

КАНАЛЫ ФРАГМЕНТАЦИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР ${}^7\text{Be}$ В ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

© 2007 г. Н. Г. Пересадько¹⁾, Ю. А. Александров¹⁾, В. Браднова²⁾, С. Вокал²⁾, С. Г. Герасимов¹⁾, В. А. Дронов¹⁾, П. И. Зарубин²⁾, И. Г. Зарубина²⁾, А. Д. Коваленко²⁾, В. Г. Ларионова¹⁾, А. И. Малахов²⁾, П. А. Рукояткин²⁾, В. В. Русакова²⁾, С. П. Харламов¹⁾, В. Н. Фетисов¹⁾

Поступила в редакцию 13.04.2006 г.; после доработки 28.08.2006 г.

На нуклотроне ЛВЭ ОИЯИ (г. Дубна) ускорены ядра ${}^7\text{Li}$ и после их перезарядки на внешней мишени сформирован вторичный пучок ядер ${}^7\text{Be}$ с энергией 1.23 ГэВ на нуклон. В пучке ядер ${}^7\text{Be}$ облучены камеры ядерной фотоэмульсии. Средний пробег для неупругих взаимодействий ядер ${}^7\text{Be}$ в фотоэмульсии $\lambda_{\text{inel}}({}^7\text{Be}) = 14.0 \pm 0.8$ см в пределах ошибок совпадает со средними пробегами для неупругих взаимодействий ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. Более 10% неупругих взаимодействий ядер ${}^7\text{Be}$ составляют периферические взаимодействия, в которых сумма зарядов релятивистских фрагментов равна заряду ядра ${}^7\text{Be}$ и не образуются заряженные мезоны. В составе двухзарядных фрагментов ядер ${}^7\text{Be}$ наблюдается необычное для стабильных ядер соотношение изотопов гелия: содержание фрагментов ${}^3\text{He}$ вдвое превышает содержание фрагментов ${}^4\text{He}$. В 50% периферических взаимодействий содержится по два двухзарядных фрагмента. Приводятся каналы фрагментации ядер ${}^7\text{Be}$ на заряженные фрагменты. В 50% взаимодействий фрагментация ядер ${}^7\text{Be}$ происходит только на заряженные фрагменты без испускания нейтронов. Среди них доминирует канал ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$, по 10% составляют каналы ${}^4\text{He} + d + p$ и ${}^6\text{Li} + p$. Зарегистрировано два события без испускания нейтронов в трехчастичных каналах ${}^3\text{He} + t + p$ и ${}^3\text{He} + d + d$. Средний пробег для когерентной диссоциации релятивистских ядер ${}^7\text{Be}$ на ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ равен 7 ± 1 м. Основные особенности фрагментации релятивистских ядер ${}^7\text{Be}$ в таких периферических взаимодействиях объясняются двухкластерной структурой (${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$) ядра ${}^7\text{Be}$.

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

ОБЛУЧЕНИЕ ЭМУЛЬСИЙ В ПУЧКЕ ЯДЕР ${}^7\text{Be}$

Для формирования пучка ядер ${}^7\text{Be}$ на нуклотроне ЛВЭ ОИЯИ ускорялись ядра ${}^7\text{Li}$ до энергии 2.87 З ГэВ. Выведенный из ускорителя пучок ядер ${}^7\text{Li}$ направлялся на мишень из оргстекла. Ядра ${}^7\text{Be}$, образованные в мишени в процессе перезарядки ядер ${}^7\text{Li}$, с помощью магнитных элементов фокусировались и формировались во вторичный пучок. Заряды частиц в сформированном пучке определялись по потерям энергии частиц в сцинтилляционном мониторе. По этим измерениям примесь частиц с зарядом $Z = 3$ в пучке составляет 7% от числа частиц с зарядом $Z = 4$.

В пучке ядер ${}^7\text{Be}$ были облучены фотоэмульсионные камеры, собранные из слоев ядерной фотоэмульсии толщиной 550 мкм и размерами $10 \times$

$\times 20$ см [1]. При облучении слои фотоэмульсии располагались параллельно пучку ядер ${}^7\text{Be}$, длинной стороной вдоль направления пучка так, чтобы пучковые частицы входили в торец слоя фотоэмульсии. В работе использовалась стандартная фотоэмульсия БР-2, в которой визуально легко идентифицировать однозарядные и двухзарядные релятивистские частицы. Треки релятивистских частиц с зарядом больше двух определялись по плотности просветов в следах частиц, что достигалось компьютерным анализом оцифрованного изображения поля зрения на микроскопе с автоматическим слежением по следу. По результатам измерения зарядов частиц в фотоэмульсии доля трехзарядных частиц в пучке составляет примерно 15% от частиц с зарядом, равным четырем. Для поиска взаимодействий ядер ${}^7\text{Be}$ в фотоэмульсии на микроскопе визуально выбирались следы с наибольшей плотностью ионизации.

¹⁾Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва.

²⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

Таблица 1. Средние пробеги ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}$ для неупругих взаимодействий в фотоэмульсии

Ядро	$\lambda_{\text{эсп.}}$, см	$\lambda_{\text{расч.}}$, см	Энергия ядра, ГэВ	Литература
${}^6\text{Li}$	14.1 ± 0.4	16.5–17.2	27	[2–6]
${}^7\text{Li}$	14.3 ± 0.4	16.0–16.3	21	[6, 7]
${}^7\text{Be}$	14.0 ± 0.8	16.0–16.3	8.6	Настоящая работа

СРЕДНИЙ ПРОБЕГ ДЛЯ НЕУПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЯДЕР ${}^7\text{Be}$ В ФОТОЭМУЛЬСИИ

Поиск неупругих ядро-ядерных взаимодействий в слоях фотоэмульсии проводился прослеживанием на микроскопе при 900-кратном увеличении следов пучковых частиц в фотоэмульсии. Для определения среднего свободного пробега λ (${}^7\text{Be}$) неупругих взаимодействий ядер ${}^7\text{Be}$ в фотоэмульсии использован массив из 294 неупругих взаимодействий, зарегистрированных на длине 41.222 м в одной эмульсионной камере. В табл. 1 вместе с результатом, полученным для ядра ${}^7\text{Be}$, приведены значения средних свободных пробегов неупругих взаимодействий ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ в фотоэмульсии, определенные в работах [2–7]. Измеренные значения для всех этих ядер в пределах ошибок практически совпадают. В табл. 1 приводятся также значения, вычисленные по геометрической модели с наборами параметров, использованных в работах [2–7] для описания средних свободных пробегов неупругих взаимодействий в ядерной фотоэмульсии ядер с однородной плотностью. Меньшие экспериментальные значения пробегов относительно вычисленных для всех этих ядер объясняются дополнительным вкладом периферических неупругих взаимодействий ядер, имеющих слабосвязанную кластерную структуру.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ФРАГМЕНТОВ И КАНАЛЫ ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДЕР ${}^7\text{Be}$ В ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ В ЭМУЛЬСИИ

Среди 1400 зарегистрированных неупругих ядро-ядерных взаимодействий содержится более 200 периферических взаимодействий, в которых суммарный заряд Q релятивистских частиц с углами вылета внутри конуса 15° равен заряду первичного ядра ${}^7\text{Be}$. Примерно в 150 периферических взаимодействиях не наблюдается образования заряженных мезонов. В таких взаимодействиях структурные особенности ядра наиболее сильно

Таблица 2. Зарядовый состав фрагментов в событиях с $Q = 4$

Релятивистские фрагменты	Фрагменты мишени	Число событий
2He	$n_b = 0$	41
	$n_b > 0$	18
He + 2H	$n_b = 0$	42
	$n_b > 0$	33
4H	$n_b = 0$	2
	$n_b = 1$	1
Li + H	$n_b = 0$	9
	$n_b > 1$	3
Всего		149

сказываются на характере фрагментации ядра (в первую очередь, на зарядовом и массовом составе фрагментов). В табл. 2 приведена зарядовая топология таких событий. Отмечены отдельно числа событий, не содержащих фрагментов мишени ($n_b = 0$), и событий, содержащих один или несколько фрагментов ядра мишени ($n_b > 0$). В половине взаимодействий содержится по два двухзарядных фрагмента, столько же событий содержат по одному гелиевому и по два однозарядных фрагмента. В 10% событий содержится релятивистское ядро Li в сопровождении однозарядного фрагмента. Большая доля событий, представляющих собой диссоциацию ядер ${}^7\text{Be}$ на два гелиевых фрагмента, указывает на высокую вероятность такого типа кластеризации в структуре ядра ${}^7\text{Be}$.

Исследование изотопного состава фрагментов проводилось путем измерения многократного кулоновского рассеяния частиц в фотоэмульсии. Определялись значения $p\beta c$, где p — импульс, а $p\beta c$ — скорость частицы. Были измерены импульсы однозарядных и двухзарядных частиц в 240 взаимодействиях ядер ${}^7\text{Be}$ с ядрами фотоэмульсии. Экспериментальное распределение релятивистских двухзарядных частиц, в зависимости от $p\beta c$ удовлетворительно описывается двумя функциями Гаусса с максимумами при значениях $p\beta c = 4.5$ и 6.3 ГэВ. Относительное содержание ${}^3\text{He}$ - и ${}^4\text{He}$ -фрагментов, оцениваемое по площадям под аппроксимирующими кривыми, составляет 70 и 30%. При взаимодействиях всех других релятивистских ядер, ранее исследованных в фотоэмульсии, содержание ${}^4\text{He}$ превышает содержание ${}^3\text{He}$ -фрагментов. Такое необычное соотношение содержания гелиевых изотопов, наблюдаемое во

Таблица 3. Каналы фрагментации ядер ${}^7\text{Be}$

Каналы фрагментации	2He		He + 2H		4H		Li + H		Суммарное число событий
	$n_b = 0$	$n_b > 0$	$n_b = 0$	$n_b > 0$	$n_b = 0$	$n_b > 0$	$n_b = 0$	$n_b > 0$	
${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	30	11							41
${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$	11	7							18
${}^4\text{He} + 2p$			13	9					22
${}^4\text{He} + d + p$			10	5					15
${}^3\text{He} + 2p$			9	9					18
${}^3\text{He} + d + p$			8	10					18
${}^3\text{He} + 2d$			1						1
${}^3\text{He} + t + p$			1						1
$3p + d$					2				2
$2d + 2p$						1			1
${}^6\text{Li} + p$							9	3	12
Суммарное число событий	41	18	42	33	2	1	9	3	149

взаимодействиях ядер ${}^7\text{Be}$, объясняется двухкластерной структурой ядра ${}^7\text{Be}$, в которой не входящие в α -частичный остов ядра нуклоны образуют кластер ${}^3\text{He}$. Распределение однозарядных релятивистских частиц по величине $p\beta c$ в интервале до $p\beta c = 5$ ГэВ удовлетворительно описывается двумя функциями Гаусса с максимумами при $p\beta c = 1.5$ и 3.2 ГэВ. Отношение числа протонов к числу дейтронов оценивается равным 3:1. Число частиц с импульсами более 5 ГэВ/с составляет около 2% от полного числа однозарядных фрагментов. По этим результатам измерений в каждом событии были

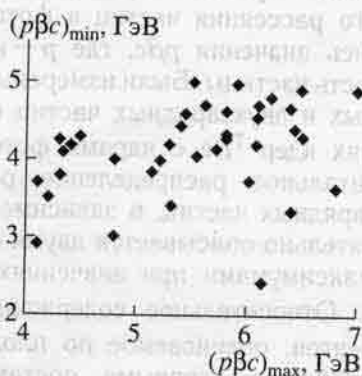


Рис. 1. Распределение событий 2He на плоскости импульсов фрагментов. Точки — координаты измеренных значений $p\beta c$ фрагментов. Абсцисса — большее значение $p\beta c$ в событии, ордината — меньшее значение $p\beta c$.

определены массы фрагментов и идентифицированы каналы фрагментации ядра ${}^7\text{Be}$.

В табл. 3 приведены числа событий, зарегистрированных в различных каналах фрагментации ядер ${}^7\text{Be}$. Примерно в 50% событий реакция происходит без испускания нейтральных частиц. Среди них заметно доминирует канал ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$, по 10% составляют каналы ${}^4\text{He} + d + p$ и ${}^6\text{Li} + p$. Зарегистрировано два события без испускания нейтронов в трехчастичных каналах ${}^3\text{He} + t + p$ и ${}^3\text{He} + d + d$. Реакции перезарядки ядер ${}^7\text{Be}$ в ядра ${}^7\text{Li}$ среди событий без сопровождения других вторичных заряженных частиц не было зарегистрировано.

События, содержащие только два гелиевых фрагмента, представлены на рис. 1 в виде точек, координатами которых служат измеренные значения $p\beta c$ фрагментов. За абсциссу принято большее значение $(p\beta c)_{\max}$ в событии, за ординату — меньшее значение $(p\beta c)_{\min}$. Практически все события по оси ординат располагаются ниже 5 ГэВ. Это значение принято за нижнюю границу $p\beta c$ для ядер ${}^4\text{He}$. На рис. 1 события ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$ располагаются слева от границы $(p\beta c)_{\max} = 5$ ГэВ, а события ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ справа от границы. Доля канала ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ относительно всех событий диссоциации ядер ${}^7\text{Be}$, составляющая около 30%, может рассматриваться как оценка нижнего значения вероятности такой конфигурации в ядре ${}^7\text{Be}$. Средний пробег для когерентной диссоциации релятивистских ядер ${}^7\text{Be}$ на ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ в ядерной фотоэмульсии равен 7 ± 1 м.

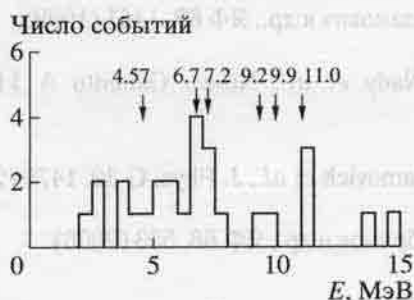


Рис. 2. Распределение событий ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ по величине E . Стрелками указаны значения уровней возбуждения ядра ${}^7\text{Be}$ в МэВ.

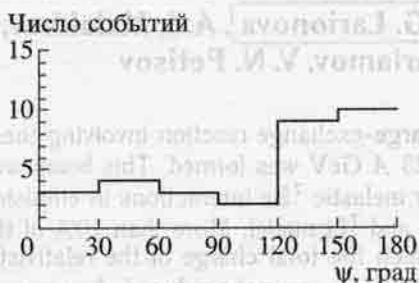


Рис. 3. Распределение углов ψ между фрагментами ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{He}$ в азимутальной плоскости в событиях ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$.

Средние пробеги ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}$ для двухчастичных каналов когерентной диссоциации без испускания нейтронов имеют близкие значения. Прямые оценки вероятности состояния ядра ${}^6\text{Li}$ в виде α -частичного остова и квазисвободного дейтронного кластера путем зондирования π^- -мезонами с энергией около 1 ГэВ мишени из ядер ${}^6\text{Li}$ в эксперименте [8] превышают 0.75. На рис. 2 приведено распределение событий для канала ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ в зависимости от величины $E = 1.59 \text{ МэВ} + E_t$, где E_t равно поперечной кинетической энергии фрагментов, а слагаемое 1.59 МэВ равно пороговой энергии канала. Более чем в 80% событий значения E не превышают 10 МэВ. В этой же области энергий располагаются и уровни возбуждения ядра ${}^7\text{Be}$, значения которых на рисунке указаны стрелками. Разделения отдельных уровней в экспериментальном распределении не наблюдается. Энергию системы фрагментов можно характеризовать также поперечными импульсами фрагментов в системе координат, связанной с фрагментирующим ядром. Различие в средних значениях импульсов фрагментов для зеркальных ядер может рассматриваться как проявление влияния кулоновского взаимодействия заряженных кластеров в ядрах и процессе фрагментации этих ядер. Среднее значение поперечных импульсов

фрагментов в канале ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ в системе их центра масс равно $147 \pm 5 \text{ МэВ}/c$. Заметное превышение этого значения относительно среднего значения поперечных импульсов фрагментов в канале фрагментации ${}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H}$, равного $108 \pm 2 \text{ МэВ}/c$, можно рассматривать как влияние кулоновского взаимодействия кластеров в этих ядрах. На рис. 3 представлено распределение углов ψ между фрагментами ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{He}$ в азимутальной плоскости в событиях ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$. В распределении преобладают большие углы между фрагментами. Это распределение в значительной степени определяется переданными импульсами фрагментирующим ядрам. Углы ψ , близкие к 180° , имеют корреляцию с малыми значениями импульсов, переданных ядру ${}^7\text{Be}$. Относительно большое число событий с углами ψ в области 180° , имеющих малые значения импульсов, переданных ядру, может быть связано с вкладом кулоновской диссоциации ядер ${}^7\text{Be}$ на тяжелых ядрах фотоэмульсии.

ВЫВОДЫ

Основные характеристики фрагментации релятивистских ядер ${}^7\text{Be}$ определяются двухгелиевой кластерной конфигурацией ядра ${}^7\text{Be}$. Наблюдаемое превышение среднего значения поперечных импульсов фрагментов, $147 \pm 5 \text{ МэВ}/c$, в канале когерентной фрагментации ядер ${}^7\text{Be}$ на ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$ над значением $108 \pm 2 \text{ МэВ}/c$ для канала диссоциации ${}^7\text{Li}$ на ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$, возможно, связано с кулоновским взаимодействием фрагментов в этих процессах. Относительно большое число событий с углами ψ в области 180° , имеющих соответственно малые значения переданных ядру импульсов, может быть связано с вкладом кулоновской диссоциации ядер ${}^7\text{Be}$ на тяжелых ядрах фотоэмульсии.

Авторы благодарят коллектив нуклотрона ОИЯИ за проведение сеанса облучения фотоэмульсий в пучке ядер ${}^7\text{Be}$ и группу обработки ядерных фотоэмульсий ЛВЭ ОИЯИ за проявку фотоэмульсий, сотрудников ФИАН А. Б. Антипову, А. В. Писецкую и Л. Н. Шестеркину за поиск и измерения ядро-ядерных взаимодействий. Авторы благодарны Ф. Г. Лепехину (ПИЯФ РАН, г. Гатчина) и М. М. Чернявскому (ФИАН) за обсуждения работы.

Работа поддержана гратами РФФИ № 02-02-164-12а, 04-02-17151.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The BECQUEREL Project, <http://becquerel.jinr.ru>
2. S. El-Sharkawy *et al.*, Phys. Scripta **47**, 512 (1993).
3. Ф. Г. Лепехин, Д. М. Селиверстов, Б. Б. Симонов, Письма в ЖЭТФ **59**, 312 (1994).
4. F. G. Lepekhn, D. M. Seliverstov, and B. B. Simonov, Eur. Phys. J. A **1**, 137 (1998).
5. М. И. Адамович и др., ЯФ **62**, 1461 (1999).
6. M. Al-Nady *et al.*, Nuovo Cimento A **111**, 1243 (1998).
7. M. I. Adamovich *et al.*, J. Phys. G **30**, 1479 (2004).
8. Б. М. Абрамов и др., ЯФ **68**, 503 (2005).

FRAGMENTATION CHANNELS OF RELATIVISTIC ${}^7\text{Be}$ NUCLEI IN PERIPHERAL INTERACTIONS

N. G. Peresadko, Yu. A. Aleksandrov, V. Bradnova, S. Vokál, S. G. Gerasimov, V. A. Dronov,
P. I. Zarubin, I. G. Zarubina, A. D. Kovalenko, V. G. Larionova, A. I. Malakhov,
P. A. Rukoyatkin, V. V. Rusakova, S. P. Kharlamov, V. N. Fetisov

${}^7\text{Li}$ nuclei were accelerated at the JINR Nuclotron. After the charge-exchange reaction involving these nuclei at an external target a secondary ${}^7\text{Be}$ beam of energy 1.23 A GeV was formed. This beam was used to expose photoemulsion chambers. The mean free path for inelastic ${}^7\text{Be}$ interactions in emulsion $\lambda = 14.0 \pm 0.8$ cm coincides within the errors with those for ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ nuclei. More than 10% of the ${}^7\text{Be}$ events are associated with the peripheral interactions in which the total charge of the relativistic fragments is equal to the charge of the ${}^7\text{Be}$ and in which charged mesons are not produced. An unusual ratio of the isotopes is revealed in the composition of the doubly charged ${}^7\text{Be}$ fragments: the number of ${}^3\text{He}$ fragments is twice as large as that of ${}^4\text{He}$ fragments. In 50% of peripheral interactions, a ${}^7\text{Be}$ nucleus decays to two doubly charged fragments. The present paper gives the channels of the ${}^7\text{Be}$ fragmentation to charged fragments. In 50% of events, the ${}^7\text{Be}$ fragmentation proceeds only to charged fragments involving no emission of neutrons. Of them, the ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ channel dominates, the ${}^4\text{He} + d + p$ and ${}^6\text{Li} + p$ channels constitute 10% each. Two events involving no emission of neutrons are registered in the 3-body ${}^3\text{He} + t + p$ and ${}^3\text{He} + d + d$ channels. The mean free path for the coherent dissociation of relativistic ${}^7\text{Be}$ nuclei to ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ is 7 ± 1 m. The particular features of the relativistic ${}^7\text{Be}$ fragmentation in such peripheral interactions are explained by the ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ 2-cluster structure of the ${}^7\text{Be}$ nucleus.