

ИССЛЕДОВАНИЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ЛЕГКИХ ЯДЕР В ПРОЦЕССАХ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ МУЛЬТИФРАГМЕНТАЦИИ

© 2004 М. И. Адамович¹⁾, В. Браднава²⁾, С. Вокал³⁾,
 С. Г. Герасимов¹⁾, В. А. Дронов¹⁾, П. И. Зарубин^{2)*}, А. Д. Коваленко²⁾,
 К. А. Котельников¹⁾, В. А. Краснов²⁾, В. Г. Ларионова¹⁾, Ф. Г. Лепехин⁴⁾,
 А. И. Малахов²⁾, Г. И. Орлова¹⁾, Н. Г. Пересадько¹⁾, Н. Г. Полухина¹⁾,
 П. А. Рукояткин¹⁾, В. В. Русакова¹⁾, Н. А. Салманова¹⁾, Б. Б. Симонов⁴⁾,
 М. М. Чернявский¹⁾, М. Хайдук⁵⁾, С. П. Харламов¹⁾, Л. Юст⁶⁾

Сотрудничество БЕККЕРЕЛЬ

Поступила в редакцию 26.03.2003 г.

Представлены новые результаты по топологиям фрагментации релятивистских ядер ${}^7\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$. Предложена программа исследования кластерной структуры в стабильных и радиоактивных ядрах. Обсуждается использование эмульсий для изучения явлений ядерной кластеризации в процессах фрагментации легких ядер с энергиями свыше 1 А ГэВ.

Прогресс в исследованиях на пучках релятивистских ядер открывает новые подходы к решению актуальных проблем структуры ядра. Одной из таких проблем является изучение коллективных степеней свободы в возбужденных ядрах, в которых отдельные группы нуклонов ведут себя как составляющие кластеры. Указанная структурная особенность — кластеризация в возбужденных ядрах — особенно отчетливо проявляется в легких ядрах, где возможное число кластерных конфигураций относительно невелико. Естественными компонентами такой картины являются малонуклонные системы, не имеющие собственных возбужденных состояний. Прежде всего это α -частицы, а также дейтроны, тритоны, ядра ${}^3\text{He}$ и, кроме того, парные состояния протонов и нейтронов. Возможно, что изучение процессов фрагментации стабильных и радиоактивных ядер на кластерные фрагменты при релятивистских энер-

гиях выявит новые особенности их возникновения и роль в процессах нуклеосинтеза.

Использование в обсуждаемой проблеме ядерных пучков с энергией свыше 1 А ГэВ опирается на установленное явление предельной фрагментации ядер. В данном случае оно означает независимость изотопного состава фрагментов налетающего ядра от типа ядра мишени. Это дает основание для использования ядерной эмульсии — достаточно сложного по составу материала — в качестве мишени и детектора релятивистских продуктов фрагментации. К достоинствам эмульсионной методики относится отсутствие энергетического порога на детектирование процесса фрагментации. Эмульсии обеспечивают наблюдение многочастичных процессов релятивистской фрагментации, позволяющее установить наиболее вероятные зарядовые каналы таких процессов. Измерение углов многократного рассеяния дает возможность установить полный импульс релятивистских фрагментов водорода и гелия и тем самым определить их массу. В сочетании с рекордным угловым разрешением использование эмульсий позволяет реконструировать инвариантную массу (энергию возбуждения) фрагментирующей системы.

Наиболее выигрышными для исследования кластеризации являются взаимодействия релятивистских ядер, происходящие при минимальном взаимном возбуждении сталкивающихся ядер без образования заряженных мезонов. При этом достигается четкое разделение по импульсу продуктов фрагментации ядер снаряда и мишени. Основным

¹⁾ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва (ФИАН).

²⁾ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия (ОИЯИ).

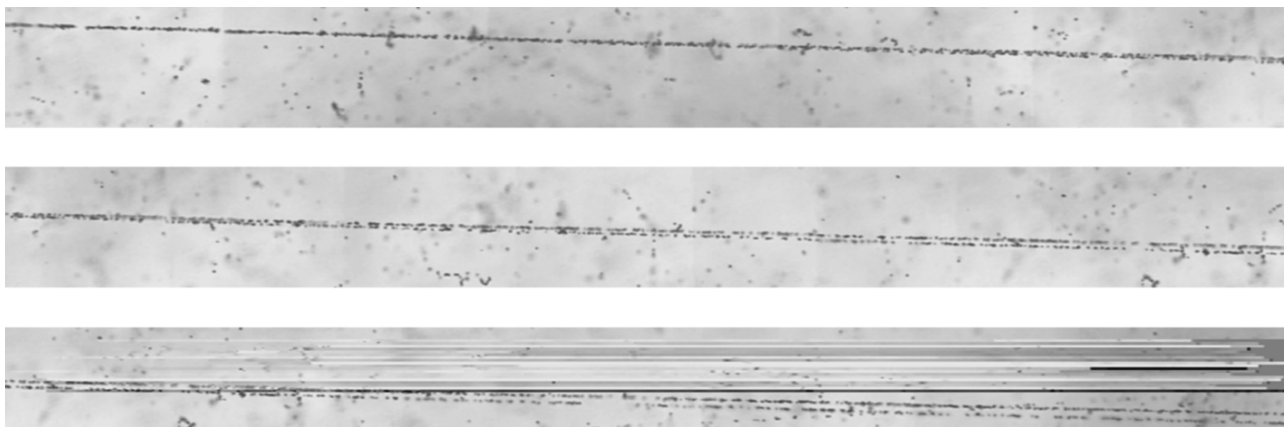
³⁾ Университет имени П. Шафарика, Кошице, Словакия.

⁴⁾ Петербургский институт ядерной физики РАН, Гатчина (ПИЯФ).

⁵⁾ Институт космических исследований, Магурель-Бухарест, Румыния.

⁶⁾ Институт экспериментальной физики САН, Кошице, Словакия.

*E-mail: zarubin@lhe.jinr.ru



Событие когерентной диссоциации ядра ^{10}B в трехзарядный (выше) и двухзарядный (ниже) фрагменты на трех последовательных участках треков. Трехмерный образ события реконструирован как плоская проекция с помощью автоматического микроскопа ФИАН комплекса ПАВИКОМ.

критерием для отбора таких событий является требование сохранения электрического заряда и массового числа налетающего ядра в узком угловом конусе фрагментации. Выполнение данного условия ведет к резкому снижению средней множественности фрагментации ядра мишени.

Эти соображения стали основой нашей экспериментальной программы (проект БЕККЕРЕЛЬ [1]), нацеленной на систематическое исследование каналов фрагментации стабильных и радиоактивных ядер на пучках нуклотрона ОИЯИ с помощью эмульсионной методики. Исследования кластерной фрагментации ядер ^6Li (α - d) [2–5], ^{12}C (3α) [6–9] и ^{16}O (4α) [10], выполненные методом эмульсий, служат ориентиром для нашего проекта. Далее обсуждаются результаты, полученные при изучении кластерной структуры ядер ^{10}B и ^7Li . Эти результаты создают основу для развития исследований кластеризации в легких нейтронно-дефицитных ядрах и более тяжелых, стабильных.

Кластеризация ядра ^{10}B . На нуклотроне ОИЯИ были ускорены ядра ^{10}B и сформирован пучок с энергией 1 А ГэВ. В сформированном пучке проведено облучение стопок ядерной фотоэмульсии типа БР-2 (состоящей из слоев толщиной 550 мкм и размером 10×20 см²) с чувствительностью вплоть до однозарядных релятивистских частиц. При облучении слои эмульсии располагались параллельно направлению пучка. Поиск ядро-ядерных взаимодействий проводился прослеживанием следов пучковых частиц на микроскопах при увеличении $\times 900$. На длине 138.1 м прослеженных следов найдено 960 неупругих взаимодействий ядер ^{10}B . Средний свободный пробег ядер ^{10}B до неупругого взаимодействия в эмульсии равен 14.4 ± 0.5 см. Это значение согласуется с зависимостью среднего свободного пробега от

атомного номера ядра-снаряда для легких ядер, имеющих однородную нуклонную плотность.

Получена информация о зарядовом составе заряженных фрагментов и о каналах фрагментации ядра ^{10}B в периферических взаимодействиях. К таким взаимодействиям отнесены события, в которых суммарный заряд релятивистских фрагментов равен заряду начального ядра ^{10}B , не наблюдается образования заряженных мезонов и возможно образование медленных фрагментов ядер эмульсии. Для выделения этих событий оценивались величины зарядов релятивистских частиц (в основном это заряды 1 и 2), имеющих углы вылета менее 15° относительно направления ядра ^{10}B . При энергии первичного пучка 1 А ГэВ такое значение угла соответствует поперечному импульсу протона 0.44 ГэВ/с. Методом измерения многократного рассеяния оценивалась масса однозарядных фрагментов.

Число найденных событий с суммарным зарядом фрагментов, равным 5, в которых не наблюдается заряженных мезонов, равно 93 (10% от всех событий); в 41 событии не наблюдается фрагментов от развала ядра мишени. Как показал анализ, наличие (или отсутствие) фрагментации ядра-мишени практически не сказывается на распределении по заряду фрагментов налетающего ядра.

В 65% периферических взаимодействий распад ядра ^{10}B происходит на две двухзарядные и одну однозарядную частицы, из них в 40% однозарядной частицей является дейтрон. В 10% событий содержатся одновременно фрагменты с зарядами, равными 3 и 2 (изотопы Li и He). Образование ядра ^6Li в сопровождении α -частицы можно рассматривать как уже установленную корреляцию α -частичного

и дейтронного кластеров. В 2% событий содержатся фрагменты с зарядами, равными 4 и 1 (ядро ${}^9\text{Be}$ и протон). На фотографии представлен пример двухчастичного распада на литиевый и гелиевый фрагменты. Канал фрагментации, содержащий один двухзарядный и три однозарядных фрагмента (развал одного из α -кластеров), составляет 15%.

Соотношение каналов $(2\text{He} + d)/(2\text{He} + p) \approx 1$ находит аналогию с фрагментацией ядра ${}^6\text{Li}$, где $(\text{He} + d)/(\text{He} + p) \approx 1$, указывая на обильный выход дейтронов и в этом случае [2, 3]. На дейтронную кластеризацию также указывает малое значение среднего поперечного импульса дейтронов $\langle P_t^d \rangle = 0.14 \pm 0.01$ ГэВ/с в этих событиях, как и в случае фрагментации ядра ${}^6\text{Li}$, где $\langle P_t^d \rangle = 0.13 \pm 0.02$ ГэВ/с.

Отметим, что ядро ${}^{10}\text{B}$, как и дейтрон, и ядра ${}^6\text{Li}$ и ${}^{14}\text{N}$, принадлежит к редкому классу нечетно-нечетных стабильных ядер. Поэтому представляет интерес установить наличие дейтронной кластеризации при фрагментации релятивистского ядра ${}^{14}\text{N}$.

Кластеризация ядра ${}^7\text{Li}$. В ядерной фотоэмульсии, облученной в пучке ядер ${}^7\text{Li}$ с импульсом 3 А ГэВ/с на синхрофазотроне ОИЯИ, на длине 185 м прослеженных следов найдено 1274 неупругих взаимодействия ядер ${}^7\text{Li}$. Средний свободный пробег ядер ${}^7\text{Li}$ до неупругого взаимодействия в фотоэмульсии равен 14.5 ± 0.4 см и в пределах ошибок совпадает со значением среднего свободного пробега ядер ${}^6\text{Li}$ [2, 3]. Близкие значения средних свободных пробегов и полных поперечных сечений неупругих взаимодействий ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ указывают на близкие по величине эффективные радиусы взаимодействия.

Около 7% от всех неупругих взаимодействий ядер ${}^7\text{Li}$ составляют периферические взаимодействия (92 события), которые содержат только заряженные фрагменты релятивистского ядра, не содержат каких-либо других вторичных заряженных частиц и в которых суммарный заряд фрагментов равен заряду фрагментирующего ядра. Из них 80 событий — это двухчастичные распады ядра ${}^7\text{Li}$ на один двухзарядный и один однозарядный фрагменты. Определение массы релятивистских фрагментов показало, что половина из этих событий представляют собой распад ядра ${}^7\text{Li}$ на α -частицу и тритон (40 событий). Число распадов на α -частицу, дейтрон и нейтрон — 30%, а на α -частицу, протон и два нейтрона — 20%. Изотопный состав распадных частиц указывает на то, что эти события связаны со структурой в виде кластеров α -частицы и тритона. Преобладание тритонов в изотопном составе

однозарядных фрагментов наглядно демонстрирует доминирующее влияние тритонного кластера при фрагментации ядра ${}^7\text{Li}$ в крайне периферических взаимодействиях с ядрами фотоэмульсии.

Ранее в неупругих периферических взаимодействиях ядер ${}^6\text{Li}$ с импульсом 4.5 А ГэВ/с в фотоэмульсии были зарегистрированы аналогичные двухчастичные распады ядра ${}^6\text{Li}$ на α -частицу и дейтрон, отражающие слабосвязанную двухкластерную структуру ядра. Таким образом, структура в виде α -частичного остова и связанных в кластер внешних нуклонов характерна не только для ядра ${}^6\text{Li}$, но и для ядра ${}^7\text{Li}$. Полученное значение сечения когерентного распада ${}^7\text{Li}$ на α -частицу и тритон (27 ± 4 мбн) оказалось примерно таким же, как и сечение по данным работы [2] для распада ядер ${}^6\text{Li}$ на α -частицу и дейтрон (22 ± 4 мбн). Это можно рассматривать, как указание на то, что механизмы рассматриваемых распадов имеют одну природу.

Представляет интерес продолжить поиск возможной роли тритонов как кластерных элементов в диссоциации ядер ${}^{11}\text{B}$, ${}^{15}\text{N}$ и ${}^{19}\text{F}$.

Кластеризация с участием ядра ${}^4\text{He}$. В рамках этих исследований мы возобновили анализ облучения эмульсий ядрами ${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{32}\text{S}$ при импульсе 4.5 А ГэВ/с. Планируется осуществить поиск и исследование фрагментации данных ядер путем наблюдения конечных состояний, содержащих несколько α -частиц. Основной интерес представляет поиск состояний, интерпретируемых как ядерные молекулы. Наш подход поможет сделать выбор определением этого резонанса как связанной конфигурации нескольких α -частиц и резонансом, возникающим только в ядерном рассеянии. Можно надеяться, что применимость картины α -частичной кластеризации в ядрах, объединенной с периферической кластеризацией на основе дейтронов, тритонов, ${}^3\text{He}$ и нуклонных пар, будет расширяться. Дальнейшее наблюдение процессов релятивистской многочастичной фрагментации обеспечивает экспериментальную основу для кластерных моделей легких ядер.

Кластеризация с участием ядра ${}^3\text{He}$. Ядро ${}^3\text{He}$ является естественным элементом кластерной картины возбуждения легких ядер с дефицитом нейтронов, таких, как ${}^6\text{Be}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^9\text{C}$, ${}^{10}\text{C}$, ${}^{11}\text{C}$, ${}^{12}\text{N}$, и более тяжелых. Если заменить α -частичные кластеры в ядрах ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$ на ядра ${}^3\text{He}$, то можно получить аналогичные кластерные состояния. В этом подходе ядро ${}^6\text{Be}$ является слабосвязанным ${}^3\text{He}$ — ${}^3\text{He}$ -резонансным состоянием, близким по свойствам к α - α -системе в ядре ${}^8\text{Be}$.

По аналогии с ядром ${}^9\text{Be}$ в ядре ${}^7\text{Be}$ возможны возбуждения n - ${}^6\text{Be}$, ${}^3\text{He}$ - n - ${}^3\text{He}$, в дополнение к

состоянию α - ^3He . В случае ядра ^8B , в дополнение к состояниям p - ^7Be , p - α - ^3He , возможно кластерное возбуждение ^3He - d - ^3He . Представляет интерес выявить состояние ^3He - ^3He - ^3He в ядре ^9C как аналогию α - α - α -кластеризации в ядре ^{12}C и сравнить интенсивность его возбуждения с вариантами p - ^8B , p - p - α - ^3He .

Упомянем другие интересные состояния, такие как pp - α - α и α - ^3He - ^3He в ядре ^{10}C , α - α - ^3He в ядре ^{11}C и α - ^8B в ядре ^{12}N . Существование таких ядерно-молекулярных квантовых состояний может указать на альтернативные сценарии нуклеосинтеза легких ядер через промежуточные радиоактивные смеси водорода и гелия на основе реакций слияния, включая одновременное слияние нескольких частиц из промежуточного связанного состояния.

Как первый шаг в этом направлении мы выполнили облучение эмульсий на нуклотроне ОИЯИ во вторичном пучке, содержащем значительную долю ядер ^7Be . Пучок был сформирован путем настройки магнитооптического канала для оптимального отбора продуктов реакции перезарядки ускоренных ядер ^7Li в ^7Be . Сечение этой реакции составляет порядка 10^{-4} от неупругого сечения. В настоящее время ведется анализ результатов облучения.

Мы рассчитываем, что реакции перезарядки позволят нам сформировать вторичные пучки путем перезарядки $^{10}\text{B} \rightarrow ^{10}\text{C}$, $^{11}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{C}$, $^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}$. Пучок ^8B предполагается сформировать посредством реакции фрагментации $^{10}\text{B} \rightarrow ^8\text{B}$. На основе наблюдения двух событий рассеяния ядра бора, сопровождаемых большой отдачей фрагментов мишени, вероятность получения пучка ^8B при энергии нуклотрона оценивается нами на уровне 10^{-3} неупругого сечения. Этот метод формирования пучка требует тщательной проверки путем спектрометрических измерений. Самым проблематичным представляется облучение на ядрах ^9C , где

неустрашимым фоном являются сопровождающие ядра ^3He , обладающие той же магнитной жесткостью.

Нам представляется, что использование эмульсий на пучках релятивистских радиоактивных ядер в области легких нейтронно-дефицитных изотопов наиболее оправданно. Благодаря особенно полной наблюдаемости по заряду конечных состояний могут быть установлены наиболее значимые каналы распада возбужденных ядер. Для них может быть выполнен анализ массовых и угловых спектров, исследованы корреляции и оценены характерные энергии возбуждения.

Эта работа была поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований № 96-15-96423 (научная школа академика А.М. Балдина) и 02-02-164 12а, грантом Агентства науки Министерства образования Словацкой республики и Словацкой академии наук VEGA 1/9036/02, грантами Полномочных представителей Словакии и Румынии в 2002 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Bradnova *et al.*, Few-Body Systems Suppl. **14**, 241 (2003).
2. M. I. Adamovich *et al.*, Phys. At. Nucl. **62**, 1378 (1999).
3. F. G. Lepekhn, D. M. Seliverstov, and B. B. Simonov, JETP Lett. **59**, 332 (1994).
4. F. G. Lepekhn, D. M. Seliverstov, and B. B. Simonov, Phys. At. Nucl. **58**, 816 (1995).
5. F. G. Lepekhn, D. M. Seliverstov, and B. B. Simonov, Eur. Phys. J. A **1**, 137 (1998).
6. V. V. Belaga *et al.*, Phys. At. Nucl. **58**, 1905 (1995).
7. V. V. Belaga *et al.*, Nucl. Tracks Radiat. Meas. **25**, 271 (1995).
8. V. V. Belaga, M. M. Muminov, and G. M. Chernov, JETP Lett. **62**, 395 (1995).
9. V. V. Belaga, G. M. Chernov, and M. M. Muminov, Jr., Phys. At. Nucl. **60**, 791 (1997).
10. N. P. Andreeva *et al.* (Collab.), Phys. At. Nucl. **59**, 102 (1996).

Investigation of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Processes

M. I. Adamovich, V. Bradnova, S. Vokal, S. G. Gerasimov, V. A. Dronov, P. I. Zarubin, A. D. Kovalenko, K. A. Kotel'nikov, V. A. Krasnov, V. G. Larionova, F. G. Lepekhn, A. I. Malakhov, G. I. Orlova, N. G. Peresadko, N. G. Polukhina, P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, N. A. Salmanova, B. B. Simonov, M. M. Chernyavsky, M. Haiduc, S. P. Kharlamov, L. Just

The use of emulsions for studying nuclear clustering in light nucleus fragmentation processes at energies higher than 1 A GeV is discussed. New results on the topologies of relativistic ^7Li and ^{10}B nucleus fragmentation are given. A program of research of the cluster structure in stable and radioactive nuclei is suggested.