

ПЕРИФЕРИЧЕСКАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ^{11}B В ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

© 2009 г. М. Карабова¹⁾, Д. А. Артеменков²⁾, В. Браднова²⁾, С. Вокал^{1),2)}, А. Вокалова²⁾, Я. Врлакова¹⁾, П. И. Зарубин^{2)*}, И. Г. Зарубина²⁾, А. Д. Коваленко²⁾, А. И. Малахов²⁾, Г. И. Орлова³⁾, П. А. Рукояткин²⁾, В. В. Русакова²⁾, С. П. Харламов³⁾, Т. В. Щедрина²⁾

Поступила в редакцию 21.03.2008 г.

Представлены результаты, полученные в ядерной фотоэмульсии, облученной в пучке ядер ^{11}B с импульсом 2.75 А ГэВ/с. Для изучения кластеризации ядра ^{11}B анализируются периферические взаимодействия, в которых суммарный заряд частиц, вылетающих в пределах переднего конуса релятивистской фрагментации, равен заряду налетающего ядра. Получено, что 3-частичный развал с зарядовой конфигурацией 2 + 2 + 1 является лидирующим. Выявлена существенная роль тритонов в наиболее периферических взаимодействиях такого типа. Впервые наблюдались события, интерпретируемые как перезарядка ядра ^{11}B в возбужденные состояния ядра $^{11}\text{C}^*$, расположенные над порогом нуклонной связи. Обсуждаются перспективы исследования ядра ^{11}C .

PACS: 21.45.+v, 23.60.+e, 25.10.+s

ВВЕДЕНИЕ

Изучение периферических взаимодействий релятивистских ядер ^7Li и ^{11}B в ядерной эмульсии может дать основания для включения тритонов в качестве кластеров при множественной фрагментации ядер, начиная с наиболее легких [1, 2]. Ранее было установлено, что в наиболее периферических событиях диссоциации ядер ^7Li в ядерной эмульсии без образования фрагментов мишени и заряженных мезонов (так называемых белых звездах) доля канала $^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t$ достигает 50% [3]. Таким образом, выявляется роль тритона как нуклонного кластера с наименьшим порогом отделения (2.47 МэВ). Настоящий эксперимент по фрагментации более тяжелого ядра ^{11}B является логическим продолжением исследования ядра ^7Li . Он нацелен на то, чтобы выявить относительную роль каналов с низкими порогами отделения фрагментов, а именно $^7\text{Li} + \alpha$ (8.7 МэВ), $t + 2\alpha$ (11.2 МэВ) и $^{10}\text{Be} + p$ (11.2 МэВ).

ОБЛУЧЕНИЕ ЭМУЛЬСИИ В ПУЧКЕ ЯДЕР ^{11}B

Стопка, состоящая из слоев ядерной фотоэмульсии БР-2, была облучена на нуклотроне ОИЯИ в пучке ядер ^{11}B с импульсом 2.75 А ГэВ/с.

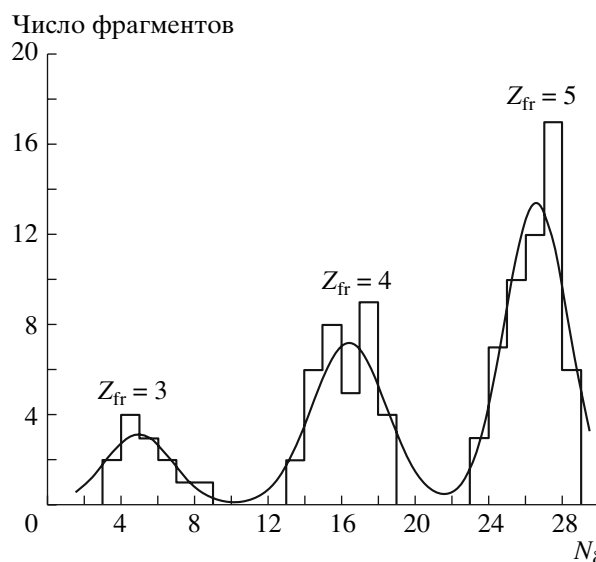


Рис. 1. Распределение релятивистских фрагментов с зарядами $Z_{fr} = 3, 4$ и 5 во взаимодействиях ядер ^{11}B по среднему числу δ -электронов на 100 мкм длины следа. Кривая — результат аппроксимации суммой трех функций Гаусса.

¹⁾ Университет имени П. Й. Шафарика, Кошице, Словакия.

²⁾ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

³⁾ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва.

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

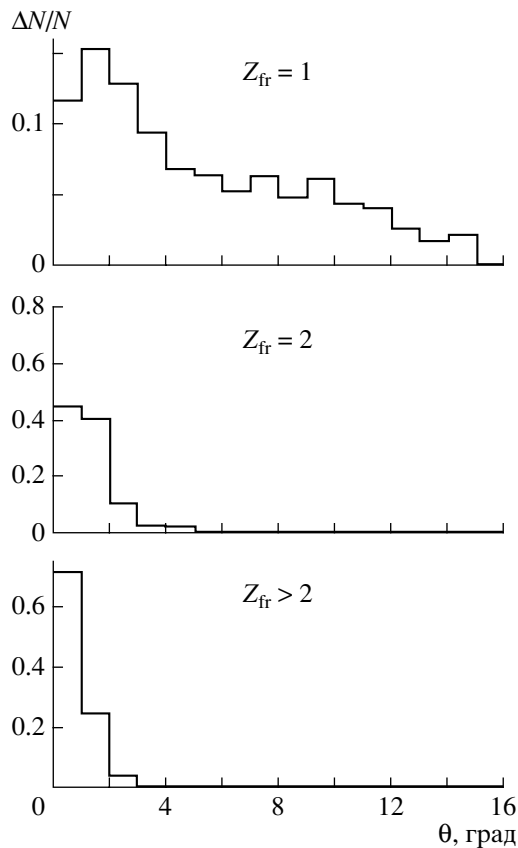


Рис. 2. Распределения релятивистских фрагментов ядер ^{11}B по углам вылета для фрагментов с зарядами $Z_{\text{fr}} = 1, 2, >2$, нормированные на число фрагментов с зарядом Z_{fr} .

Слои эмульсии имели размер 10×20 см и толщину около 600 мкм. При облучении пучок был направлен параллельно плоскости эмульсии вдоль длинной стороны слоев.

Поиск событий проводился методом просмотра

Таблица 1. Распределение числа событий диссоциации ядер ^{11}B по зарядовым состояниям фрагментов $\sum Z_{\text{fr}} = 5$ (N_Z — число фрагментов в событии с зарядом Z_{fr} ; статистика “белых” звезд приведена в скобках)

N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	\sum
1	—	—	—	—	2
—	1	—	—	1	11
—	—	1	1	—	3
—	—	1	—	2	5
—	—	—	1	3	17 (1)
—	—	—	2	1	43 (6)
—	—	—	—	5	0

по первичным следам. На суммарной длине просмотренных следов 7141.5 см было зарегистрировано 542 взаимодействия ядер ^{11}B , что дает значение среднего пробега $\lambda = 13.2 \pm 0.6$ см. Эта величина согласуется с вычислениями по геометрической модели.

Для определения зарядов релятивистских фрагментов, рожденных во взаимодействиях ядер ^{11}B , был использован метод подсчета плотности δ -электронов. Результат его использования для определения зарядов релятивистских фрагментов $Z_{\text{fr}} = 3, 4$ и 5 представлен на рис. 1.

На рис. 2 показаны распределения измеренных углов вылета фрагментов ядер ^{11}B с различными зарядами Z_{fr} . Значения углов для фрагментов с $Z_{\text{fr}} > 2$ ограничены пределом $\theta < 3^\circ$, для двухзарядных фрагментов ($Z_{\text{fr}} = 2$) — $< 5^\circ$. Для однозарядных частиц ($Z_{\text{fr}} = 1$) углы были измерены вплоть до значения $\theta = 15^\circ$. Условие отбора анализируемых релятивистских фрагментов с $Z_{\text{fr}} = 1$ было выбрано $\theta \leq 6^\circ$, что соответствует традиционному определению конуса фрагментации: угловое распределение для $Z_{\text{fr}} = 1$ изменяет свой вид примерно при $\theta = 6^\circ$. Его форма определяется вкладом изотопов $^{1,2,3}\text{H}$ от фрагментации ядер ^{11}B , а также вкладом протонов — участников взаимодействия, и рожденных мезонов — участников взаимодействия, и рожденных мезонов, угловые распределения для которых сильно различаются.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ПРИ ДИССОЦИАЦИИ ^{11}B

Для изучения кластеризации ядра ^{11}B были отобраны периферические взаимодействия, в которых суммарный заряд частиц, вылетающих в пределах переднего конуса фрагментации, равен заряду налетающего ядра, т.е. $\sum Z_{\text{fr}} = 5$. В этих событиях является допустимым рождение частиц с углами вылета $\theta \geq 15^\circ$ и фрагментов мишени. В табл. 1 представлена их статистика, включая “белые” звезды, в различных зарядовых каналах. Можно заключить, что 3-частичный развал с зарядовой конфигурацией $2 + 2 + 1$ лидирует, несмотря на его более высокий порог по сравнению с каналом $\text{Li} + \text{He}$. Схожая картина уже была установлена для ядра ^{10}B [4]. Важную роль в периферической фрагментации этих изотопов бора играет α -частичная кластеризация, как и в случае ядра ^{12}C [5], а также ядер ^6Li [6] и ^7Li [3].

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ФРАГМЕНТОВ ^{11}B

Для изучения основного канала фрагментации $\sum Z_{\text{fr}} = 2 + 2 + 1$ были проведены измерения импульсов $p/\beta c$ однозарядных фрагментов методом

многократного кулоновского рассеяния. Эти измерения позволяют разделять однозарядные фрагменты на протоны, дейтроны и тритоны, так как спектаторные фрагменты ядра-снаряда практически без изменения сохраняют первоначальное значение импульса на нуклон. Данный метод позволил разделить однозарядные фрагменты по их массе (рис. 3).

Измеренные значения импульсов для однозарядных фрагментов ^{11}B удовлетворительно аппроксимируются суммой трех гауссианов, максимумы которых расположены при 2.7, 5.2 и 7.5 ГэВ. Положения максимумов соответствуют значениям, ожидавшимся для спектаторных протонов, дейтронов и тритонов. Область значений $p\beta c$ в районе до 1 ГэВ соответствует рожденным π -мезонам. Отношение между числами протонов, дейтронов и тритонов, образующихся в периферических взаимодействиях ядра ^{11}B , составляет 19 : 9 : 5, а для “белых” звезд — 1 : 1 : 1. Даже на малой статистике можно отметить рост доли дейтронов и тритонов в “белых” звездах по отношению к периферическим взаимодействиям. Большая доля тритонов в “белых” звездах ^{11}B говорит в пользу существования тритона в качестве кластера со слабой связью в ^{11}B , которая легко разрушается во взаимодействии. Эти наблюдения указывают на необходимость дальнейшего накопления статистики в канале $\sum Z_{\text{fr}} = 2 + 2 + 1$ путем ускоренного просмотра по площади эмульсионных слоев.

НАБЛЮДЕНИЕ СОБЫТИЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ $^{11}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{C}^*$

В данном эксперименте наблюдались события, в которых заряд первичного трека был определен как $Z_{\text{пр}} = 5$, а суммарный заряд в конусе фрагментации оказался равным $\sum Z_{\text{fr}} = 6$. Их появление может интерпретироваться как неупругая перезарядка ядра ^{11}B в возбужденные состояния ядра $^{11}\text{C}^*$, расположенные над порогом нуклонной связи. Статистика этих событий представлена в табл. 2.

Было обнаружено 10 событий перезарядки $^{11}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{C}^*$ с развалом на два фрагмента с зарядами $Z_{\text{fr}} = 4$ и 2. Эти события указывают на перезарядку основы в виде кластера ^7Li в ^7Be . Во избежание ошибки заряды на следах в этих событиях определялись несколько раз. Доля таких событий перезарядки составляет $\approx 1.5\%$ от всех найденных при первичном просмотре взаимодействий.

Таблица 2 демонстрирует предпочтительность канала перезарядки $^{11}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{C}^*$ наиболее периферического типа — это восемь “белых” звезд $^{11}\text{B} \rightarrow \text{Be} + \text{He}$. Они идентифицируются как $^7\text{Be} + ^4\text{He}$

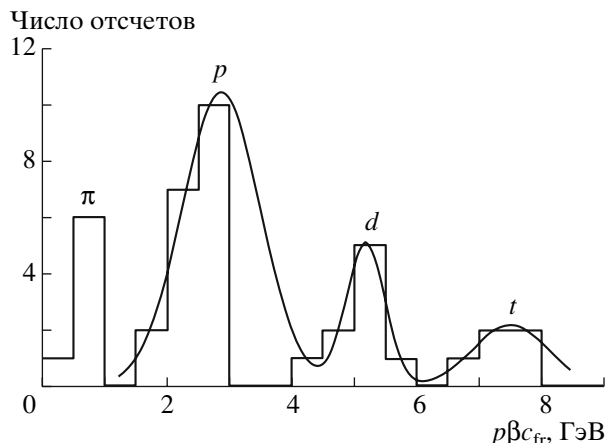


Рис. 3. Распределение релятивистских однозарядных фрагментов ядра ^{11}B по измеренным значениям $p\beta c$. Сплошная кривая соответствует аппроксимации гауссианами по методу наименьших квадратов.

и имеют значение среднего пробега $\lambda_{\text{СЕ}} = 8.9 \pm 3.2$ м. Микрофотография одного из таких событий представлена на рис. 4. Среди “белых” звезд событий перезарядки ядра ^{11}B с диссоциацией ядра по другим каналам не наблюдалось. Даже на такой ограниченной статистике можно отметить очевидное отличие развала ядра ^{11}C от развала ядер ^{10}B и ^{11}B : для ядер ^{10}B и ^{11}B отмечается лидирующее значение 3-частичного канала распада, в то время как для ядра $^{11}\text{C}^*$ доминируют 2-частичные развалы, а 3-частичные не наблюдались на нашей статистике. В основе различия может лежать несколько более высокое значение кулоновского барьера для ядра ^{11}C . Это обстоятельство может указывать на замечательную чувствительность релятивистского механизма диссоциации к структурным особенностям ядер.

На рис. 5 представлено распределение по энергии возбуждения Q для пар релятивистских фрагментов ^4He и ^7Be , образованных в “белых” звездах $^{11}\text{B} \rightarrow ^7\text{Be} + ^4\text{He}$, относительно основного состо-

Таблица 2. Распределение числа событий перезарядки ядер ^{11}B по зарядовым состояниям фрагментов $\sum Z_{\text{fr}} = 6$ (обозначения, как в табл. 1)

N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	Σ
1	—	—	—	1	1
—	1	—	1	—	10 (8)
—	1	—	—	2	7
—	—	1	—	3	2
—	—	—	2	2	3

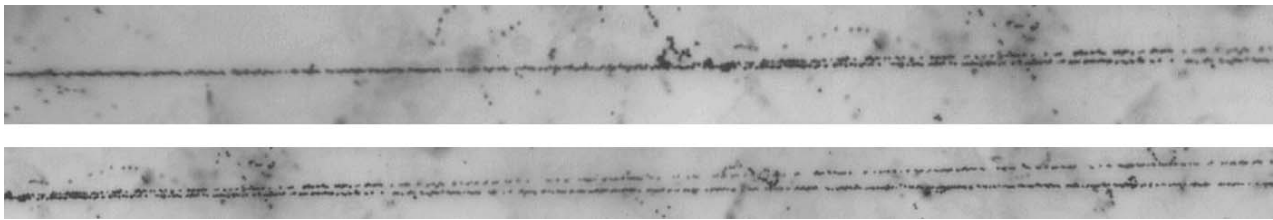


Рис. 4. Микрофотография фрагментации с перезарядкой $^{11}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Be}$. На верхней фотографии видна вершина взаимодействия и образование двух релятивистских фрагментов в узком угловом конусе. При смещении по направлению вылета фрагментов (нижняя фотография) можно различить фрагмент He (верхний след) и фрагмент Be.

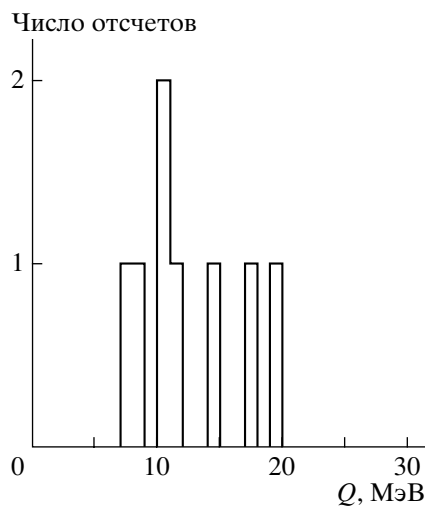


Рис. 5. Распределение по энергии возбуждения Q для пар релятивистских фрагментов ^7Be и ^4He , образованных в “белых” звездах $^{11}\text{B} \rightarrow ^7\text{Be} + ^4\text{He}$, относительно основного состояния ядра ^{11}C .

яния ядра ^{11}C . Величина Q определяется через инвариантную массу системы M^* и массу ядра ^{11}C :

$$Q = M^* - M, \quad M^2 = \left(\sum P_j \right)^2 = \sum (P_i, P_k),$$

где P_j — 4-импульсы фрагментов, определенные в предположении сохранения импульса на нуклон первичного ядра. Величины Q находятся в области низколежащих возбужденных состояний ядра ^{11}C . Средние значения поперечных импульсов фрагментов ^7Be и ^4He в л. с. равны $\langle P_T(^7\text{Be}) \rangle = 185 \pm 27$ МэВ/с и $\langle P_T(^4\text{He}) \rangle = 190 \pm 33$ МэВ/с, а в их с. ц. м. $\langle P_T^*(^7\text{Be}) \rangle = \langle P_T^*(^4\text{He}) \rangle = 145 \pm 21$ МэВ/с. Среднее значение суммарного поперечного импульса пар $^7\text{Be} + ^4\text{He}$ равно $\langle P_T(^{11}\text{C}^*) \rangle = 250 \pm 32$ МэВ/с. Такие кинематические характеристики являются ожидаемыми значениями для процессов дифракционной диссоциации.

Ядро ^{11}C является зеркальным для ^{11}B и имеет весьма схожую структуру возбуждений. Настоящая работа создает основу для изучения реляти-

вистской диссоциации ядра ^{11}C в каналах с низкими порогами отделения нуклонных кластеров — $^7\text{Be} + \alpha$ (7.6 МэВ), $^{10}\text{B} + p$ (8.7 МэВ) и $^3\text{He} + 2\alpha$ (9.2 МэВ). В этом случае ядро ^3He может являться кластером, аналогичным тритону в ядре ^{11}B . В событиях наиболее периферической диссоциации можно будет сравнить влияние кулоновского барьера на картину диссоциации ядра ^{11}C с ядром ^{11}B . Ранее лидирующая роль ядра ^3He уже была установлена в релятивистской диссоциации ядра ^7Be [7], являющегося зеркальным для ^7Li . В этой связи переход к исследованию ядра ^{11}C методом ядерных эмульсий представляется столь же последовательным шагом, как и переход от ядра ^7Li к ^{11}B .

Интерес представляет поиск проявления эффектов нарушения изотопической инвариантности в образовании “белых” звезд релятивистскими ядрами ^{11}B и ^{11}C . Такой анализ может быть осуществлен путем сравнения распределений по заселенности схожих каналов, по их кинематическим характеристикам. Ядерные дифракционные процессы должны приводить к сходству распределений, а электромагнитные взаимодействия могут привести к их различию в важных деталях.

Представленные наблюдения заслуживают более детального изучения на существенно большей статистике событий диссоциации ядер ^{11}B и ^{11}C . В последнем случае возникает необходимость специального облучения эмульсии во вторичном пучке, наилучшим вариантом формирования которого является отбор продуктов перезарядки $^{11}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{C}$.

Эта работа была поддержана грантами Научного агентства Министерства образования Словацкой республики и Словацкой академии наук VEGA № 1/2007/05 и 1/0080/08, грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 04-02-16593, а также грантами Полномочных представителей в ОИЯИ Болгарии, Словацкой республики, Чешской республики и Румынии в 2002–2005 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *The BECQUEREL Project*, <http://becquerel.jinr.ru/>, <http://becquerel.lhe.jinr.ru/>
2. М. И. Адамович и др., ЯФ **68**, 484(2005); nucl-ex/0605015.
3. M. I. Adamovich *et al.*, J. Phys. G **30**, 1479 (2004).
4. М. И. Адамович и др., ЯФ **67**, 533 (2004).
5. В. В. Беллага и др., ЯФ **58**, 2014 (1995).
6. М. И. Адамович и др., ЯФ **62**, 1461 (1999).
7. Н. Г. Пересадько и др., ЯФ **70**, 1266 (2007); nucl-ex/0605014.

**PERIPHERAL FRAGMENTATION OF RELATIVISTIC ^{11}B NUCLEI
IN NUCLEAR TRACK EMULSION**

**M. Karabová, D. A. Artemenkov, V. Bradnova, S. Vokál, A. Vokálová, J. Vrláková,
P. I. Zarubin, I. G. Zarubina, A. D. Kovalenko, A. I. Malakhov, G. I. Orlova, P. A. Rukoyatkin,
V. V. Rusakova, S. P. Kharlamov, T. V. Shchedrina**

Results are presented obtained in nuclear track emulsion, exposed in the beam of ^{11}B nuclei with the momentum of $2.75 \text{ A GeV}/c$. For the study of clustering features of the ^{11}B nucleus peripheral interactions are analyzed in which the total charge of particles emitted within the limits of forward cone of relativistic fragmentation, is equal to the charge of a projectile nucleus. The substantial role of tritons shows up in the most peripheral interactions of such type. For the first time there were observed events interpreted as a charge-exchange of the ^{11}B nucleus in the excited states of the ^{11}C nucleus, located above the threshold of nucleon binding. The prospects of research of the ^{11}C nucleus are discussed.