic Heavy Ions in Emulsion // *Z. Phys. A.* 1992. V. 344. P. 73.
67. *Adamovich M.I.* Critical behaviour in Au Fragmentation at 10.7 A GeV // *Eur. Phys. J. A.* 1998. V. 1. P. 77.
68. *Cherry M.I. et al.* Fragmentation and Particle Production in Interactions of 10.6 GeV/N gold nuclei with hydrogen, light and heavy target // *Eur. Phys. J. C.* 1998. V. 5. P. 641.
69. *Adamovich M.I. et al.* Fragmentation and Multifragmentation of 10.6 A GeV Gold Nuclei // *Eur. Phys. J. A.* 1999. V. 5. P. 429.
70. *Adamovich M.I. et al.* Multifragmentation of Gold Nuclei in the Interactions with Photoemulsion Nuclei at 10.7 A GeV // *Z. Phys. A.* 1997. V. 359. P. 277.

71. Ажгирей Л. С., Юдин Н. П. Релятивистские дейтроны: их динамика и структура в столкновениях с нуклонами и ядрами // ЭЧАЯ. 2006. Т. 37. С. 1012.
72. Аблеев В. Г. и др. Измерение выхода протонов-спектаторов под нулевым углом вылета в реакции стриппинга дейтронов на углероде при импульсе 8,9 ГэВ/с // ЯФ. 1983. Т. 37. С. 132.
73. Ableev V. G. et al. Alpha-Nucleus Differential Cross-Section at 4.45 GeV/c/nucleon // Acta Phys. Pol. B. 1985. V. 16. P. 913.
74. Ableev V. G. et al. Diffraction Scattering of Alpha-particles on Nuclei at 17.9 GeV/c // Z. Phys. A. 1991. V. 340. P. 191.
75. Ableev V. G. et al. Proton and Triton Momentum Distributions from  $^4\text{He}$  Fragmentation // Few-Body Systems. 1990. V. 8. P. 137.
76. Зелински П. и др. Импульсные характеристики спектаторов в процессах фрагментации ядра  $^4\text{He}$  // ЯФ. 1986. Т. 43. С. 791.
77. Глаголев В. В. и др. Изотопный состав фрагментов, образованных в  $^{16}\text{O}p$ -взаимодействиях при высоких энергиях // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 58. С. 497.
78. Глаголев В. В. и др. Выход зеркальных ядер  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$  и  $^7\text{Li}$ ,  $^7\text{Be}$  во взаимодействиях релятивистских ядер кислорода с протоном // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59. С. 316.
79. Глаголев В. В. и др. Образование ядер гелия в кислород-протонных соударениях при релятивистских энергиях // ЯФ. 1995. Т. 58. С. 2005.
80. Глаголев В. В. и др. Взаимодействие в конечном состоянии в  $^3\text{He}p$ -столкновениях // ЯФ. 1995. Т. 58. С. 2000.
81. Браун Г. и др. Изучение механизмов безмезонных  $^4\text{He}p$ -реакций // ЯФ. 1996. Т. 59. С. 2001.
82. Глаголев В. В. и др. Испускание легких фрагментов в  $^{16}\text{O}p$ -взаимодействиях при импульсе 3,25 ГэВ/с // ЯФ. 1999. Т. 62. С. 1472.
83. Базаров Э. Х. и др. Феноменологический анализ каналов образования трех и четырех  $\alpha$ -частиц в  $^{16}\text{O}p$ -соударениях при 3,25 А ГэВ/с // ЯФ. 2004. Т. 67. С. 730–735.
84. Глаголев В. В. и др. Образование ядер гелия в кислород-протонных соударениях при релятивистских энергиях // ЯФ. 1995. Т. 58. С. 2005.
85. Глаголев В. В. и др. К вопросу о фрагментации релятивистских ядер кислорода во взаимодействиях с протонами // ЯФ. 2000. Т. 63. С. 575.
86. Glagolev V. V. et al. Fragmentation of relativistic oxygen nuclei interaction with a proton // Eur. Phys. J. A. 2001. V. 11. P. 285.
87. Typel S. et al. Composition and thermodynamics of nuclear matter with light clusters // Phys. Rev. C. 2010. V. 81. P. 015803.
88. Horowitz C. J. et al. Dynamical response of the nuclear «pasta» in neutron star crusts // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. P. 035801.
89. Botvina A. S., Mishustin I. N. Multifragmentation reactions and properties of stellar matter at subnuclear densities // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. P. 048801.



90. *Sumiyoshi K., Röpke G.* Appearance of light clusters in post-bounce evolution of core-collapse supernovae // *Phys. Rev. C.* 2008. V. 77. P. 055804.
91. *Wirringa R.B. et al.* Quantum Monte Carlo calculations of  $A = 8$  nuclei // *Phys. Rev. C.* 2000. V. 62. P. 014001.
92. *Yamada T., Schuck P.* Dilute multi- $\alpha$  cluster states in nuclei // *Phys. Rev. C.* 2004. V. 69. P. 024309.
93. *Takemoto H. et al.* Clustering phenomena in nuclear matter below the saturation density // *Phys. Rev. C.* 2004. V. 69. P. 035802.
94. *Sedrakian A., Clark J.W.* Pair condensation and bound states in fermionic systems // *Phys. Rev. C.* 2006. V. 73. P. 035803.
95. *Tohsaki A. et al.* Alpha Cluster Condensation in  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$  // *Phys. Rev. C.* 2006. V. 74. P. 044311.
96. *Chernykh M. et al.* Structure of the Hoyle State in  $^{12}\text{C}$  // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98. P. 032501.
97. *Maruhn J.A. et al.*  $\alpha$ -cluster structure and exotic states in a self-consistent model for light nuclei // *Phys. Rev. C.* 2008. V. 77. P. 064312.
98. *Funaki Y. et al.* Density-induced suppression of the  $\alpha$ -particle condensate in nuclear matter and the structure of  $\alpha$ -cluster states in nuclei // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. P. 082502.
99. *Shlomo S. et al.* Effect of medium dependent binding energies on inferring the temperatures and freeze-out density of disassembling hot nuclear matter from cluster yields // *Phys. Rev. C.* 2009. V. 79. P. 034604.
100. *Funaki Y. et al.* Concepts of nuclear  $\alpha$ -particle condensation // *Phys. Rev. C.* 2009. V. 80. P. 064326.
101. *Schuck P. et al.* Alpha-particle condensation in nuclei // *Nucl. Phys. A.* 2004. V. 738. P. 94–100.
102. *Schuck P. et al.*  $\alpha$ -Particle condensation in nuclear system // *Nucl. Phys. A.* 2007. V. 788. P. 293–300.
103. *Funaki Y. et al.* Resonance states in  $^{12}\text{C}$  and  $\alpha$ -particle condensation // *Eur. Phys. J. A.* 2005. V. 24. P. 321–342.
104. *Suzuki Y., Takahashi M.*  $\alpha$  cluster condensation in  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$ ? // *Phys. Rev. C.* 2002. V. 65. P. 064318.
105. *Tohsaki A. et al.* Wide perspective of alpha condensation in light 4N nuclei // *Nucl. Phys. A.* 2004. V. 738. P. 259–263.
106. *Fulton B.R. et al.* Exclusive breakup measurements for  $^9\text{Be}$  // *Phys. Rev. C.* 2004. V. 70. P. 047602.
107. *Freer M. et al.*  $\alpha:2n:\alpha$  Molecular Band in  $^{10}\text{Be}$  // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 96. P. 042501.
108. *Leask P.J. et al.* Breakup measurements of particle unbound states in  $^{10}\text{B}$  // *Phys. Rev. C.* 2001. V. 63. P. 034307.

109. *Curtis N. et al.*  $\alpha + \text{Li}$  and  $\text{H} + \text{Be}$  decay of  $^{10,11,12}\text{B}$  // *Phys. Rev. C.* 2005. V. 72. P. 044320.
110. *Curtis N. et al.* Breakup reaction study of the Brunnian nucleus  $^{10}\text{C}$  // *Phys. Rev. C.* 2008. V. 77. P. 021301(R).
111. *Zarubin P. I.* Clustering Pattern of Light Nuclei in Dissociation above 1 A GeV // *AIP Proc.* 2005. V. 768. P. 404.
112. *Andreeva N. P. et al.* Clustering in Light Nuclei in Fragmentation above 1 A GeV // *EPJ.* 2006. A27, s1. P. 295.
113. *Zarubin P. I., Artemenkov D. A., Orlova G. I.* Dissociation of Relativistic Nuclei in Peripheral Interactions in Nuclear Track Emulsion // *Nucl. Sci. Safety in Europe.* Springer, 2006. P. 189.
114. *Artemenkov D. A. et al.* Clustering Features of  $^9\text{Be}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^7\text{Be}$ , and  $^8\text{B}$  Nuclei in Relativistic fragmentation // *AIP Proc.* 2007. V. 912. P. 78.
115. *Воинов В. Г., Чернявский М. М.* Некоторые систематические ошибки оценок импульсов и углов вылета заряженных частиц в ядерных эмульсиях // *Труды ФИАН.* Т. 108. М.: Наука, 1979. С. 166.
116. *Андреева Н. П. и др.* Топология «белых звезд» в релятивистской фрагментации легких ядер // *ЯФ.* 2005. Т. 68, № 3. С. 484–494.
117. *Белага В. В. и др.* Когерентная диссоциация  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  при 4,5 А ГэВ/с на ядрах эмульсии, обогащенной свинцом // *ЯФ.* 1995. Т. 58. С. 2014.
118. *Бондаренко А. И., Чернов Г. М., Юлдашев Б. С.* Реакция диссоциации  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  на ядрах водорода, углерода и тантала при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон // *ЯФ.* 1994. Т. 57. С. 430.
119. *Белага В. В. и др.* Фрагментация ядра углерода на три  $\alpha$ -частицы в пропановой пузырьковой камере при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон // *ЯФ.* 1996. Т. 59. С. 869.
120. *Белага В. В. и др.* Изучение фрагментации релятивистского ядра углерода в неупругих соударениях с ядрами пропана и тантала // *ЯФ.* 1996. Т. 59. С. 2008.
121. *Кириченко В. В.* Альфа-частичное фоторасщепление легких ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  // *ЭЧАЯ.* 2001. Т. 32, вып. 4. С. 802.
122. *Аветян Ф. А. и др.* Когерентная диссоциация  $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$  в эмульсии при импульсе 4,5 ГэВ/с на нуклон // *ЯФ.* 1996. Т. 59. С. 110.
123. *Engelage J. et al.* A quasi-exclusive measurement of  $^{12}\text{C}$  ( $^{12}\text{C}$ ,  $3\alpha$ )X at 2.1 GeV/nucleon // *Phys. Lett. B.* 1986. V. 173. P. 34–38.
124. *Cucinotta F., Dubey R. D.* Alpha-cluster description of excitation energies in  $^{12}\text{C}$  ( $^{12}\text{C}$ ,  $3\alpha$ ) X at 2.1 A GeV // *Phys. Rev. C.* 1994. V. 50. P. 1090–1096.
125. *Andreeva N. P. et al.* Clustering in Light Nuclei in Fragmentation above 1 A GeV // *Eur. Phys. J.* 2006. A27, s1. P. 295.
126. *Bhalla K. B. et al.* Relativistic  $\alpha$ -particles Emitted in Fe-Emulsion Interactions at 1.7 A GeV // *Nucl. Phys. A.* 1981. V. 412. P. 446.
127. *Адамович М. И. и др.* Взаимодействие релятивистских ядер  $^6\text{Li}$  с ядрами эмульсии // *ЯФ.* 1999. Т. 62. С. 1461.

128. *Lepikhin F. G. et al.* Yields and transverse moments of the  ${}^6\text{Li}$  fragments in the emulsion at 4.5 GeV/c per nucleon // *Eur. Phys. J. A.* 1998. V. 1. P. 137.
129. *Adamovich M. I. et al.* Dissociation of relativistic  ${}^7\text{Li}$  in photoemulsion and structure of  ${}^7\text{Li}$  nucleus // *Phys. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2004. V. 30. P. 1479–1485.
130. *Пересадыко Н. Г. и др.* Роль ядерного и электромагнитного взаимодействий в когерентной диссоциации релятивистского ядра  ${}^7\text{Li}$  по каналу  ${}^3\text{H} + {}^4\text{He}$  // *Письма в ЖЭТФ.* 2008. Т. 88. С. 83.
131. *Adamovich M. I. и др.* Irradiation of nuclear emulsions in relativistic beams of  ${}^6\text{He}$  and  ${}^3\text{H}$  nuclei // *Письма в ЭЧАЯ.* 2002. № 110. С. 29–38.
132. *Rukoyatkin P. A. et al.* Secondary Nuclear Fragment Beams for Investigations of Relativistic Fragmentation of Light Radioactive Nuclei using Nuclear Photoemulsion at Nuclotron // *EPJ. ST.* 2008. V. 162. P. 267.
133. *Avramenko S. A., . . . , Rukoyatkin P. A.* Tritons for the Study of the Charge-Exchange Reactions with the LHE Streamer Chamber: Status and Some Possibilities // *JINR Rapid Comm.* 1997. No. 6[86]–97. P. 61.
134. *Avramenko S. A. et al.* Topological characteristics of the charge exchange reaction  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$  on neon and magnesium nuclei at 9 GeV/c // *Pis'ma v ZhETF.* 1992. V. 55. P. 679.
135. *Адамович М. И. и др.* Исследование кластеризации легких ядер в процессах релятивистской мультифрагментации // *ЯФ.* 2004. Т. 67, № 3. С. 533.
136. *Лепехин Ф. Г.* Выход фрагментов ядра  ${}^{10}\text{B}$  // *Письма в ЭЧАЯ.* 2002. № 3. С. 25.
137. *Лепехин Ф. Г.* Образование и роль ядер  ${}^8\text{Be}$  при фрагментации легких ядер // *ЭЧАЯ.* 2005. Т. 36. С. 437.
138. *Карабова М. и др.* Периферическая фрагментация релятивистских ядер  ${}^{11}\text{B}$  в ядерной эмульсии // *ЯФ.* 2009. Т. 72, № 2. С. 329.
139. *Пересадыко Н. Г. и др.* Каналы фрагментации релятивистских ядер  ${}^7\text{Be}$  в периферических взаимодействиях // *ЯФ.* 2007. Т. 70, № 7. С. 1266.
140. *Артеменков Д. А. и др.* Особенности фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  в ядерной эмульсии при энергии 1,2 А ГэВ // *ЯФ.* 2007. Т. 70, № 7. С. 1261.
141. *Artemenkov D. A. et al.* Detailed Study of Relativistic  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  Fragmentation in Peripheral Collisions in a Nuclear Track Emulsion // *Few Body Systems.* 2008. V. 273.
142. *Artemenkov D. A. et al.* Fragmentation of Relativistic Nuclei in Peripheral Interactions in Nuclear Track Emulsion // *ЯФ.* 2008. Т. 71. С. 1595.
143. *Descouvemont P.* Microscopic three-cluster study of the low-energy  ${}^9\text{Be}$  photodisintegration // *Eur. Phys. J. A.* 2001. V. 12. P. 413–419.
144. *Grigorenko L. V., Zhukov M. V.* Three-body resonant radiative capture in astrophysics // *Phys. Rev. C.* 2005. V. 72. P. 015803.
145. *Parfenova Y. L., Leclercq-Willain Ch.* Hyperfine anomaly in Be isotopes and neutron spatial distribution: A three-cluster model for  ${}^9\text{Be}$  // *Phys. Rev. C.* 2005. V. 72. P. 054304.

146. *Parfenova Y. L., Leclercq-Willain Ch.* Hyperfine anomaly in Be isotopes in the cluster model and the neutron spatial distribution // *Phys. Rev. C.* 2005. V. 72. P. 024312.
147. *Toshito T. et al.* Measurements of Projectile-like  $^8\text{Be}$  and  $^9\text{B}$  in 200–400 MeV/nucleon  $^{12}\text{C}$  on water // *Phys. Rev. C.* 2008. V. 78. P. 067602.
148. *Feshbach H., Huang K.* Fragmentation of relativistic heavy ions // *Phys. Lett. B.* 1973. V. 47. P. 300.
149. *Goldhaber A. S.* Statistical models of fragmentation processes // *Phys. Lett. B.* 1974. V. 53. P. 306.
150. *Щедрина Т. В. и др.* Периферические взаимодействия релятивистских ядер  $^{14}\text{N}$  с ядрами эмульсии // *ЯФ.* 2007. Т. 70. С. 1271.
151. *Shchedrina T. V., Zarubin P. I.* Clustering Features of  $^{14}\text{N}$  in Relativistic Multifragmentation Process // *Ядерна фізика та енергетика.* 2009. Т. 10. С. 50.
152. *Станоева Р. и др.* Периферическая фрагментация ядер  $^8\text{B}$  с энергией 1,2 А ГэВ в ядерной эмульсии // *ЯФ.* 2007. Т. 70. С. 1261.
153. *Станоева Р. и др.* Электромагнитная диссоциация релятивистских ядер  $^8\text{B}$  в ядерной эмульсии // *ЯФ.* 2009. Т. 72. С. 731.
154. *Heckman H. H., Lindstrom P. J.* Coulomb dissociation of relativistic  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$  nuclei // *Phys. Rev. Lett.* 1976. V. 37. P. 5.
155. *Olson D. L. et al.* Electromagnetic dissociation of relativistic  $^{18}\text{O}$  nuclei // *Phys. Rev. C.* 1981. V. 24. P. 1529.
156. *Krivenkov D. O. et al.* First results on the interactions of relativistic  $^9\text{C}$  nuclei in nuclear track emulsion // *Progress in High Energy Physics Nuclear Safety.* Springer, 2006. P. 149–156; e-Print: arXiv:0811.1880.

Получено 21 июня 2010 г.



В период подготовки текста настоящего доклада эмульсионное сотрудничество понесло тяжкую утрату — от нас ушла Галина Ивановна Орлова. Г. И. Орлова была опытной экспертом и глубоким исследователем, с участием которого получены основные результаты по взаимодействиям релятивистских ядер в ядерной эмульсии. Появление этого обзора основано на этих результатах. С помощью Г. И. Орловой сформулированы задачи проекта ВЕСQUEREL, подготовлены в ОИЯИ молодые исследователи и создана уникальная видеотека взаимодействий ядер. На все эти инициативы Г. И. Орлова отзывалась с энтузиазмом, наполняя их самым высоким уровнем компетентности и ответственности. Она прикладывала значительные усилия для сохранения технологии ядерной эмульсии и подготовки все новых и новых образцов к облучениям. Встреча автора с Г. И. Орловой, состоявшаяся на данных Черенковских чтениях, стала последней. Трудно принять эту безвременную утрату. Светлая память об этой замечательной женщине останется с нами навсегда.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 6.07.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,43. Уч.-изд. л. 2,86. Тираж 365 экз. Заказ № 57034.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)