

## ФРАГМЕНТАЦИЯ ЯДЕР ${}^7\text{Be}$ С ЭНЕРГИЕЙ 1.2 А ГЭВ В ЯДЕРНОЙ ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ ЭМУЛЬСИИ

© 2013 г. Н. К. Корнегруца<sup>1)</sup>, Д. А. Артеменков<sup>1)</sup>, В. Браднова<sup>1)</sup>,  
П. И. Зарубин<sup>1)\*</sup>, И. Г. Зарубина<sup>1)</sup>, Р. Р. Каттабеков<sup>1,2)</sup>, К. З. Маматкулов<sup>1,3)</sup>,  
П. А. Рукояткин<sup>1)</sup>, В. В. Русакова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2)</sup> Физико-технический институт АН РУ, Ташкент, Узбекистан

<sup>3)</sup> Джизакский педагогический институт, Джизак, Узбекистан

Поступила в редакцию 28.08.2013 г.

Представлена зарядовая топология периферической фрагментации ядер  ${}^7\text{Be}$  с энергией 1.2 А ГЭВ в ядерной эмульсии. Детально рассматривается диссоциация ядер  ${}^7\text{Be}$  по каналам  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^2{}^3\text{He} + \text{n}$  и  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$ . Установлено, что в канале  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$  события, относящиеся к каналу  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Be} + \text{n}$  с каскадным распадом  ${}^6\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\text{p}$ , составляют около 27%.

Благодаря возможности полного наблюдения заряженной компоненты продуктов фрагментации слою ядерной эмульсии, продольно облученные в пучке легких релятивистских ядер, обеспечивают широкие возможности для изучения кластерной структуры легких нейтронодефицитных ядер [1–3]. Настоящая работа по изучению диссоциации ядер  ${}^7\text{Be}$  является продолжением цикла исследований, проводимых сотрудничеством БЕККЕРЕЛЬ [1], кластерной структуры легких ядер [1–9]. Ядро  ${}^7\text{Be}$  представляет интерес как источник сведений о конфигурациях  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ ,  ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} + \text{n}$ ,  ${}^6\text{Li} + \text{p}$ ,  ${}^6\text{Be} + \text{n}$ . Кроме того, сведения о фрагментации этого ядра важны для понимания кластерной структуры последующих ядер на границе протонной связи  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^9\text{C}$  и  ${}^{12}\text{N}$ , поскольку в них ядро  ${}^7\text{Be}$  играет роль основы.

Ядерная фотоэмульсия была облучена в смешанном пучке ядер  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{C}$  и  ${}^{12}\text{N}$ , созданном путем сепарации продуктов перезарядки и фрагментации первичных ядер  ${}^{12}\text{C}$  с энергией 1.2 А ГЭВ на нуклотроне ОИЯИ [6]. Поиск событий проводился по первичным следам без выборки. Идентификация заряда ядер пучка и релятивистских фрагментов осуществлялась по визуальным подсчетом плотности  $\delta$ -электронов. В результате средний пробег до взаимодействия ядер  ${}^7\text{Be}$  с ядрами фотоэмульсии в данной работе составил  $14.2 \pm 0.2$  см. В работе [4] пробег ядер  ${}^7\text{Be}$  для фотоэмульсии того же типа составил  $14.0 \pm 0.8$  см.

Просмотр облученных эмульсий и последующая классификация следов позволили получить картину зарядовой топологии периферической фрагментации ядра  ${}^7\text{Be}$ . В табл. 1 приведено распределение по каналам фрагментации 289 событий  $N_{ws}$ , не сопровождавшихся фрагментами мишени (“белые” звезды) и преимущественно относящихся к взаимодействиям на ядрах эмульсии Ag и Br. Для сравнения приведено распределение 380 событий фрагментации  ${}^7\text{Be}$   $N_{fp}$ , сопровождающихся следами фрагментов мишени. Примечательно, что значительная доля найденных событий (около 90%) приходится на каналы  ${}^7\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  и  ${}^7\text{Be} \rightarrow \text{He} + 2\text{H}$ , соответствующие порогам 1.6 МэВ и 9.3 МэВ. Каналу  ${}^7\text{Be} \rightarrow 4\text{H}$  с высоким энергетическим порогом образования (37.6 МэВ) соответствует меньшая вероятность.

Идентификация релятивистских фрагментов He и He по многократному рассеянию стала одной из основных задач исследования. Для автоматизации процесса идентификации была разработана программа-классификатор на основе нейронной сети. В качестве обучающей выборки использовались результаты моделирования в Geant4 прохождения ядер  ${}^7\text{Be}$  с энергией 1.2 А ГЭВ в эмульсии. В табл. 2 приведено распределение событий по каналам  ${}^7\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  на основании результатов классификации фрагментов He. На статистике 174 событий, для которых были проведены все угловые измерения,

\*E-mail: zarubin@ilhe.jinr.ru

**Таблица 1.** Распределение по каналам диссоциации ядер  ${}^7\text{Be}$  для “белых” звезд  $N_{ws}$  и событий с фрагментами мишени или рожденными мезонами  $N_{ff}$

Канал	2He	He + 2H	4H	Li + H
$N_{ws}$	115	157	14	3
$N_{ff}$	154	226	–	–

**Таблица 2.** Распределение идентифицированных событий  $N_{ws}$  и  $N_{ff}$  в каналах фрагментации  ${}^7\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$

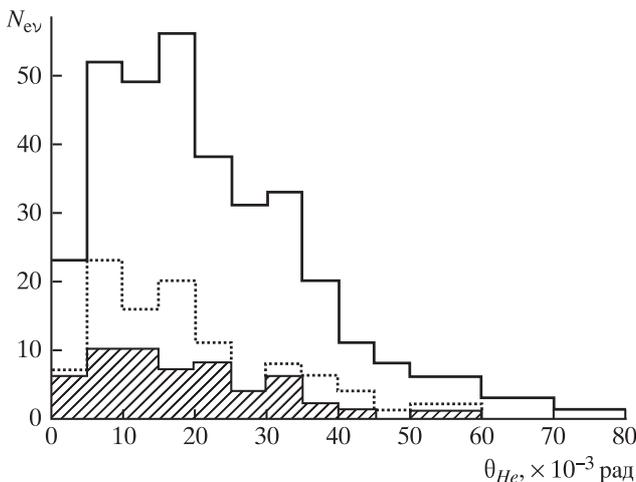
Канал	${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$	${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$
$N_{ws}$	32	14
$N_{ff}$	24	9

только для 79 событий оказалось возможным провести идентификацию полностью. Поскольку идентификация проводилась без какой-либо выборки, то таблица 2 дает представление о соотношении кластерных конфигураций  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  и  $2{}^3\text{He} + n$  в структуре ядра  ${}^7\text{Be}$ . Канал  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  доминирует над каналом  ${}^7\text{Be} \rightarrow 2{}^3\text{He}$ , что свидетельствует о большей вероятности двухкластерной конфигурации в структуре  ${}^7\text{Be}$ , по сравнению с трехчастичной  $2{}^3\text{He} + n$ . Вместе с тем вероятность  $2{}^3\text{He} + n$  значительна и составляет около 30%, что согласуется с ранее полученными данными [4].

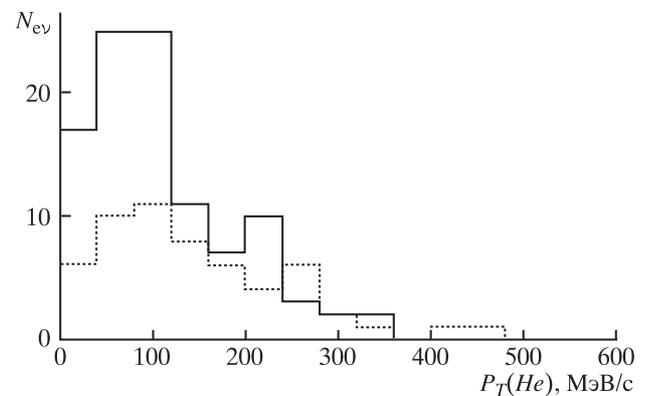
На рис. 1 представлено распределение по полярному углу вылета  $\theta$  фрагментов He всей группы измеренных событий, а также  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$  для полностью идентифицированных событий – пунктирная и штрихованная гистограммы соответственно. Параметры распределений Релея описывающих спектр углов  $\theta$  для  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$  равны  $\sigma_\theta({}^3\text{He}) = (17 \pm 2) \times 10^{-3}$  рад и  $\sigma_\theta({}^4\text{He}) = (16 \pm 2) \times 10^{-3}$  рад. Оценки по статистической модели [10, 11] данных параметров составили  $\sigma_\theta({}^3\text{He}) = 20 \times 10^{-3}$  рад и  $\sigma_\theta({}^4\text{He}) = 15 \times 10^{-3}$  рад. Параметры распределений Релея описывающих спектр поперечных импульсов  $P_T$  в приближении сохранения импульса на нуклон родительского ядра [2–3] для фрагментов  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$  (рис. 2) равны  $\sigma_{PT}({}^3\text{He}) = (97 \pm 7)$  МэВ/с и  $\sigma_{PT}({}^4\text{He}) = (125 \pm 17)$  МэВ/с, соответственно. Значение для  ${}^4\text{He}$  хорошо согласуется со значением статистической модели  $\sigma_{PT}({}^4\text{He}) = 121$  МэВ/с.

Распределение событий каналов  ${}^7\text{Be} \rightarrow 2{}^3\text{He}$  и  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  по энергии возбуждения  $Q$  ( $Q = M^* - M$ ) системы фрагментов, определяемой как разность между инвариантной массой фрагментирующей системы  $M^*$  и суммарной массой фрагментов  $M$ , приведено на рис. 3. Инвариантная масса системы фрагментов  $M^*$  определяется согласно выражению  $M^{*2} = (\sum P_j)^2 = \sum (P_i P_k)$ , где  $P_{i,k}$  – 4-импульсы фрагментов в приближении сохранения импульса на нуклон родительского ядра. Полученные значения  $Q_{2\text{He}}$  для событий канала  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  располагаются в области уровней возбуждения ядра  ${}^7\text{Be}$ .

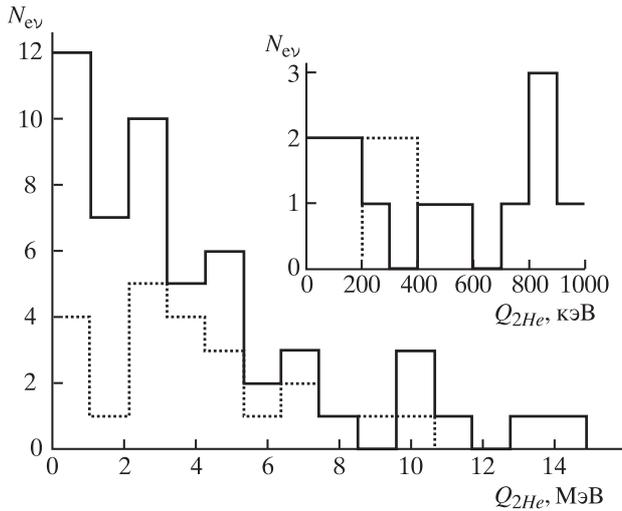
Одна из задач данного эксперимента заключалась в обнаружении событий  ${}^7\text{Be} \rightarrow 2{}^3\text{He}$ , характеризующихся значениями  $Q_{2\text{He}}^3$ , лежащими в области 100–200 кэВ, подобно наблюдаемым в работе [7]. Полученный спектр содержит группу из 4 событий, для которых значения  $Q_{2\text{He}}^3$  расположены в интервале от 200 до 400 кэВ (рис. 3, пунктирная гистограмма на вставке). Эти данные не исключают возможное существование резонансного состояния  $2{}^3\text{He}$ , обсуждавшееся в [7].



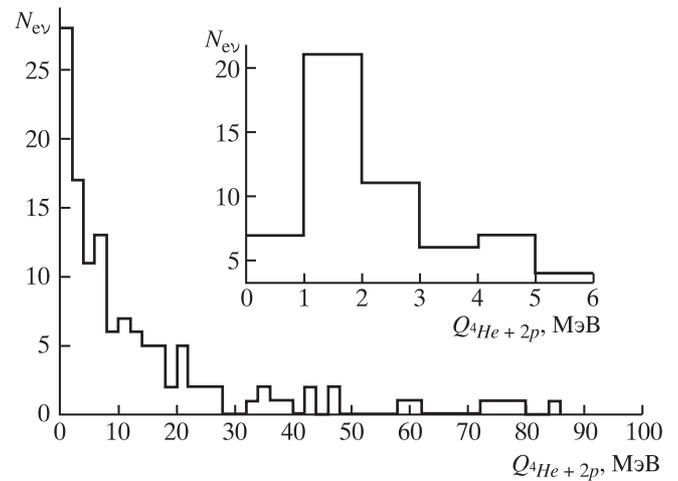
**Рис. 1.** Распределение фрагментов He канала  ${}^7\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  по полярному углу вылета  $\theta$  для всей группы измеренных событий – сплошная линия, для полностью идентифицированных  ${}^3\text{He}$  – пунктирная,  ${}^4\text{He}$  – штрихованная гистограммы



**Рис. 2.** Распределение идентифицированных  ${}^{3,4}\text{He}$  фрагментов канала  ${}^7\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  по величине поперечного импульса  $P_T$  ( ${}^3\text{He}$  – сплошная,  ${}^4\text{He}$  – пунктирная гистограммы)



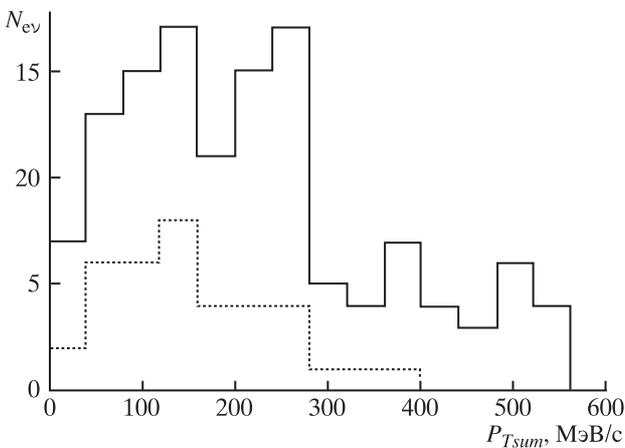
**Рис. 3.** Распределение событий каналов  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  и  ${}^2{}^3\text{He}$  по энергии возбуждения  $Q$  (сплошная и пунктирная линии гистограмм, соответственно). На вставке приведены гистограммы для значений  $Q < 1$  МэВ



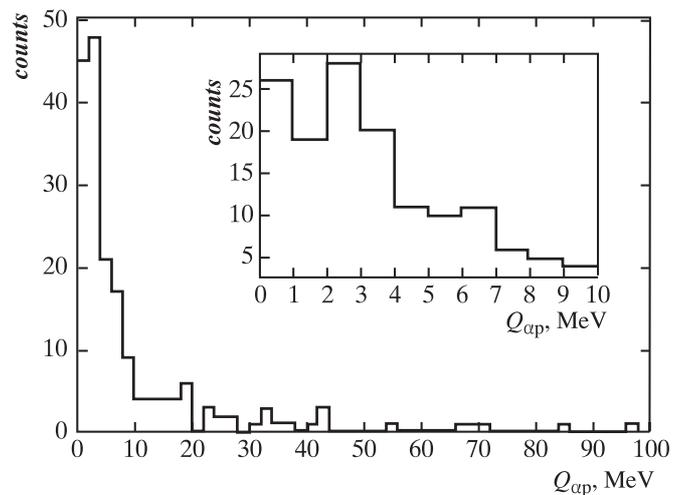
**Рис. 4.** Распределение событий канала  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$  по величине энергии возбуждения  $Q_{4\text{He}+2p}$

Для ядер  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^{10,12}\text{C}$  был установлен значительный вклад каскадной фрагментации с образованием нестабильного ядра  ${}^8\text{Be}$  [2, 3, 8, 9]. В случае изотопа  ${}^7\text{Be}$  возникает возможность каскадной фрагментации  ${}^7\text{Be}$  с образованием нестабильного  ${}^6\text{Be}$  с порогом 1.37 МэВ над  ${}^4\text{He} + 2p$ . На рис. 4 приведено распределение 130 измеренных событий канала фрагментации  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$  по величинам разности инвариантной массы образующихся фрагментов альфа-частицы, двух протонов и суммы их масс  $Q_{4\text{He}+2p}$ . Область  $Q_{4\text{He}+2p} < 6$  МэВ (рис. 4, гистограмма на вставке) указывает на наличие значительной доли ( $\sim 27\%$ ) событий  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$ . Особенностью данной группы событий является более «узкое» распределение по величине суммарного поперечного импульса  $P_{T\text{sum}}({}^4\text{He} + 2p)$  (рис. 5) по сравнению с распределением для всей выборки. Параметр распределения Релея составляет  $\sigma_{PT} = 124 \pm 20$  МэВ/с, что больше расчетного по статистической модели  $\sigma_{PT} = 86$  МэВ/с для  ${}^6\text{Be}$ . Это отличие может быть связано с тем, что в статистической модели не учитывается в полной мере механизм реакции.

Вопрос о вкладе распада  $\alpha + p$  резонанса  ${}^5\text{Li}$  с энергией 1.69 МэВ и шириной 1.5 МэВ имеет самостоятельное значение, поскольку порог образования системы  ${}^5\text{Li} + p$  на 0.35 МэВ выше основного



**Рис. 5.** Распределение событий канала  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$  по величине суммарного поперечного импульса фрагментов  $P_{T\text{sum}}({}^4\text{He} + 2p)$  пунктирная гистограмма соответствует каналу  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$



**Рис. 6.** Распределение событий канала  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + p$  по величине энергии возбуждения  $Q_{4\text{He}+p}$  (события, отнесенные к фрагментации  ${}^6\text{Be}$ , из гистограммы исключены)

состояния  ${}^6\text{Be}$ . Несмотря на отсутствие четкого сигнала из-за комбинаторного усложнения, спектр  $Q_{\alpha p}$  (рис. 6) не противоречит возможному вкладу распадов  $\alpha + p$  резонанса  ${}^5\text{Li}$ .

В заключение перечислим основные результаты данного исследования. Впервые проведено детальное исследование фрагментации ядер  ${}^7\text{Be}$  на ядрах фотоэмульсии. Получены угловые и импульсные спектры образующихся фрагментов. Наиболее вероятными модами в периферической фрагментации являются события, сопровождающиеся образованием  $2\text{He}$  и  $\text{He} + 2\text{H}$ . Для событий с образованием  $2\text{He}$  характерно распределение между каналами  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  и  $2{}^3\text{He}$  в соотношении  $\approx 70\%$  и  $\approx 30\%$ . Требуется дальнейшего наращивания статистики проблема наблюдения резонансного состояния  $2{}^3\text{He}$  в диссоциации  ${}^7\text{Be}$ , указание на наличие получено в случае ядра  ${}^9\text{C}$  [7]. Анализ распределения по величине энергии возбуждения величине  $Q_{4\text{He}+2p}$  указывает на наличие вклада около 27% событий канала  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$  сопровождающейся цепочкой превращений  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$ .

Авторы выражают благодарность С.П. Харламову за обсуждение результатов. Эта работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 12-02-00067, а также грантов полномочных представителей Болгарии и Румынии в ОИЯИ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The BECQUEREL Project, HYPERLINK “<http://becquerel.jinr.ru/>” <http://becquerel.jinr.ru/>.
2. В.В. Белая и др., ЯФ **95**, 1254 (1996).
3. Д.А. Артеменков и др., ЯФ **70**, 1261 (2007) [Phys. Atom. Nucl. **70**, 1222(2007)]; nucl-ex/0605018.
4. Н.Г. Пересадыко и др., ЯФ **70**, 1226 (2007) [Phys. Atom. Nucl. **70**, 1266 (2007)]; nucl-ex/0605014.
5. Р. Станоева и др., ЯФ **72**, 731 (2009) [Phys. Atom. Nucl. **72**, 690 (2009)]; HYPERLINK “<http://arxiv.org/abs/0906.4220v1>” arXiv: 0906.4220.
6. Р.Р. Каттабеков, К.З. Маматкулов и др., ЯФ **73**, 2166 (2010) [Phys. Atom. Nucl. **73**, 2110 (2010)]; arXiv:1104.5320.
7. Д.О. Кривенков и др., ЯФ, **73**, 2159 (2010) [Phys. Atom. Nucl. **73**, 2103 (2010)]; arXiv:1104.2439.
8. D.A. Artemenkov et al., Few Body Syst. **50**, 259 (2011); arXiv:1105.2374.
9. D. A. Artemenkov et al., Int. J. Mod. Phys. E **20**, 993 (2011); arXiv: 1106.1749.
10. H. Feshbach and K. Huang, Phys. Lett. **47B**, 300 (1973).
11. A.S. Goldhaber, Phys. Lett. **53B**, 306 (1974).

## FRAGMENTATION OF ${}^7\text{Be}$ NUCLEI OF ENERGY OF 1.2 A GEV IN NUCLEAR TRACK EMULSION

*N. K. Kornegrutsa, D. A. Artemenkov, V. Bradnova, P. I. Zarubin,  
I. G. Zarubina, R. R. Kattabekov, K. Z. Mamatkulov, K. Olimov,  
P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova*

Charge topology of fragmentation of 1.2 A GeV  ${}^7\text{Be}$  nuclei in nuclear track emulsion is overviewed. The details of  ${}^7\text{Be}$  dissociation via  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ ,  ${}^7\text{Be} \rightarrow 2{}^3\text{He} + n$ ,  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$  are discussed. It is established that among events of the  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$  channel about 25 % of events correspond to cascade process of  ${}^7\text{Be}$  via  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Be} + n$  with subsequent decay of unbound nucleus  ${}^6\text{Be}$  to  $({}^4\text{He} + 2p)$ .