

# ДИССОЦИАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР $^{10}\text{C}$ В ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ ПО КАНАЛАМ $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{C} + n$

**Бекмирзаев Рахматулла Нурмурадович, профессор<sup>1</sup>, Аликулов Самар Сатторович, преподаватель<sup>1</sup>, Зарубин Павел Игоревич, д.ф.м.н., в.н.с.<sup>2</sup>, Мустафаева Маржона Илхам кизи, студентка<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Джизакский Государственный Педагогический институт

e-mail: bekmirzaev@mail.ru

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

**Аннотация.** Описываются результаты по когерентной диссоциации релятивистских ядер  $^{10}\text{C}$  в ядерной эмульсии, включающие зарядовую топологию и кинематические особенности конечных состояний. Идентифицированы события когерентной диссоциации  $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{C} + n$ .

**Ключевые слова.** Ядра, эмульсия, диссоциация, топология, протон, нейтрон, заряд, ускоритель, релятивистская ядра.

\*\*\*

**Dissociation of relativistic nuclei in nuclear emulsions  $^{10}\text{C}$  via  $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{C} + n$**

**Abstract.** Achievements on the coherent dissociation of relativistic nuclei  $^{10}\text{C}$  nuclear emulsions comprising the charge topology and kinematical features of the final states. Identified events coherent dissociation  $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{C} + n$

**Key words.** Nucleus, emulsions, dissociation, topology, proton, neutron, charge, accelerator, relativistic nucleus.

\*\*\*

**Ядроли фотозэмульсияларда  $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{C} + n$  каналлари бўйича  $^{10}\text{C}$  релятивистик ядролар диссоциацияси**

**Аннотация.** Ядроли фотозэмульсияларда  $^{10}\text{C}$  релятивистик ядролар когерент диссоциацияси бўйича охириги ҳолатлар зарядли топологиялари ва кинематик хусусиятларини ўз ичига олган натижалар тавсифланган.  $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{C} + n$  когерент диссоциациялар ҳодисалари идентификацияланган.

**Калим сузлар.** Ядро, эмульсия, диссоциация, топология, протон, нейтрон, заряд, тезлатгич, релятивист ядро.

## ВВЕДЕНИЕ

Диссоциация релятивистских ядер на тяжелых ядрах мишени индуцируется в электромагнитных и ядерных дифракционных взаимодействиях. Конфигурационное перекрытие основного состояния ускоренного ядра с конечными кластерными состояниями наиболее полно проявляется при диссоциации на периферии ядра мишени с передачей возбуждения вблизи порогов связи кластеров. Определение взаимодействий как периферических упрощается при продвижении к энергии свыше 1 А ГэВ благодаря коллимации фрагментов налетающего ядра. В узкие струи легких

и легчайших ядер с суммарным зарядом, близким к заряду начального ядра. Продуктивной гипотезой при кинематическом анализе является допущение о равенстве импульсов на нуклон (или скоростей) исследуемого релятивистского ядра его фрагментов. Метод ядерной фотоэмульсии обеспечивает уникальную по полноте наблюдаемость множественных систем релятивистских фрагментов. Решающее значение имеет угловое разрешение, а, значит, лежащее в его основе пространственное, которое составляет в методе ядерной эмульсии рекордную величину (0,5 мкм).

При диссоциации легких ядер в статистических распределениях по различным конфигурациям релятивистских фрагментов отчетливо проявляются их кластерные особенности как следствие минимальности передаваемого возбуждения [4–9]. Исследование ядер с дефицитом нейтронов имеет особые преимущества из-за большей определенности в интерпретации. Облучения ядерной фотоэмульсии, начавшиеся с кластерных ядер  $^{12}\text{C}$  [9] и  $^6\text{Li}$  [10] по проекту БЕККЕРЕЛЬ [2] на синхрофазотроне ОИЯИ, продолжил цикл облучения на нуклотроне в пучках целого семейства кластерных ядер  $^7\text{Be}$ ,  $^9\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^9\text{C}$ ,  $^{10}\text{C}$ ,  $^{12}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N}$  [1,3-8]. Возникли предпосылки изучения в одинаковых условиях наблюдения разнообразных ансамблей легких и легчайших ядер. В настоящей работе сложившийся подход применен к изучению кластерных особенностей ядер  $^{10}\text{C}$ .

В ясно интерпретируемых реакциях фрагментации ядер  $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{C}$ , т.е. с выбиванием нейтрона образованием фрагментов ядра мишени или мезонов, будут исследованы импульсные спектры ядер  $^9\text{C}$ . Эта информация позволит в рамках статистической модели сделать вывод об импульсном распределении глубоко связанных нейтронов в ядре  $^{10}\text{C}$  и сравнить их с данными по внешнему нейтрону в ядре  $^9\text{Be}$  и протону в ядре  $^8\text{B}$ .

#### ЭКСПЕРИМЕНТ

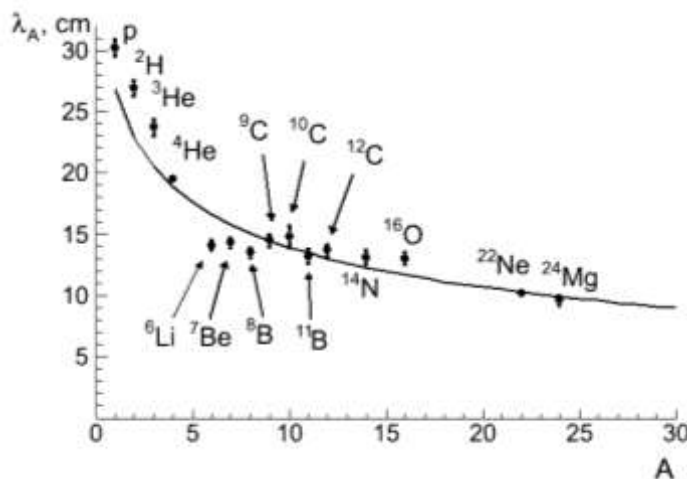
Генерация ядер  $^{12}\text{N}$  и  $^{10}\text{C}$  возможно в реакциях перезарядки и фрагментации ускоренных ядер  $^{12}\text{C}$ . Пучок ядер  $^{12}\text{C}$  с импульсом 2 А ГэВ/с был ускорен на нуклотроне ОИЯИ и выведен на производящую мишень (2006 г.). Амплитудный спектр со сцинтилляционного счётчика, установленного на этом месте, указывает на преобладание изотопов  $^3\text{He}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{C}$ , а также на примесь ядер  $^{12}\text{N}$ , и практическое отсутствие ядер  $^8\text{B}$  [12]. Во вторичном пучке такого состава была облучена стопка из 15 слоев ядерной фотоэмульсии БР-2, обладающей чувствительностью вплоть до однозарядных релятивистских частиц. Каждый слой имел размеры 10 x 20 см и толщину около 0,5 мм.

Вклад ядер  $^{12}\text{N}$  мал по отношению к ядрам  $^{10}\text{C}$ , согласно отношению сечений перезарядки и фрагментации. В составе пучка присутствуют и ядра

${}^7\text{Be}$ , у которых отличие по  $Z_{\text{пр}}/A_{\text{пр}}$  от  ${}^{12}\text{N}$  только 2%. Идентификация ядер  ${}^{12}\text{N}$ ,  ${}^{10}\text{C}$  и  ${}^7\text{Be}$  в облученной эмульсии возможна по зарядам пучковых ядер, определяемых методом счёта дельта ( $\delta$ ) –электронов на пучковых следах. Начальный этап просмотра эмульсионных слоев состоял в визуальном поиске пучковых следов с зарядами  $Z_{\text{пр}} = 1, 2$  и  $Z_{\text{пр}} > 2$ , которые отношение числа пучковых следов составило  $\approx 1 : 3 : 18$ . Для сравнения: в случае облучения ядрами  ${}^9\text{C}$  это отношение составило  $\approx 1 : 10 : 1$ . Таким образом, в настоящем облучении вклад ядер  ${}^3\text{He}$  резко снизился, что радикально подняло эффективность облучения и скорость поиска событий.

### СРЕДНИЙ ПРОБЕГ ДО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Поиск взаимодействий в эмульсионных слоях велся по первичным следам  $Z_{\text{пр}} > 2$  без выборки. Полностью поиск и зарядовые измерения «белых» звезд выполнены в 12 слоях. На суммарной длине просмотра первичных следов, равны 924.7 м, было найдено 6144 неупругих взаимодействий, в том числе 516 «белых» звезд. Средний пробег ядер  ${}^{10}\text{C}$  до взаимодействия составляет  $\lambda_{\text{ср}} = 14.8 \pm 0.9$  см, что соответствует данным соседних кластерных ядер в фотоэмульсии, полученных ранее в работах [10,11], представлены в рис. 1.

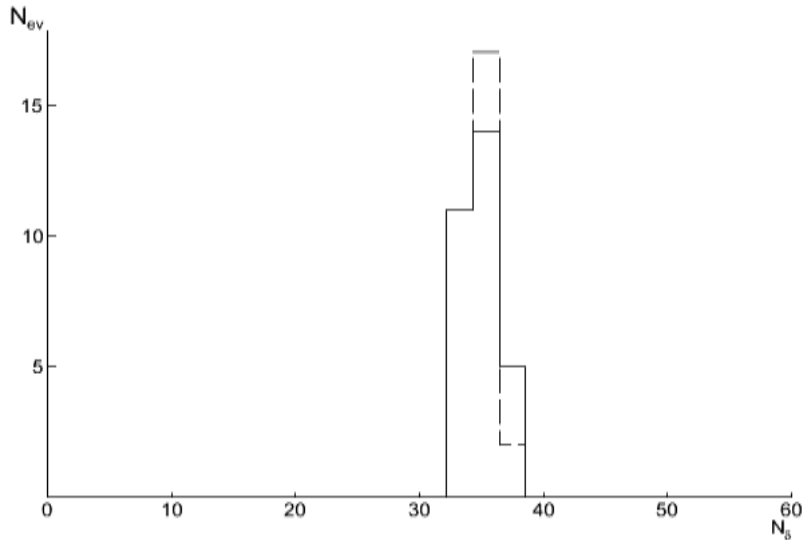


**Рис. 1.** Средняя величина пробега  $\lambda_A$  для неупругих взаимодействий в ядерной фотоэмульсии в зависимости от массы налетающего ядра  $A$ ; кривая – аппроксимация по геометрической модели.

### ЗАРЯДОВАЯ ТОПОЛОГИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДРА ${}^{10}\text{C}$

Из 2093 найденных неупругих взаимодействий, были отобраны события, в которых суммарный заряд фрагментов равен заряду ядра-снаряда  $Z_0 = 6$  (627 событие). Фрагменты налетающего ядра в этих событиях вылетают в пределах узкого переднего конуса, угловой конус фрагментации составляет  $\theta_{\text{fr}} \leq 8^\circ$ .

Наличие фрагментов  $Z_{fr} > 2$  сделало необходимой зарядовую идентификацию пучковых ( $Z_{pr}$ ) и вторичных ( $Z_{fr}$ ) следов. Для калибровки этой процедуры были измерены значения средней плотности  $\delta$ -электронов  $N_\delta$  на 1 мм длины на следах пучковых ядер. Наблюдается корреляция зарядовой топологии  $\Sigma Z_{fr}$  и  $N_\delta$ , что позволяет определить  $Z_{pr}$  каждого пучкового следа (рис. 2.).



**Рис. 2.** Распределения числа  $N_{fr}$  следов пучковых частиц (сплошная линия) и вторичных фрагментов (пунктирная линия) по среднему числу  $\delta$ -электронов  $N_\delta$  на 1 мм длины для всех измеренных событий.

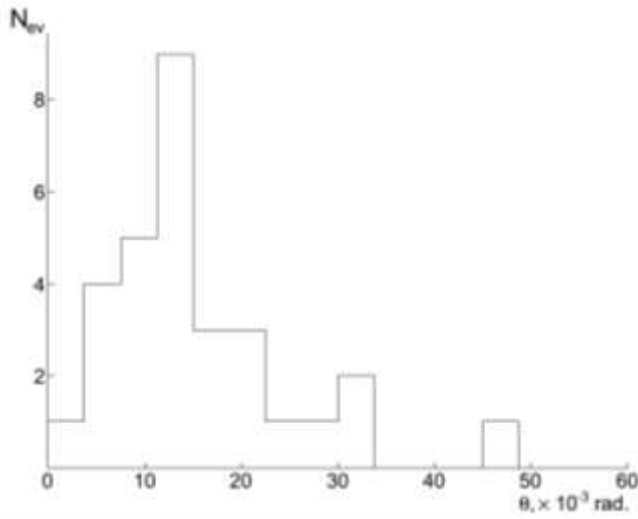
В табл.1. приведено распределение по каналам диссоциации числа звезд  $N_{tf}$ , сопровождаемых фрагментами, для которых выполняется условие  $Z_{pr} = \Sigma Z_{fr}$  и  $\Sigma Z_{fr} = 6$ . Для случая  $\Sigma Z_{fr} = 6$  такое условие проверено в 12 слоях при калибровке.

**Таблица 1.** Распределение по каналам диссоциации числа «белых» звезд  $N_{ws}$  и событий с фрагментами мишени или рожденными мезонами  $N_{tf}$ , для которых выполняется условие  $\Sigma Z_{fr} = 6$ .

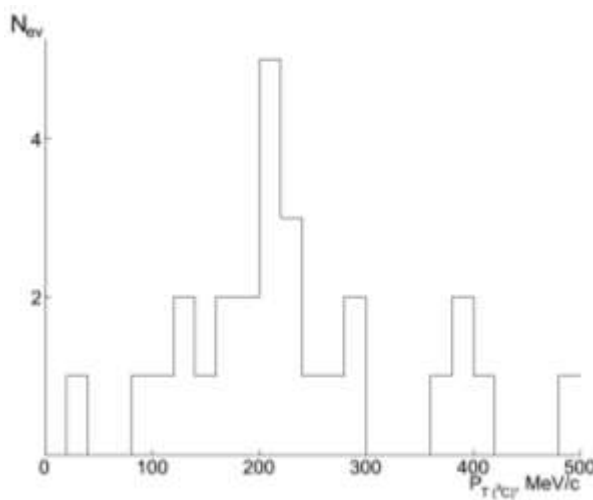
Канал ( $^{10}\text{C}$ )	$N_{ws}=227$	100%	$N_{tf}=627$	100%
B+H	1	0.4	12	1.9
Li+3H	1	0.4	2	0.3
Be + He	6	2.6	17	2.7
2He+2H	186	81.9	361	57.6
He+4H	12	5.3	160	25.5
3He	12	5.3	15	2.4
6H	9	4.0	30	4.8
$^9\text{C}+n$	-	-	30	4.8

## КОНФИГУРАЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ФРАГМЕНТОВ

Благодаря отсутствию стабильных изотопов  ${}^9\text{B}$  и  ${}^8\text{Be}$ , события с фрагментами с зарядами  $Z_{fr} = 6, 5, 4$  и  $3$  идентифицированными зарядами  $Z_{pr} = 6$ , интерпретируется как  ${}^{10}\text{C} \rightarrow {}^9\text{C} + n$ ;  ${}^{10}\text{C} \rightarrow {}^9\text{B} + p \rightarrow 2\alpha + 2p$ ;  ${}^{10}\text{C} \rightarrow {}^7\text{Be} + {}^3\text{He}$  и  ${}^{10}\text{C} \rightarrow {}^7\text{Li} + 3n$ . Канал  ${}^{10}\text{C} \rightarrow {}^9\text{C} + n$  имеют наиболее большой порог  $21$  МэВ и составляют около  $5\%$  статистика событий когерентной диссоциации с  $\sum Z_{fr} = 6$ . На рис. 3 представлены распределения по полярному углу  $\theta$  релятивистских фрагментов  ${}^9\text{C}$ . Среднее значение равно  $\langle \theta_C \rangle = (15.4 \pm 1.6) \times 10^{-3}$  рад (RMS =  $9.14 \times 10^{-3}$  рад; RMS – среднеквадратичное отклонение).



**Рис.3.** Распределения по полярному углу  $\theta$  релятивистских фрагментов  ${}^9\text{C}$  в канале  ${}^{10}\text{C} \rightarrow {}^9\text{C} + n$ .



**Рис.4.** Распределение по поперечному импульсу  $P_T$  событий когерентной диссоциации  ${}^{10}\text{C} \rightarrow {}^9\text{C} + n$ .

Угловые измерения позволяют оценить с точностью несколько процентов поперечные импульсы фрагментов  $P_t$  согласно формуле  $P_t = A_{fr} P_0 \sin \theta$ . Распределение суммы поперечных импульсов фрагментов  $P_T$  отражает механизм когерентной диссоциации.

На рис. 4 представлены распределения  $P_t({}^9\text{C})$ , имеющие средние значения  $\langle P_t({}^9\text{C}) \rangle = 270.4 \pm 29.4$  МэВ/с, при RMS  $160.9$  МэВ/с. А в канале  ${}^{10}\text{C} \rightarrow {}^9\text{B} + p \rightarrow 2\alpha + 2p$  средние значения  $\langle P_t({}^9\text{B} \rightarrow 2\alpha + p) \rangle = 120.5 \pm 10.9$  МэВ/с, при RMS  $83.78 \pm 7.7$  МэВ/с. Из работы [7] средние значение поперечных импульсов фрагментов получено следующие:  $\langle P_T({}^8\text{B} + p) \rangle = 246 \pm 44$  МэВ/с, при RMS  $164$  МэВ/с и  $\langle P_T({}^7\text{Be} + 2p) \rangle = 219 \pm 38$  МэВ/с при RMS  $136$  МэВ/с. Можно

заклучить [12], что распределения находятся в области которая характерна для ядерной дифракционной диссоциации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря имеющейся возможности по формированию и исследованию пучков легких релятивистских ядер на Нуклотороне ОИЯИ, впервые было выполнено исследование свойств ядра  $^{10}\text{C}$  как  $^9\text{C}+n$  системы, проявляющихся в периферической фрагментации на ядрах фотоэмульсии при энергии 1.2 А ГэВ.

Поиск и зарядовые измерения событий выполнены в 12 слоях. На суммарной длине просмотра первичных следов 924.7 м было найдено 6144 неупругих взаимодействий, в том числе 516 «белых» звезд. Средний пробег ядер  $^{10}\text{C}$  до взаимодействия составляет  $\lambda_{\text{ср}} = 14.8 \pm 0.9$  см. По зарядовой топологии найдено 5% событий ядра  $^{10}\text{C}$  и получено угловые и импульсные данные как  $^9\text{C}+n$  системы.

Анализ результатов эксперимента осуществлен на методики ядерных эмульсий статистике 30 события периферической фрагментации  $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{C}+n$  на ядрах групп H, CNO, AgBr.

Получено данные об угловых ( $\langle\theta(^9\text{C})\rangle = (15.4 \pm 1.6$  мрад)) и импульсных ( $\langle Pt(^9\text{C})\rangle = 270.4 \pm 29.4$  МэВ/с) спектры  $^9\text{C}$  частиц, образующихся при фрагментации  $^{10}\text{C} \rightarrow ^9\text{C}+n$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н. П. Андреева и др., ЯФ 68, 484 (2005) [N. P. Andreeva et al., Phys. Atom. Nucl. 68, 455(2005)]; N. P. Andreeva et al., nucl-ex/0605015.
2. The BECQUEREL Project, <http://becquerel.jinr.ru/>.
3. Н. Г. Пересадько и др., ЯФ 70, 1226 (2007) [N. G. Peresadko et al., Phys. Atom. Nucl. 70, 1266 (2007)]; nucl-ex/0605014.
4. Д. А. Артеменков и др., ЯФ 70, 1222 (2007) [D. A. Artemenkov et al., Phys. Atom. Nucl. 70, 1226 (2007)]; nucl-ex/0605018.
5. Р. Станоева и др., ЯФ 72, 731 (2009) [R. Stanoeva et al., Phys. of At. Nucl. 72, 690 (2009)]; arXiv: 0906.4220.
6. D. O. Krivenkov et al., NATO Science for Peace and Security, Series -B: Progress in High-Energy Physics and Nuclear Safety, Ed. By C. Begun et al. (Springer/2009), p. 149; arXiv: 0811.1880.
7. Д.О.Кривенков и др. «Когерентная диссоциация релятивистских ядер  $^9\text{C}$ », Ядерная физика, 2010, том 73, №12, с.1-7.
8. P. A. Rukoyatkin, L. N. Komolov, R. I. Kukushkina, V. N. Ramzhin, P. I. Zarubin, EPJ ST 162, 267(2008).

9. Т. В. Щедрина и др., ЯФ 70, 1271(2007) [Т. V. Shchedrina et al., Phys. Atom. Nucl. 70, 1230 (2007)]; arXiv: nucl-ex/0605022.
10. В.В.Белага и др., ЯФ 58,2014 (1995) [V. V. Belaga et al., Phys. Atom. Nucl. 58, 1905(1995)].
11. М. И. Адамович и др., ЯФ 62, 1461 (1999) [M. I. Adamovich et al., Phys. Atom. Nucl. 62, 1378 (1999)].
12. Н.Г.Пересадько, В.Н.Фетисов и др., Письма в ЖЭТФ 88, 83 (2008).
13. М. I. Adamovich et al., J. Phys. G 30, 1479 (2004).
14. Р. Р. Каттабеков, К. З. Маматкулов и др. «Облучение ядерной эмульсии в смешанном пучке релятивистских ядер  $^{12}\text{N}$ ,  $^{10}\text{C}$  и  $^7\text{Be}$ », Ядерная физика, 73, 2166-2171 (2010).