

## ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕГО СВОБОДНОГО ПРОБЕГА $^{12}\text{C}$ В РЕАКЦИИ КОГЕРЕНТНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР $^{12}\text{C}$ НА ТРИ $\alpha$ -ЧАСТИЦЫ В ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ С НАПОЛНЕНИЕМ ЯДРАМИ СВИНЦА

© 2018 г. Н. Г. Пересадыко\*, С. Г. Герасимов, В. А. Дронов, А. В. Писецкая, С. П. Харламов, Л. Н. Шестеркина

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 13.04.2018 г.

Стопка, составленная из слоев ядерной фотоэмульсии, была облучена пучком ионов  $^{12}\text{C}$  с импульсом 4.5 А ГэВ/с на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ (Дубна). Было измерено значение среднего пробега релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$  для реакции когерентной фрагментации ядер  $^{12}\text{C}$  на три  $\alpha$ -частицы в ядерной трековой фотоэмульсии БР-2 с наполнением ядрами свинца в пропорции один атом Рb на пять атомов Ag  $\lambda_{(\text{эм}+\text{Рb})} = 11 \pm 3$  м. Этому значению  $\lambda_{(\text{эм}+\text{Рb})}$  соответствует усредненное по всем ядрам фотоэмульсии поперечное сечение  $\sigma_{(\text{эм}+\text{Рb})} = 18 \pm 3$  мбн. Из сравнения полученного в настоящей работе значения  $\lambda_{(\text{эм}+\text{Рb})}$  со значением среднего пробега ядер  $^{12}\text{C}$  в стандартной фотоэмульсии БР-2, равным  $10.3 \pm 1.5$  м, следует, что во фрагментации ядер  $^{12}\text{C}$  в этом канале на ядре свинца, как и на ядрах фотоэмульсии, доминирует ядерный механизм фрагментации.

DOI: 10.1134/S004400271805015X

Фрагментация релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$  на три  $\alpha$ -частицы без разрушения ядра мишени и без образования других заряженных частиц в неупругих столкновениях ядер  $^{12}\text{C}$  с ядрами мишени считается одним из наиболее периферических взаимодействий, получивших название “когерентные реакции”. Можно ожидать, что в такой реакции с большей вероятностью возможно проявление кулоновского механизма взаимодействия ядер. Одной из отличительных особенностей кулоновского расщепления релятивистского ядра от ядерного механизма взаимодействия является квадратичная зависимость поперечного сечения реакции от электрического заряда ядра мишени  $\sim Z_t^2$ . Реакция расщепления релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$  на три  $\alpha$ -частицы была зарегистрирована и изучалась в ядерной трековой фотоэмульсии в работах [1–3] и в неупругих столкновениях на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ (Дубна) с помощью пузырьковой пропановой камеры в [4, 5]. В работах с использованием пузырьковой пропановой камеры на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ были измерены поперечные сечения диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$  с импульсом

4.2 А ГэВ/с по этому каналу при взаимодействии с ядрами  $^{12}\text{C}$  и с протонами.

В фотоэмульсии нельзя определить, на каком ядре мишени происходит эта реакция. Поэтому в ядерной фотоэмульсии измеряется значение среднего свободного пробега ускоренных ядер до взаимодействия, усредненное по всем ядрам в составе эмульсии  $\lambda_{(\text{эм})}$ . Поперечное сечение реакции  $\sigma_{(\text{эм})}$  связано с  $\lambda_{(\text{эм})}$  равенством

$$\sigma_{(\text{эм})}\lambda_{(\text{эм})}N_{(\text{эм})} = 1,$$

где  $N_{(\text{эм})}$  — полное число всех сложных ядер в составе фотоэмульсии. В работе [3] было приведено уточненное значение среднего пробега в реакции когерентной фрагментации ядер  $^{12}\text{C}$  с импульсом 4.5 А ГэВ/с на три  $\alpha$ -частицы в стандартной фотоэмульсии БР-2, равное  $10.3 \pm 1.5$  м, и соответствующее ему значение поперечного сечения реакции, усредненное по всем ядрам, содержащимся в фотоэмульсии. Путем сравнения поперечного сечения данной реакции на ядрах фотоэмульсии и измеренных поперечных сечений реакции на углеродной и протонной мишенях в настоящей работе был сделан вывод, что в области мишеней до ядра Ag в этой реакции доминирует ядерный механизм взаимодействия ядер. С целью обнаружения кулоновского возбуждения в этой реакции в

\*E-mail: nat.peres@mail.ru

Содержание атомов в стандартной фотоэмульсии БР-2 и фотоэмульсии с наполнением ядрами свинца

Фотоэмульсия	Число ядер в $1\text{ см}^3 (\times 10^{22})$						
	H	C	N	O	Ag	Bг	Pb
БР-2	2.97	1.40	0.37	1.08	1.03	1.03	—
БР-2 + Pb	3.26	1.64	0.28	1.49	0.76	0.76	0.15

работе [3] было проведено исследование реакции в фотоэмульсии с наполнением солью, содержащей свинец. В работе указывается, что средний пробег ядер  $^{12}\text{C}$  для реакции фрагментации ядер  $^{12}\text{C}$  с импульсом  $4.5\text{ А ГэВ}/c$  на три  $\alpha$ -частицы равен  $4.8 \pm 1.8\text{ м}$ . Данное значение среднего свободного пробега получено на длине просмотренных следов  $61.8\text{ м}$ , где было найдено 13 соответствующих событий [6].

Указанное значение среднего пробега ядер  $^{12}\text{C}$  в фотоэмульсии с содержанием ядер свинца более чем в 2 раза меньше значения среднего пробега ядер в обычной фотоэмульсии. Соответственно поперечное сечение указанной реакции в фотоэмульсии с содержанием ядер свинца вдвое больше поперечного сечения реакции в стандартной фотоэмульсии. Такое сильное увеличение поперечного сечения реакции авторы объяснили доминированием кулоновского механизма фрагментации ядер  $^{12}\text{C}$  на ядре свинца. Но при таком изменении сечения число событий на введенных в фотоэмульсию ядрах свинца должно быть примерно такое же, как и на всех остальных ядрах фотоэмульсии, а поперечное сечение реакции на ядрах свинца должно в десятки раз превышать поперечное сечение на ядрах фотоэмульсии (в связи с их меньшим количеством по сравнению с ядрами фотоэмульсии).

Такой чрезвычайно сильный рост поперечного сечения кулоновского механизма взаимодействия с параметрами столкновения, превышающими радиус ядра-мишени (Pb), нуждается в подтверждении на большей статистике. Для этого представляется важным повторно провести измерение средних пробегов ядер  $^{12}\text{C}$  для этой реакции на гораздо большей длине просмотренных следов в фотоэмульсии с наполнением ядрами свинца.

В настоящей работе проведено измерение среднего пробега ядер  $^{12}\text{C}$  с импульсом  $4.5\text{ А ГэВ}/c$  для канала когерентной фрагментации на три  $\alpha$ -частицы в ядерной фотоэмульсии БР-2, чувствительной к ионизации однозарядных релятивистских частиц, обогащенной свинцом в пропорции один атом Pb на пять атомов Ag. Слои фотоэмульсии толщиной около  $400\text{ мкм}$ , собранные в стопку, облучены в пучке ионов  $^{12}\text{C}$  с импульсом  $4.5\text{ А ГэВ}/c$

на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ (Дубна). При облучении плоскость слоев фотоэмульсии располагалась по направлению пучка ускоренных ядер  $^{12}\text{C}$ . Ядра  $^{12}\text{C}$  входили в торец слоев фотоэмульсии и проходили вдоль плоскости слоев фотоэмульсии. Следы ядер  $^{12}\text{C}$  просматривались на микроскопе при 900-кратном увеличении от входа ядра  $^{12}\text{C}$  в фотоэмульсию либо до взаимодействия ядра  $^{12}\text{C}$  с ядром фотоэмульсии, либо до выхода ядра  $^{12}\text{C}$  из фотоэмульсии без видимого взаимодействия. На суммарной длине  $239\text{ м}$  просмотренных следов релятивистских ядер  $^{12}\text{C}$  найдено 1500 неупругих взаимодействий. Среди зарегистрированных взаимодействий идентифицировано 21 взаимодействие, в которых ядра  $^{12}\text{C}$  распадаются на три  $\alpha$ -частицы без признаков разрушения ядра мишени и без образования других заряженных частиц. Релятивистские  $\alpha$ -частицы однозначно идентифицируются визуально по степени ионизации следов в эмульсии. По этим результатам средний пробег ядер  $^{12}\text{C}$  для этой реакции в фотоэмульсии с содержанием ядер свинца  $\lambda_{(\text{эм}+\text{Pb})}$  равен  $11 \pm 3\text{ м}$  [7]. Значение среднего пробега ядер в стандартной фотоэмульсии (без наполнения ядрами Pb), приведенное в работе [3],  $\lambda_{(\text{эм})}$  равно  $10.3 \pm 1.5\text{ м}$ . Измеренное в настоящей работе значение среднего пробега диссоциации ядер  $^{12}\text{C}$  на три  $\alpha$ -частицы в фотоэмульсии с таким содержанием ядер свинца не меньше значения среднего пробега ядер в стандартной фотоэмульсии. Это объясняется тем, что при наполнении фотоэмульсии солью, содержащей ядра свинца, в фотоэмульсии заметно уменьшилось содержание ядер Ag и Bг. В таблице приведены атомные составы стандартной фотоэмульсии БР-2 и фотоэмульсии с наполнением ядрами свинца. В стандартной фотоэмульсии среднее значение массового числа ядер равно 47 и содержание тяжелых ядер Ag и Bг составляет 42%; среднее значение заряда ядер равно 21. В фотоэмульсии с наполнением ядрами свинца среднее значение массового числа ядер равно 42 и содержание тяжелых ядер Ag и Bг снижается до 30%; среднее значение заряда ядер равно 19. Этим можно объяснить, что дополнительное число взаимодействий на ядрах свинца не полностью компенсирует уменьшение числа взаимодействий на ядрах Ag и Bг.

Среднему пробегу ядер в обычной фотоэмульсии  $\lambda_{(\text{эм})} = 10.3 \pm 1.5\text{ м}$  соответствует поперечное сечение  $\sigma_{(\text{эм})} = 20 \pm 1.5\text{ мбн}$ . Среднему значению пробега  $\lambda_{(\text{эм}+\text{Pb})} = 11 \pm 3\text{ м}$  в фотоэмульсии, содержащей ядра свинца, соответствует поперечное сечение  $\sigma_{(\text{эм}+\text{Pb})} = 18 \pm 3\text{ мбн}$ . Различие в значениях средних пробегов ядер  $^{12}\text{C}$  и поперечных сечений в стандартной фотоэмульсии и в фотоэмульсии с

наполнением ядрами свинца меньше ошибок значений измеренных пробегов. Поэтому для определения количественного соотношения сечений на ядрах фотоэмульсии и на ядре свинца необходимо увеличить точность измерения средних пробегов ядер. Полученная в настоящей работе оценка среднего пробега ядер  $^{12}\text{C}$  для фрагментации на три  $\alpha$ -частицы указывает на то, что на ядрах свинца, как и на ядрах фотоэмульсии, доминирует ядерный механизм взаимодействия, а не кулоновское возбуждение ядра  $^{12}\text{C}$ . Этот результат может быть использован при анализе более полных данных об этой реакции на других ядрах мишени. Полученный результат может быть также полезен при планировании экспериментов по исследованию поперечных сечений реакций на тяжелых ядрах с использованием ядерной трековой фотоэмульсии с наполнением тяжелыми ядрами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сотрудн. БВДКЛМТ (А. Марин и др.), ЯФ **29**, 105 (1979) [Sov. J. Nucl. Phys. **29**, 52 (1979)].
2. У. А. Абдуразакова, Р. А. Бондаренко, У. У. Гулямов, Г. М. Чернов, ЯФ **39**, 272 (1984) [Sov. J. Nucl. Phys. **39**, 169 (1984)].
3. В. В. Белага, А. А. Бенджаза, В. В. Русакова, Дж. А. Саломов, Г. М. Чернов, ЯФ **58**, 2014 (1995) [Phys. Atom. Nucl. **58**, 1905 (1995)]; V. V. Belaga, A. A. Benjaza, G. M. Chernov, V. V. Rusakova, and J. A. Salomov, Radiat. Meas. **25**, 271 (1995).
4. В. В. Белага, А. И. Бондаренко, Т. Канарек, Е. Н. Кладницкая, А. А. Кузнецов, М. М. Муминов (мл.), Р. Тогоо, Г. П. Тонеева, Г. М. Чернов, ЯФ **59**, 869 (1996) [Phys. Atom. Nucl. **59**, 832 (1996)].
5. А. И. Бондаренко, Г. М. Чернов, Б. С. Юлдашев, ЯФ **57**, 430 (1994) [Phys. Atom. Nucl. **57**, 403 (1994)].
6. В. В. Белага, А. А. Бенджаза, В. В. Русакова, Дж. А. Саломов, Г. М. Чернов, Препринт № Р1-94-285, ОИЯИ (Дубна, 1994).
7. В. В. Белага, С. Г. Герасимов, В. А. Дронов, Н. Г. Пересадько, А. В. Писецкая, В. В. Русакова, В. Н. Фетисов, С. П. Харламов, Л. Н. Шестеркина, ЯФ **80**, 338 (2017) [Phys. Atom. Nucl. **80**, 650 (2017)].

## MEASUREMENT OF THE MEAN PATH OF COHERENT FRAGMENTATION OF RELATIVISTIC NUCLEI $^{12}\text{C}$ FOR THREE $\alpha$ PARTICLE IN NUCLEAR EMULSION FILLED WITH Pb NUCLEI

N. G. Peresadko, S. G. Gerasimov, V. A. Dronov, A. V. Pisetskaya,  
S. P. Kharlamov, L. N. Shesterkina

The stack of layers of a photoemulsion was exposed in a  $^{12}\text{C}$  ion beam with a  $4.5 \text{ A GeV}/c$  momentum at the LHE synchrotron of JINR (Dubna). The value of the mean free path of relativistic  $^{12}\text{C}$  nuclei for the reaction of coherent fragmentation of  $^{12}\text{C}$  nuclei into three  $\alpha$  particles in a nuclear track photoemulsion of BR-2 filled with lead nuclei in the ratio of one atom of Pb to five atoms of Ag  $\lambda_{(\text{em}+\text{Pb})} = 11 \pm 3 \text{ m}$  has been measured. This value of  $\lambda_{(\text{em}+\text{Pb})}$  corresponds to the cross section averaged over all emulsion nuclei  $\sigma_{(\text{em}+\text{Pb})} = 18 \pm 3 \text{ mb}$ . From the comparison of the value  $\lambda_{(\text{em}+\text{Pb})}$  obtained in this work with the mean free path of  $^{12}\text{C}$  nuclei in a standard emulsion of BR-2 equal to  $10.3 \pm 1.5 \text{ m}$  one could conclude that in the dissociation of  $^{12}\text{C}$  nuclei in this channel on lead nuclei, as well as on nuclei of emulsion, the nuclear fragmentation mechanism is dominating.