

КОГЕРЕНТНАЯ ДИССОЦИАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ^{12}N

© 2013 г. Р. Р. Каттабеков^{1),2)}, К. З. Маматкулов^{1),3)}, С. С. Аликулов³⁾,
Д. А. Артеменков¹⁾, Р. Н. Бекмирзаев³⁾, В. Браднава¹⁾, П. И. Зарубин^{1)*},
И. Г. Зарубина¹⁾, Н. В. Кондратьева¹⁾, Н. К. Корнегруца¹⁾, Д. О. Кривенков¹⁾,
А. И. Малахов¹⁾, К. Олимов²⁾, Н. Г. Пересадько⁴⁾, Н. Г. Полухина⁴⁾,
П. А. Рукояткин¹⁾, В. В. Русакова¹⁾, Р. Станоева^{1),5)}, С. П. Харламов⁴⁾

Поступила в редакцию 21.03.2013 г.

Изучена диссоциация релятивистских ядер ^{12}N с импульсом 2 А ГэВ/с при наиболее периферических взаимодействиях в ядерной эмульсии. Представлена картина зарядовой топологии образующихся ансамблей релятивистских фрагментов и особенности их угловых распределений.

DOI: 10.7868/S0044002713100103

Метод ядерной эмульсии сохраняет исключительное положение в отношении исследования структуры фрагментации релятивистских ядер благодаря полноте наблюдения ансамблей фрагментов при рекордном пространственном разрешении. Цель использования ядерной эмульсии в проекте БЕККЕРЕЛЬ [1] на нуклотроне ОИЯИ состоит в исследовании кластеризации нуклонов для доступного разнообразия легких ядер, включая радиоактивные. Наибольшая полнота анализа достигается для событий когерентной диссоциации без образования фрагментов ядер мишени и мезонов [2], кратко именуемых “белыми” звездами. Из-за минимальности возмущения во взаимодействиях такого типа проявляется конфигурационное перекрытие основных состояний изучаемых ядер и наблюдаемых ансамблей фрагментов и нуклонов. На этой основе возникают возможности своего рода “томографии” ядерной структуры. Распределение “белых” звезд по вероятности образования тех или иных конфигураций проявляет корреляцию с весами соответствующих кластерных компонент исследуемых ядер. На этом пути возможно обнаружение вклада неизученных и даже неожиданных компонент глубокосвязанных кластерных состояний. Эти утверждения в особой степени справедливы для легких ядер с избытком

протонов. Предметом настоящего исследования является картина кластеризации нуклонов в малоизученном радиоактивном ядре ^{12}N , наблюдаемая в событиях когерентной диссоциации на ядрах из состава эмульсии. Данное исследование является очередным шагом изучения кластерной структуры радиоактивных ядер ^7Be [3], ^8B [4] и ^9C [5]. Ядерно-астрофизическая роль ядра ^{12}N состоит в том, что оно продолжает последовательность этих ядер в реакциях подхвата протонов при нуклеосинтезе и обеспечивает альтернативный сценарий синтеза изотопа ^{12}C . Таким образом, структура этих ядер может проявлять генетическую связь, что определяет привлекательность изучения их в едином подходе.

Для “белых” звезд ^{12}N можно ожидать в распределениях по заряду фрагментов Z_{fr} лидирования каналов $^{11}\text{C} + p$ (порог 0.6 МэВ), $^8\text{B} + ^4\text{He}$ (порог 8 МэВ) и $p + ^7\text{Be} + ^4\text{He}$, а также каналов, связанных с кластерной диссоциацией ядра-основы ^7Be . Особенностью когерентной диссоциации ядра ^{12}N , в отличие от более легких ядер на границе протонной стабильности, может стать вклад распадов несвязанных ядер $^8\text{Be}_{\text{g.s}}$ и $^9\text{B}_{\text{g.s}}$. В частности, порог канала $^3\text{He} + ^9\text{B}_{\text{g.s}}$ составляет 10 МэВ. Небольшая разница в энергии связи по сравнению с каналами, содержащими фрагменты с $Z_{\text{fr}} > 2$, ведет к предположению о возможной двойственности ядра ^{12}N . С одной стороны, его основа может быть представлена связанными ядрами ^7Be и ^8B , а с другой — несвязанными $^8\text{Be}_{\text{g.s}}$ и $^9\text{B}_{\text{g.s}}$.

Ядерная эмульсия облучалась в смешанном пучке релятивистских ядер ^{12}N , ^{10}C и ^7Be с импульсом $p_0 = 2$ А ГэВ/с, сформированном при

¹⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

²⁾Физико-технический институт АН Республики Узбекистан, Ташкент.

³⁾Джизакский педагогический институт, Республика Узбекистан.

⁴⁾Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва.

⁵⁾Юго-западный университет, Благоевград, Болгария.

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

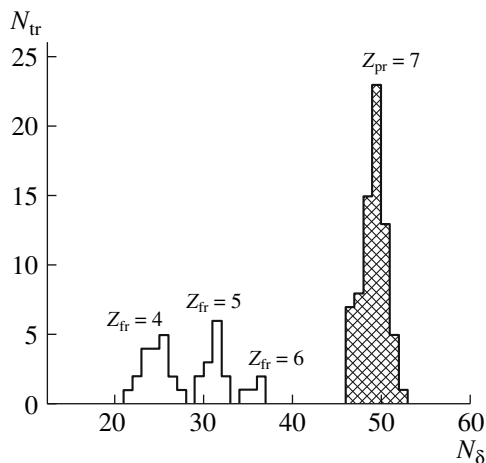


Рис. 1. Распределения числа пучковых частиц (заштрихованная гистограмма) и вторичных фрагментов N_{tr} по среднему числу δ -электронов $\langle N_\delta \rangle$ в “белых” звездах, удовлетворяющих условию $Z_{pr} = 7$ и $\sum Z_{fr} = 7$.

перезарядке и фрагментации первичных ядер ^{12}C [6]. Облучаемая стопка содержала 15 слоев ядерной эмульсии БР-2, обладающей чувствительностью вплоть до релятивистских частиц. Каждый слой имел размеры 10×20 см и толщину около 0.5 мм. При облучении пучок направлялся параллельно плоскости стопки вдоль длинной стороны с возможно большей однородностью заполнения входного окна стопки. Анализ зарядовой топологии когерентной диссоциации этих ядер подтвердил доминирование в пучке изотопов ^7Be и ^{10}C и присутствие ядер ^{12}N [7]. Выбор перезарядки для генерации ядер ^{12}N оправдан из-за удобства идентификации следов, оставленных в эмульсии ядрами пучка. В то же время этот выбор резко ограничил статистику взаимодействий ядер ^{12}N .

Настоящий анализ основывается на просмотре без выборки в 12 слоях облученной эмульсии по следам первичных частиц с зарядами Z_{pr} , визуально оцениваемыми как $Z_{pr} > 2$, на длине около 1088 м. Найдено 7241 неупругое взаимодействие, в том числе 608 “белых” звезд, содержащих только релятивистские фрагменты в угловом конусе до $\theta_{fr} < 11^\circ$. В “белых” звездах, которые могли бы быть созданными ядрами ^{12}N , выполнены измерения средних значений плотности δ -электронов N_δ на следах пучковых ядер и вторичных фрагментов с $Z_{fr} > 2$. Заряды $Z_{fr} = 1, 2$ релятивистских частиц надежно определяются визуально.

Как было показано при изучении ядер ^8B [4] и ^9C [5], применение условия сохранения заряда налетающего ядра релятивистскими фрагментами $Z_{pr} = \sum Z_{fr}$ позволяет устранить вклад от

перезарядки более легких сопровождающих ядер. Доминирование в данном облучении ядер углерода сделало такой отбор особенно актуальным и оправдало применение трудоемкой процедуры счета δ -электронов. Распределение в этих событиях числа следов N_{tr} частиц пучка с идентифицированным зарядом $Z_{pr} = 7$ и вторичных фрагментов с идентифицированными зарядами Z_{fr} по измеренной плотности δ -электронов на 1 мм длины N_δ представлено на рис. 1. Средние значения $\langle N_\delta \rangle$ и RMS, приведенные в табл. 1, указывают на надежную зарядовую классификацию следов. Измерение величин N_δ позволило отобрать 72 “белые” звезды, удовлетворяющие условию $Z_{pr} = 7$ и $\sum Z_{fr} = 7$.

Несомненный интерес представляла бы идентификация фрагментов H и He по их полным импульсам $p\beta c$, выполняемая в ядерной эмульсии методом измерения многократного рассеяния. Однако из-за углового разброса следов и их большого числа провести такие измерения оказывается возможным только в весьма ограниченном объеме. Они выполнены для случайной выборки фрагментов из конфигураций $2\text{He} + 3\text{H}$ и $3\text{He} + \text{H}$ (рис. 2). Для фрагментов H распределение $p\beta c_H$ имеет среднее значение $\langle p\beta c_H \rangle = 1.9 \pm 0.1$ ГэВ при $\text{RMS} = 0.2$ ГэВ, что соответствует значениям, ожидавшимся для протонов. Для фрагментов He имеются две компоненты $p\beta c_{He}$ со средними значениями $\langle p\beta c_{He} \rangle = 5.2 \pm 0.1$ ГэВ при $\text{RMS} = 0.4$ ГэВ и $\langle p\beta c_{He} \rangle = 7.2 \pm 0.1$ ГэВ при $\text{RMS} = 0.3$ ГэВ, ожидаемыми для релятивистских изотопов ^3He и ^4He . Распределение указывает на примерно равное соотношение изотопов ^3He и ^4He , что ожидалось для ядра ^{12}N .

Идентификация следов по заряду позволяет восстановить зарядовую топологию “белых” звезд, созданных ядрами ^{12}N (табл. 2). На основе этих данных вклад ядер ^{12}N в пучок оценивается на уровне 14% (без учета ядер H и He). Согласно накопленной статистике “белых” звезд, созданных ядрами ^{10}C и ^7Be , вклад этих изотопов составляет примерно по 43%. Для изотопов с $Z_{fr} > 2$ по Z_{fr}

Таблица 1. Средние значения $\langle N_\delta \rangle$ и RMS числа δ -электронов на 1 мм длины (в скобках приведено число измеренных следов N_{tr})

Канал	$\langle N_\delta \rangle$	RMS
Be (19)	24.0 ± 0.4	1.5 ± 0.3
B (13)	30.6 ± 0.3	0.9 ± 0.2
C (4)	35.3 ± 0.4	0.8 ± 0.3
N (72)	48.6 ± 0.2	1.4 ± 0.1

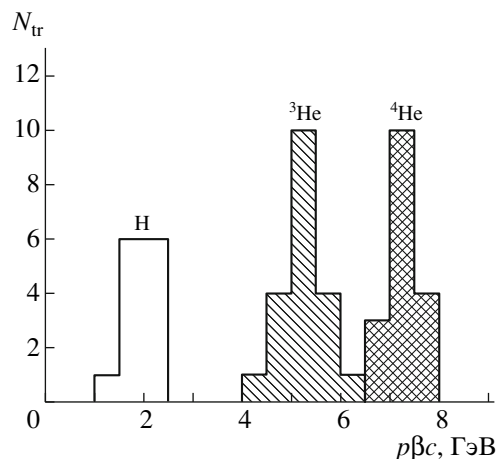


Рис. 2. Распределение измеренных величин $p\beta c$ из конфигураций $2\text{He} + 3\text{H}$ и $3\text{He} + \text{H}$ для фрагментов H (светлая гистограмма) и He (заштрихованные гистограммы).

определяется и массовое число A_{fr} . Для дальнейшего отбора событий когерентной диссоциации, содержащих только фрагменты ядер ^{12}N (не “участников” взаимодействия), условие на угловой конус было ужесточено до $\theta_{\text{fr}} < 6^\circ$. Эта величина определяется “мягким” ограничением на импульс ферми-движения нуклонов. В распределении 45 отобранных событий (табл. 2) доля каналов с тяжелыми фрагментами $Z_{\text{fr}} > 2$ достигает примерно $2/3$, и вклад каналов, содержащих только легкие фрагменты He и H, остается достаточно значительным. Неожиданно значительной оказалась статистика в канале $2\text{He} + 3\text{H}$. Исходя из факта прибли-

Таблица 2. Распределение числа “белых” звезд (N_{ws}) по каналам диссоциации с суммарным зарядом фрагментов $\sum Z_{\text{fr}} = 7$ и измеренным зарядом пучкового следа $Z_{\text{pr}} = 7$

Канал	N_{ws}	
	$\theta_{\text{fr}} < 11^\circ$	$\theta_{\text{fr}} < 6^\circ$
He + 5H	9	2
2He + 3H	24	12
3He + H	2	2
$^7\text{Be} + 3\text{H}$	10	5
$^7\text{Be} + \text{He} + \text{H}$	9	8
$^8\text{B} + 2\text{H}$	11	9
$^8\text{B} + \text{He}$	3	3
C + H	4	4
Σ	72	45

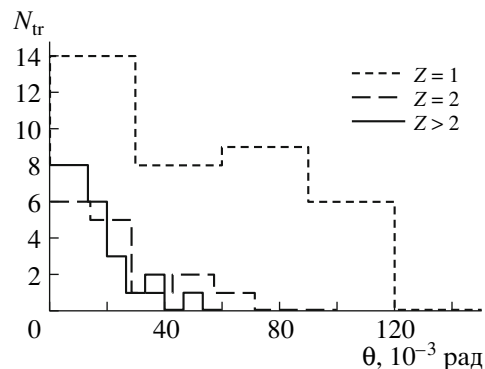


Рис. 3. Распределение фрагментов когерентной диссоциации ядер ^{12}N с зарядами Z по полярному углу вылета θ в событиях с фрагментами $Z_{\text{fr}} > 2$.

зительного равенства вероятности каналов $2\text{He} + \text{He} + 2\text{H}$ при диссоциации ядра ^7Be [3], а также основы ^7Be в ядрах ^8B [4] и ^9C [5], следовало бы ожидать для ядра ^{12}N приблизительного равенства вероятностей каналов $2\text{He} + 3\text{H}$ и $3\text{He} + \text{H}$.

Рассмотрим результаты измерения углов образования фрагментов θ в 45 “белых” звездах, ограниченных конусом фрагментации $\theta_{\text{fr}} < 6^\circ$. В качестве примера на рис. 3 приведен результат измерения полярных углов θ всех фрагментов в событиях с фрагментами $Z_{\text{fr}} > 2$. Средние значения и величины RMS распределений фрагментов $Z_{\text{fr}} > 2$ по полярному углу θ представлены в табл. 3. Измерения углов θ позволяют оценивать поперечные импульсы фрагментов p_T и их суммы согласно приближению $P_T \approx A_{\text{fr}} P_0 \sin \theta$.

В частности, можно оценить средний поперечный импульс в событиях $\text{C} + \text{H}$, которые интерпретируются как $^{11}\text{C} + p$. Порог схожего канала $^{10}\text{C} + d$ значительно выше и составляет 11.5 МэВ. Среднее значение $\langle P_T(^{11}\text{C} + p) \rangle = 300 \pm 52 \text{ МэВ}/c$ при $\text{RMS} = 104 \pm 37 \text{ МэВ}/c$ указывает на ядерно-дифракционный характер диссоциации [8] и наличие эффекта “отскока” (bounce off). Вероятность

Таблица 3. Средние значения и величины RMS распределений фрагментов $Z_{\text{fr}} > 2$ по полярному углу θ (в ед. 10^{-3} рад)

Канал	$\langle \theta_{Z>2} \rangle$	RMS
$^7\text{Be} + 3\text{H}$	33 ± 14	31 ± 10
$^7\text{Be} + \text{He} + \text{H}$	19 ± 4	13 ± 3
$^8\text{B} + 2\text{H}$	20 ± 3	10 ± 2
$^8\text{B} + \text{He}$	7 ± 1	3 ± 1
$^{11}\text{C} + p$	17 ± 3	6 ± 2

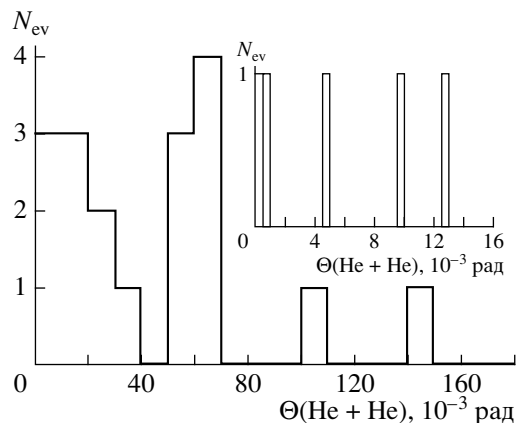


Рис. 4. Распределение по углам разлета $\Theta(\text{He} + \text{He})$ пар фрагментов He для “белых” звезд $2\text{He} + 3\text{H}$ и $3\text{He} + \text{H}$; на вставке — увеличенное распределение $\Theta(\text{He} + \text{He})$ в области наименьших значений.

канала $^{11}\text{C} + p$ составила $(9 \pm 5)\%$. Такое значение близко к вероятности $^9\text{C} \rightarrow ^8\text{B} + p$ [5], и оно заметно отличается от случая ядра ^8B [4], для которого канал с отделением слабосвязанного протона $^7\text{Be} + p$ составил $(50 \pm 12)\%$.

Существенным вопросом является вклад распадов из основного состояния нестабильного ядра $^8\text{Be}_{g.s}$ в образование фрагментов $Z_{\text{fr}} = 2$ (табл. 2). Благодаря предельно малой энергии распада $^8\text{Be}_{g.s}$ удается обойти проблему идентификации релятивистских изотопов He. При импульсе 2 А ГэВ/с распады релятивистских ядер $^8\text{Be}_{g.s} \rightarrow 2\alpha$ идентифицируются по принадлежности пар α -частиц к области наименьших углов разлета $\Theta_{2\alpha}$, ограниченной условием $\Theta_{2\alpha} < 10.5 \times 10^{-3}$ рад [4]. Кроме того, были идентифицированы распады ядра ^8Be из первого возбужденного состояния 2^+ по углам разлета в области $15 \times 10^{-3} < \Theta_{2\alpha} < 45 \times 10^{-3}$ рад [9–12]. При изучении диссоциации релятивистских ядер ^{10}C выполнена идентификация распадов ядер $^8\text{Be}_{g.s}$ и $^9\text{Be}_{g.s}$ [10–12].

В случае ядра ^{12}N в распределении по углам разлета $\Theta(\text{He} + \text{He})$ для “белых” звезд $2\text{He} + 3\text{H}$ и $3\text{He} + \text{H}$ найдены два кандидата на распад ядра ^8Be из основного состояния 0^+ , имеющие угол разлета $< 10.5 \times 10^{-3}$ рад (рис. 4). На этой основе вклад ядер ^8Be оценивается на уровне $(4 \pm 2)\%$. Для соседних ядер ^{12}C [2], ^{10}C [10–12], ^{10}B [13] и ^{14}N [14] он составлял порядка 20%.

Статистика в области $\Theta(\text{He} + \text{He}) < 10.5 \times 10^{-3}$ рад не исключает возможности диссоциации по каналу 2He через распад ядра ^8Be 2^+ из первого возбужденного состояния 2^+ . Однако

использованный для основного состояния 0^+ отбор узких пар следов уже не применим. В данном диапазоне $\Theta(\text{He} + \text{He})$ должна присутствовать примесь ядер ^3He , что особенно актуально в случае нейтронодефицитного ядра ^{12}N . К сожалению, требуемый уровень идентификации релятивистских изотопов He остается недостижимым.

В настоящем облучении изучена зарядовая топология диссоциации ядра ^{12}N , что позволяет охарактеризовать его особенности. Прежде всего, отсутствуют явно выраженные каналы-лидеры, на что указывает достаточно равномерное “рассыпание” статистики по возможным каналам. В отличие от соседних ядер ^{12}C [2], ^{10}C [7] и ^{14}N [14], в диссоциации ядер ^{12}N происходит интенсивное образование фрагментов $Z_{\text{fr}} > 3$. Поэтому роль основы ^{12}N может быть приписана ядру ^7Be . При поиске аналогии с ядром ^9C путем замены одного из внешних протонов в системе $2p + ^7\text{Be}$ на α -кластер возникает следующее затруднение. Вероятность каналов, для которых требуется расщепление α -кластера в ядре ^{12}N , примерно совпадает с вероятностями каналов, которые можно ассоциировать только с отделением α -кластера. По-видимому, “простая” картина ядра ^{12}N как структуры $p + ^7\text{Be} + ^4\text{He}$ является недостаточной. Скорее, кластерная структура ядра ^{12}N предстает как сложная смесь состояний ядра-основы ^7Be и возможных конфигураций протонов и легчайших ядер.

Эта работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 12-02-00067, а также грантов полномочных представителей Болгарии и Румынии и в ОИЯИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The BECQUEREL Project, <http://becquerel.jinr.ru/>
2. В. В. Белага и др., ЯФ **58**, 2014 (1995) [Phys. Atom. Nucl. **58**, 1905 (1995)]; arXiv: 1109.0817 [nucl-ex].
3. Н. Г. Пересадько и др., ЯФ **70**, 1266 (2007) [Phys. Atom. Nucl. **70**, 1226 (2007)]; nucl-ex/0605014.
4. Р. Станоева и др., ЯФ **72**, 731 (2009) [Phys. Atom. Nucl. **72**, 690 (2009)]; arXiv: 0906.4220 [nucl-ex].
5. Д. О. Кривенков и др., ЯФ **73**, 2159 (2010) [Phys. Atom. Nucl. **73**, 2103 (2010)]; arXiv: 1104.2439 [nucl-ex].
6. Р. А. Rukoyatkin *et al.*, Eur. Phys. J. ST **162**, 267 (2008).
7. Р. Р. Каттабеков, К. З. Маматкулов, Д. А. Артеменков и др., ЯФ **73**, 2166 (2010) [Phys. Atom. Nucl. **73**, 2110 (2010)]; arXiv: 1104.5320 [nucl-ex].
8. Н. Г. Пересадько, В. Н. Фетисов, Ю. А. Александров и др., Письма в ЖЭТФ **88**, 83 (2008) [JETP Lett. **88**, 75 (2008)]; arXiv: 1110.2881 [nucl-ex].
9. Д. А. Артеменков и др., ЯФ **70**, 1261 (2007) [Phys. Atom. Nucl. **70**, 1222 (2007)]; nucl-ex/0605018.

10. D. A. Artemenkov *et al.*, Few-Body Syst. **44**, 273 (2008).
11. D. A. Artemenkov *et al.*, Few-Body Syst. **50**, 259 (2011); arXiv: 1105.2374 [nucl-ex].
12. D. A. Artemenkov *et al.*, Int. J. Mod. Phys. E **20**, 993 (2011); arXiv: 1106.1748 [nucl-ex].
13. Ф. Г. Лепехин, ЭЧАЯ **36**, 436 (2005) [Phys. Part. Nucl. **36**, 233 (2005)].
14. Т. В. Щедрина и др., ЯФ **70**, 1271 (2007) [Phys. Atom. Nucl. **70**, 1230 (2007)]; nucl-ex/0605022.

COHERENT DISSOCIATION OF RELATIVISTIC ^{12}N NUCLEI

**R. R. Kattabekov, K. Z. Mamatkulov, S. S. Alikulov, D. A. Artemenkov, R. N. Bekmirzaev,
V. Bradnova, P. I. Zarubin, I. G. Zarubina, N. V. Kondratieva, N. K. Kornegrutsa,
D. O. Krivenkov, A. I. Malakhov, K. Olimov, N. G. Peresadko, N. G. Polukhina,
P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, R. Stanoeva, S. P. Kharlamov**

Dissociation of $2 A \text{ GeV}/c$ ^{12}N nuclei for the most peripheral interactions in nuclear track emulsion is studied. The pattern of charge topology of produced ensembles of relativistic fragments and peculiarities of their angular distributions are presented.