

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

© 2013 г. Н. К. Корнегруца¹⁾, Д. А. Артеменков¹⁾, В. Браднова¹⁾,
П. И. Зарубин^{1)*}, И. Г. Зарубина¹⁾, Р. Р. Каттабеков^{1,2)}, К. З. Маматкулов^{1,3)},
П. А. Рукояткин¹⁾, В. В. Русакова¹⁾

¹⁾ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²⁾ Физико-технический институт АН РУ, Ташкент, Узбекистан

³⁾ 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 слои 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 δ -электронов. В результате средний пробег до взаимодействия ядер ${}^7\text{Be}$ с ядрами фотоэмульсии в данной работе составил 14.2 ± 0.2 см. В работе [4] пробег ядер ${}^7\text{Be}$ для фотоэмульсии того же типа составил 14.0 ± 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 θ 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 θ 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].

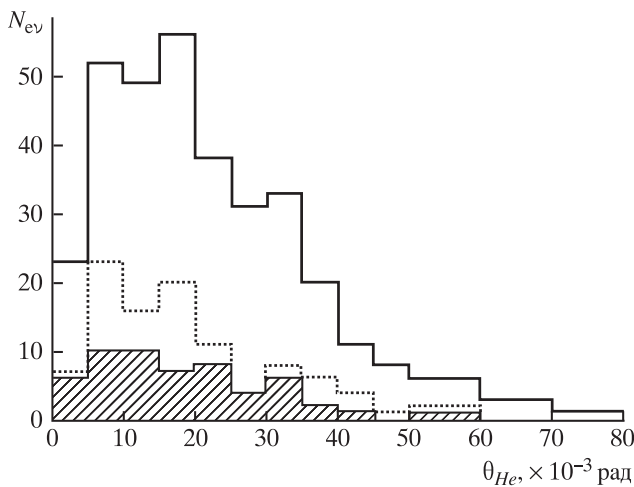


Рис. 1. Распределение фрагментов He канала ${}^7\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ по полярному углу вылета θ для всей группы измеренных событий – сплошная линия, для полностью идентифицированных ${}^3\text{He}$ – пунктирная, ${}^4\text{He}$ – штрихованная гистограммы

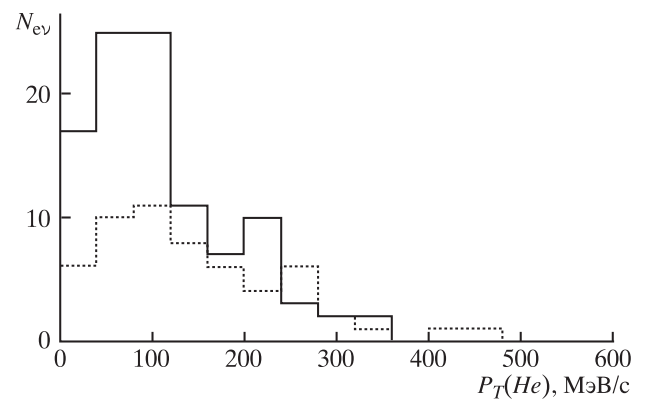


Рис. 2. Распределение идентифицированных ${}^{3,4}\text{He}$ фрагментов канала ${}^7\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ по величине поперечного импульса P_T (${}^3\text{He}$ – сплошная, ${}^4\text{He}$ – пунктирная гистограммы)

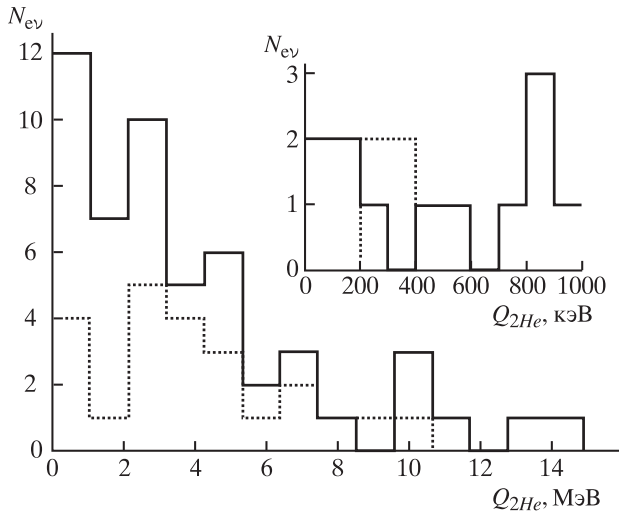


Рис. 3. Распределение событий каналов ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ и ${}^{23}\text{He}$ по энергии возбуждения Q (сплошная и пунктирная линии гистограмм, соответственно). На вставке приведены гистограммы для значений $Q < 1$ МэВ

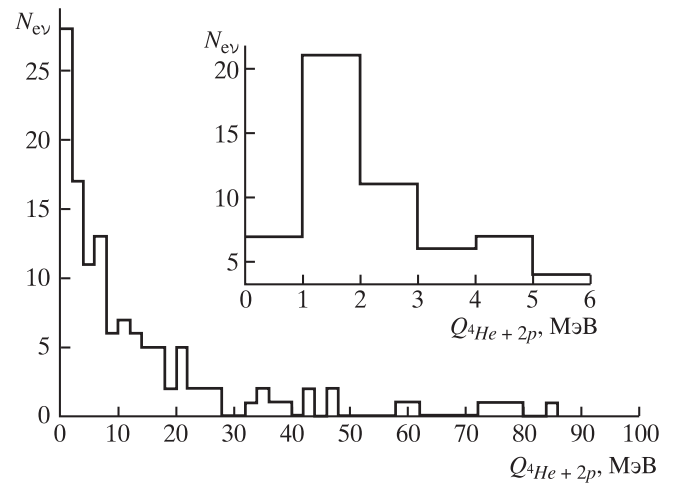


Рис. 4. Распределение событий канала ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$ по величине энергии возбуждения $Q_{4\text{He}+2p}$

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

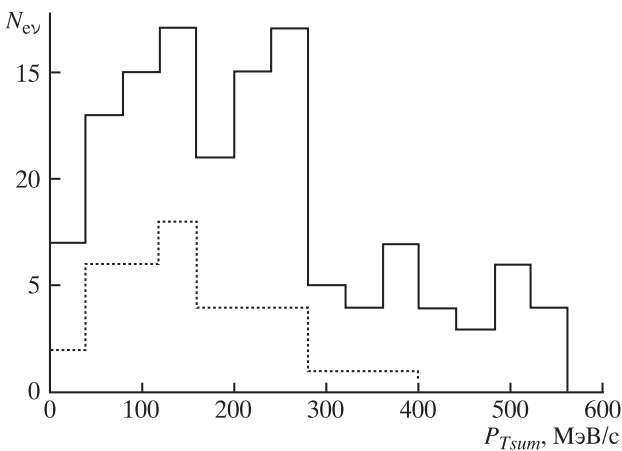


Рис. 5. Распределение событий канала ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$ по величине суммарного поперечного импульса фрагментов $P_{T\text{sum}}({}^4\text{He} + 2p)$ пунктирная гистограмма соответствует каналу ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$

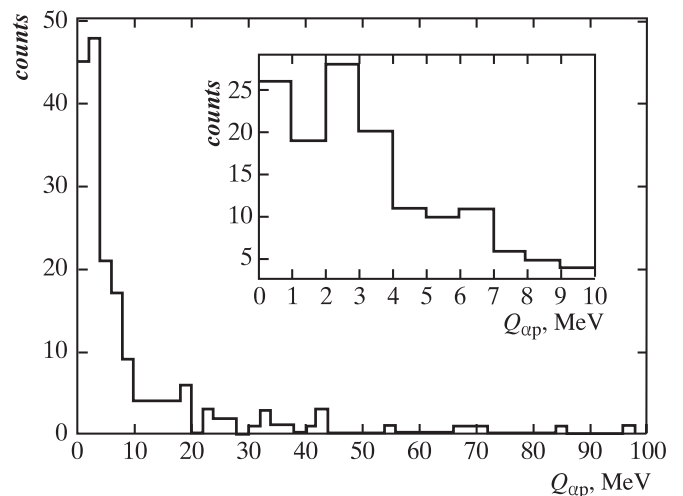


Рис. 6. Распределение событий канала ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + p$ по величине энергии возбуждения $Q_{4\text{He}+p}$ (события, отнесенные к фрагментации ${}^6\text{Be}$, из гистограммы исключены)

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 2He и $\text{He} + 2\text{H}$. Для событий с образованием 2He 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 $({}^4\text{He} + 2p)$.