

## ОСОБЕННОСТИ ФРАГМЕНТАЦИИ ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ В ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ ЭНЕРГИИ 1.2 А ГэВ

© 2007 г. Д. А. Артеменков<sup>1)\*</sup>, В. Браднова<sup>1)</sup>, П. И. Зарубин<sup>1)</sup>, И. Г. Зарубина<sup>1)</sup>,  
Н. А. Качалова<sup>1)</sup>, А. Д. Коваленко<sup>1)</sup>, А. И. Малахов<sup>1)</sup>, Г. И. Орлова<sup>2)</sup>,  
П. А. Рукояткин<sup>1)</sup>, В. В. Русакова<sup>1)</sup>, Е. Стан<sup>1),3)</sup>, Р. Станоева<sup>1)</sup>, М. Хайдук<sup>3)</sup>,  
С. П. Харламов<sup>2)</sup>, И. Цаков<sup>4)</sup>, М. М. Чернявский<sup>2)</sup>, Т. В. Щедрина<sup>1)</sup>

Поступила в редакцию 13.04.2006 г.; после доработки 07.08.2006 г.

Представлены результаты исследований фрагментации релятивистских ядер  ${}^9\text{Be}$  в эмульсии, сопровождающейся образованием двух фрагментов  $\text{He}$  при энергии 1.2 А ГэВ. Анализируются результаты угловых измерений событий  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ . Наблюдается преобладание канала фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be} + n$  с распадом  ${}^8\text{Be}$  из основного ( $0^+$ ) и первого возбужденного ( $2^+$ ) состояний на пару  $\alpha$ -частиц.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Ядро  ${}^9\text{Be}$  представляет собой слабосвязанную ( $n + \alpha + \alpha$ ) систему. Энергетический порог диссоциации канала  ${}^9\text{Be} \rightarrow n + \alpha + \alpha$  составляет 1.57 МэВ. Исследования фрагментации ядра  ${}^9\text{Be}$  представляют интерес для астрофизики, в частности для проблем ядерного синтеза химических элементов с атомным номером  $A > 8$ .

Изучение фрагментации ядер  ${}^9\text{Be}$  при релятивистских энергиях открывает возможность наблюдения фрагментов реакции, являющихся продуктами распада несвязанных ядер  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^5\text{He}$  [1]. Используемая в настоящей работе методика ядерных фотоэмульсий позволяет наблюдать зарядовую компоненту канала релятивистской фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He} + n$ . Благодаря хорошему угловому разрешению метода возможно выделение событий фрагментации  ${}^9\text{Be}$ , сопровождающихся образованием нестабильного ядра  ${}^8\text{Be}$  с последующим его развалом на две  $\alpha$ -частицы. Причем отсутствие комбинаторного фона (трех и более  $\alpha$ -частиц) для  ${}^9\text{Be}$ , характерного для более тяжелых  $N\alpha$ -ядер  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ , позволяет наблюдать

эту картину отчетливо. Выводы настоящей работы могут быть использованы при оценке роли  ${}^8\text{Be}$  в более сложных  $N\alpha$ -системах.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Облучение эмульсий релятивистскими ядрами  ${}^9\text{Be}$  было выполнено на нуклотроне ОИЯИ. Пучок релятивистских ядер  ${}^9\text{Be}$  был получен в реакции фрагментации  ${}^{10}\text{B} \rightarrow {}^9\text{Be}$  на мишени из полиэтилена. Ядра  ${}^9\text{Be}$  составляли примерно 80% пучка, остальные 20% приходились на ядра  $\text{Li}$ ,  $\text{He}$ .

Эмульсионная стопка, используемая при экспозиции, состояла из 15 слоев эмульсии типа БР-2 размерами  $10 \times 20$  см и толщиной 600 мкм. Поиск событий производился просмотром по площади с использованием микроскопа МБИ-9. Найдено около 200 событий фрагментации  ${}^9\text{Be}$ , идущих с образованием двух фрагментов  $\text{He}$  в переднем конусе фрагментации с полярным углом до  $6^\circ$ . Для найденных событий выполнялось требование сохранения заряда фрагментов в конусе фрагментации. Для измеряемых событий допускалось до 5–7 треков различных типов в широком конусе (больше  $6^\circ$ ) с целью увеличения статистики. Заряд треков фрагментов  $\text{He}$  определялся визуально, так как эмульсионная методика позволяет надежно различать следы релятивистских изотопов  $\text{H}$  и  $\text{He}$ . Пример события фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  в эмульсии представлен на рис. 1 [2]. Данное событие относится к классу “белых звезд”, так как не содержит фрагментов ядра-мишени и рожденных мезонов.

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

<sup>2)</sup>Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва.

<sup>3)</sup>Институт космических исследований, Магурель-Бухарест, Румыния.

<sup>4)</sup>Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София.

\*E-mail: artemenkov@ihe.jinr.ru



Рис. 1. Фрагментации релятивистского ядра  ${}^9\text{Be}$  на два фрагмента  $\text{He}$  в эмульсии ("белая звезда"). Фотография получена на измерительном комплексе ПАВИКОМ ФИАН.

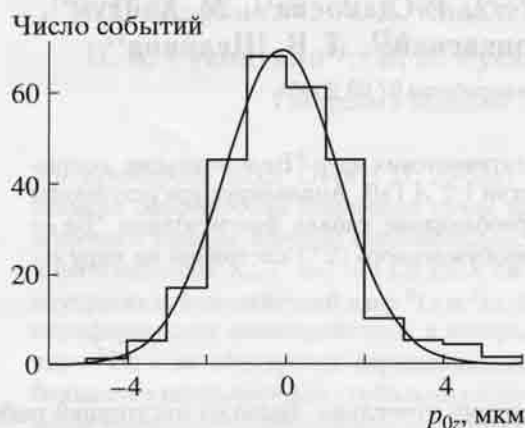


Рис. 2. Распределение коэффициентов  $p_{0z}$  в зависимости координат  $z(x)$  для треков фрагментов  $\text{He}$ .

Измерение углов треков в эмульсии для найденных событий осуществлялось на микроскопе КСМ-1. Измерялись координаты десяти точек на треке первичного ядра и десяти точек на каждом из треков фрагментов. Шаг при выборке точек составлял 100 мкм при общей длине трека, используемой для измерения, 1 мм. В предположении линейной зависимости между координатами точек трека по методу наименьших квадратов находились коэффициенты  $p_0$  и  $p_1$  аппроксимирующего полинома первой степени зависимостей координат  $z(x)$  и  $y(x)$ . По найденным коэффициентам вычислялись углы. К настоящему времени угловые измерения проведены для 131 события фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ .

Оценка точности измерения для углов вылета фрагментов  $\text{He}$  получена из распределения коэффициентов  $p_{0z}$  для  $z(x) = p_{0z} + p_{1z}x$  в эксперименте. Координаты предполагаемой точки взаимодействия (вершины) в этом случае полагаются равными нулю. Величина  $p_{0z}$  (рис. 2) показывает расхождение между измеренной и рассчитанной координатами  $z$  вершины события. При этом координата  $z$  измеряется наименее точно, что обусловлено особенностями обработки эмульсионных слоев и погрешностями измерений. Например, при

обработке толщина эмульсионного слоя в среднем уменьшается вдвое, а ошибка измерения  $z$ -координат зависит от точности фокусировки на следе. При длине трека, используемой при измерениях, в 1 мм точность измерения получена не хуже  $4.5 \times 10^{-3}$  рад. При пересчете в поперечные импульсы  $\alpha$ -частицы это составляет примерно 34 МэВ/с (см. ниже формулу (1)).

Парный угол  $\Theta$  разлета двух фрагментов  $\text{He}$  измерялся как угол между направлением одного из треков по отношению к направлению другого. Данный способ позволяет определить парный угол с большой точностью, что дает возможность уменьшить влияние искажений в слое в области измерения. Таким образом, в эксперименте среднее значение ошибки измерения парного угла  $\Theta$  составило  $1.3 \times 10^{-3}$  рад, достаточное для выделения событий идущих с образованием  ${}^8\text{Be}$ . Особенностью эксперимента является то, что качество измерения малых углов  $\Theta$  между треками ( $\approx 4-6 \times 10^{-3}$  рад) в эмульсионной методике зависит как от условий обработки, хранения слоев, так и от расположения события в слое. Например, для малых углов  $\Theta$  наблюдается зависимость искажений от взаимной ориентации плоскости эмульсионного слоя и плоскости пары треков. Наибольшие искажения для вышеуказанных углов наблюдаются при перпендикулярном расположении плоскостей, что влияет на вид углового распределения для парного угла  $\Theta$  (см. ниже рис. 4), "прижимая" его к нулю. Данное обстоятельство обусловлено искажениями при измерении  $z$ -координат на микроскопе КСМ-1, диапазоном измеряемых углов и деформациями эмульсионного слоя при химической обработке.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При анализе данных предполагалось, что оба фрагмента  $\text{He}$ , наблюдаемые в канале  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He} + n$ , являются  $\alpha$ -частицами. Данное предположение мотивировано тем, что канал фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + n$  с энергетическим порогом 1.57 МэВ должен доминировать в области малых углов над каналом  ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He} + 2n$ ,

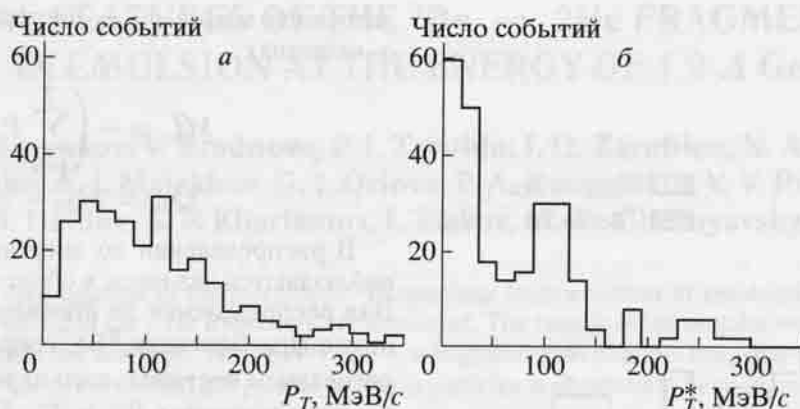


Рис. 3. Распределения по поперечному импульсу  $P_T$   $\alpha$ -частиц в л.с. (а) и по поперечному импульсу  $P_T^*$  в с.ц.м. пары  $\alpha$ -частиц (б).

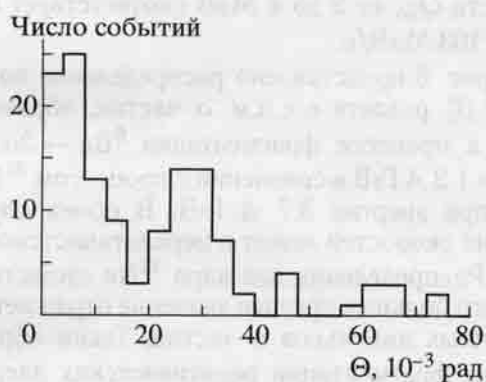


Рис. 4. Распределение по парному углу  $\Theta$  между фрагментами He в реакции фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  при энергии 1.2 А ГэВ.

имеющим энергетический порог 22.15 МэВ. При этом доля  ${}^3\text{He}$  не будет превышать нескольких процентов в этой области углов [3] и все фрагменты He в найденных событиях можно считать  $\alpha$ -частицами.

На рис. 3а представлено распределение  $\alpha$ -частиц по поперечному импульсу  $P_T$  в л.с., вычисляемому без учета потерь энергии частицей в эмульсии (вклад которых относительно невелик) по формуле:

$$P_T = P_0 A \sin \theta, \quad (1)$$

где  $P_0$ ,  $A$  и  $\theta$  — импульс, приходящийся на один нуклон, масса фрагмента и полярный угол вылета соответственно. Среднее значение поперечного импульса в л.с. составило  $\langle P_T \rangle \approx 107$  МэВ/с, а полуширина распределения  $\sigma \approx 71$  МэВ/с. Относительно большое значение величины  $\sigma$  свидетельствует о неоднородности в выборке экспериментальных

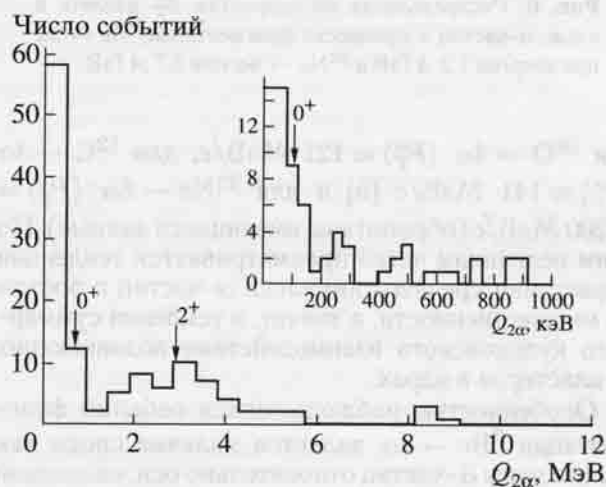


Рис. 5. Распределение по энергии возбуждения  $Q_{2\alpha}$  пар  $\alpha$ -частиц в реакции фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  при энергии 1.2 А ГэВ. На вставке: область  $Q_{2\alpha}$  в интервале от 0 до 1 МэВ. Стрелки указывают на положение уровней  $0^+$  и  $2^+$  ядра  ${}^8\text{Be}$ .

данных, которая проявится при переходе в с.ц.м. двух  $\alpha$ -частиц.

Распределение  $\alpha$ -частиц по поперечному импульсу  $P_T^*$  в с.ц.м. двух  $\alpha$ -частиц:

$$P_{Ti}^* \cong P_{Ti} - \sum_{i=1}^{n_\alpha} P_{Ti} / n_\alpha, \quad (2)$$

где  $P_{Ti}$  — поперечный импульс  $i$ -го  $\alpha$ -фрагмента в л.с. пары  $\alpha$ -частиц, представлено на рис. 3б. Наблюдается группировка событий вокруг двух пиков со значениями  $\langle P_T^* \rangle \approx 24$  и 103 МэВ/с. В работе [4] соответствующие средние значения поперечных импульсов  $\alpha$ -фрагментов составляли:

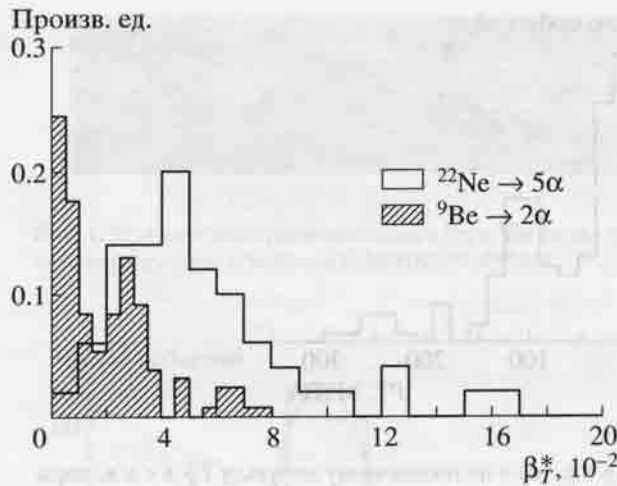


Рис. 6. Распределения по скоростям  $\beta_T^*$  разлета в с.ц.м.  $\alpha$ -частиц в процессах фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  при энергии 1.2 А ГэВ и  ${}^{22}\text{Ne} \rightarrow 5\alpha$  при 3.7 А ГэВ.

для  ${}^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$  ( $\langle P_T^* \rangle \approx 121$  МэВ/с, для  ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  ( $\langle P_T^* \rangle \approx 141$  МэВ/с [5] и для  ${}^{22}\text{Ne} \rightarrow 5\alpha$  ( $\langle P_T^* \rangle \approx 200$  МэВ/с (обработаны имеющиеся данные). По этим величинам четко просматривается тенденция нарастания среднего импульса  $\alpha$ -частиц с ростом их множественности, а значит, и усиления суммарного кулоновского взаимодействия возникающих  $\alpha$ -кластеров в ядрах.

Особенностью наблюдавшихся событий фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  является наличие сноса как целого пары  $\alpha$ -частиц относительно оси, связанной с направлением первичного ядра. Величина среднего значения “недостающего” поперечного импульса для 28 событий типа “белая звезда” составляет  $\langle P_{T\text{miss}} \rangle \approx 137$  МэВ/с. Данный эффект можно объяснить как влиянием “невидимого” в эмульсии нейтрона, так и влиянием ядра отдачи. Канал, сопровождающийся образованием двух фрагментов Ne, с образованием нестабильного ядра  ${}^8\text{Be}$  не является единственно возможным. В частности, в работе [6] обсуждается возможность наблюдения канала  ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^5\text{He} \rightarrow {}^24\text{He} + n$ . В настоящей работе этот канал не рассматривается из-за невозможности наблюдения нейтрона.

В распределении по парному углу  $\Theta$  между Н-фрагментами (рис. 4) также наблюдаются два пика со средними значениями  $4.7 \times 10^{-3}$  и  $27 \times 10^{-3}$  рад. Отношение числа событий в пиках близко к единице.

Производным от распределения по парному углу  $\Theta$  между фрагментами Ne является распределение по энергии возбуждения  $Q_{2\alpha}$  (рис. 5), которая вычислялась как разность эффективной инвариантной массы  $M_{2\alpha}$  пары  $\alpha$ -фрагментов и

удвоенной массы  $m_\alpha$   $\alpha$ -частицы ( $P_\alpha$  – 4-импульс  $\alpha$ -частицы):

$$M_{2\alpha}^2 = - \left( \sum_{i=1}^2 P_{\alpha_i} \right)^2, \\ Q_{2\alpha} = M_{2\alpha} - 2m_\alpha. \quad (3)$$

В распределении по энергии возбуждения  $Q_{2\alpha}$  наблюдаются два пика, в областях 0–1 и 2–4 МэВ. Вид распределения не противоречит предположению о фрагментации  ${}^9\text{Be}$ , сопровождающейся образованием нестабильного ядра  ${}^8\text{Be}$ , распадающегося в состояниях  $0^+$  и  $2^+$ . Положения пиков в распределениях по энергии возбуждения  $Q_{2\alpha}$  и по поперечным импульсам в с.ц.м.  $P_T^*$  взаимосвязаны. Области значений  $Q_{2\alpha}$  от 0 до 1 МэВ с пиком в районе 100 кэВ соответствует пик с  $\langle P_T^* \rangle \approx 24$  МэВ/с, а области  $Q_{2\alpha}$  от 2 до 4 МэВ соответствует пик с  $\langle P_T^* \rangle \approx 103$  МэВ/с.

На рис. 6 представлено распределение по скоростям  $\beta_T^*$  разлета в с.ц.м.  $\alpha$ -частиц, образовавшихся в процессе фрагментации  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\alpha$ , при энергии 1.2 А ГэВ в сравнении с процессом  ${}^{22}\text{Ne} \rightarrow 5\alpha$  при энергии 3.7 А ГэВ. В обоих случаях значения скоростей лежат в нерелятивистской области. Распределение для ядра  ${}^{22}\text{Ne}$  существенно шире, его большее среднее значение отражает рост поперечных импульсов  $\alpha$ -частиц. Таким образом, изучение фрагментации релятивистских ядер  ${}^9\text{Be}$  в эмульсии позволит в дальнейшем использовать полученные данные при анализе угловых распределений более сложных  $N\alpha$ -систем.

Работа была поддержана грантами РФФИ № 96-1596423, 02-02-164-12а, 03-02-16134, 03-02-17079 и 04-02-16593, грантом VEGA № 1/2007/05 Агентства науки Министерства образования Словацкой республики и Словацкой академии наук, а также грантами Полномочных представителей Болгарии, Словакии, Чехии и Румынии в ОИЯИ в 2002–2005 гг.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам ОИЯИ, осуществлявшим поиск событий: А.М. Сосильниковой, И.И. Сосильниковой и Г.В. Стельмах. Особую благодарность выражаем Ф.Г. Лепехину (ПИЯФ) за полезные методические рекомендации по процедуре обработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ф. Г. Лепехин, Б. Б. Симонов, Письма в ЖЭТФ 58, 493 (1993).
2. The BECQUEREL Project, <http://becquerel.jinr.ru/>
3. В. В. Белая и др., ЯФ 59, 869 (1996).
4. Ф. А. Аветян и др., ЯФ 59, 110 (1996).
5. В. В. Белая и др., ЯФ 58, 2014 (1995).
6. В. R. Fulton *et al.*, Phys. Rev. C 70, 047602 (2004).

## SPECIAL FEATURES OF THE ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$ FRAGMENTATION IN EMULSION AT THE ENERGY OF 1.2 A GeV

D. A. Artemenkov, V. Bradnova, P. I. Zarubin, I. G. Zarubina, N. A. Kachalova,  
A. D. Kovalenko, A. I. Malakhov, G. I. Orlova, P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, E. Stan,  
R. Stanoeva, M. Haiduc, S. P. Kharlamov, I. Tsakov, M. M. Chernyavsky, T. V. Shchedrina

The results of investigation of the relativistic  ${}^9\text{Be}$ -nucleus fragmentation in emulsion which entails the production of two 1.2 A GeV He fragments are presented. The results of the angular measurements of the  ${}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He}$  events are analyzed. The  ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be} + n$  fragmentation channel involving the  ${}^8\text{Be}$  decay from the ground ( $0^+$ ) and first excited ( $2^+$ ) states to two  $\alpha$  particles is observed to be predominant.