

УДК 539.1

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕЗАРЯДКИ ПРИ ФРАГМЕНТАЦИИ ИОНОВ УГЛЕРОДА ПРИ ЭНЕРГИИ 300 МэВ/НУКЛОН: СРАВНЕНИЕ С МОДЕЛЯМИ ИОН-ИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

© 2023 г. А. А. Куликовская¹ *, Б. М. Абрамов¹, Ю. А. Бородин¹, С. А. Булычев¹, И. А. Духовской¹, А. П. Крутенкова¹, В. В. Куликов¹, М. А. Мартемьянов¹, М. А. Мацюк¹, Е. Н. Турдакина¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение
“Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: annkull@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Представлены экспериментальные данные о дифференциальных сечениях образования изотопов ^{11}Be , ^{12}Be и ^{12}B при фрагментации пучка углерода с энергией в 300 МэВ/нуклон в эксперименте ФРАГМ, проводимом на базе многоцелевого ускорительного комплекса ИТЭФ–ТВН. Полученные экспериментальные данные сравниваются с предсказаниями моделей ион-ионных взаимодействий: бинарного каскада и квантовой молекулярно-динамической модели.

DOI: 10.31857/S0367676523702034, EDN: ZBTHYG

ВВЕДЕНИЕ

Основными целями физики ион-ионных взаимодействий являются не только установление их фундаментальных свойств, но и точное феноменологическое описание таких процессов, что важно для создания различных моделей ион-ионных взаимодействий в широком диапазоне энергий.

Стоит отметить, что описание процессов фрагментации ядер важно не только для фундаментальных исследований, но и для прикладных направлений, таких как тяжелоионная терапия, где фрагментация ядер приводит к нежелательному облучению тканей за пиком Брега, создание пучков радиоактивных ядер и радиационной защиты от космических лучей электроники космических станций. Одним из наименее изученных механизмов ион-ионных взаимодействий является фрагментация ядер с перезарядкой нуклонов, которая приводит к увеличению числа протонов или нейтронов в ядре-фрагменте по сравнению с налетающим ядром. Такие процессы довольно слабо изучены экспериментально [1, 2]. С точки зрения эксперимента, это связано с трудностями идентификации этих процессов во взаимодействиях тяжелых ядер и малостью сечения для легких ядер. Кроме того, для идентификации таких фрагментов на фоне других ионов, образующихся без перезарядки нуклонов, необходима экспериментальная установка, обеспечивающая высокое

импульсное разрешение. Создание крупных тяжелоионных научных центров, таких как GSI в Германии и Riken в Японии позволило несколько расширить базу данных по зарядообменным процессам. Однако это коснулось только области средних и тяжелых ядер при энергиях в области 1 ГэВ/нуклон. В работах GSI на установке FRS было показано, что при фрагментации ^{112}Sn и ^{208}Pb с энергией 1 ГэВ/нуклон под нулевым углом в результате изобарического зарядового обмена наблюдается образование изотопов ^{112}I и ^{208}Bi [3, 4]. Сечение выхода этих изотопов оказалось довольно большим и сравнимым с сечением реакции фрагментации, протекающей без зарядового обмена. Анализ импульсных спектров этих фрагментов позволил разделить вклады квазиупругой перезарядки и рождения Δ -изобары [3]. Проведенный теоретический анализ данных позволил впервые получить хорошее согласие с экспериментом. Что касается двойной перезарядки нуклонов, то этот процесс до сих пор не наблюдался во фрагментации тяжелых ионов. Здесь следует отметить значительное число работ по теоретическим аспектам как однократной, так и двойной перезарядки нуклонов в процессах изобарической фрагментации ядер [5], направленных на получение информации о матричных элементах безнейтринного двойного β -распада ядер. Это направление охватывает только область энергий

ионов меньших 10 МэВ/нуклон, что далеко от области энергий, обсуждаемой в этой статье.

Экспериментальная установка ФРАГМ обладает уникальными характеристиками, необходимыми для исследования процессов, идущих с перезарядкой нуклонов: высоким импульсным разрешением и способностью регистрировать широкий диапазон легких фрагментов. Кроме того, за время работы ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН [6] был набран значительный объем данных по фрагментации ядер углерода при энергии 300 МэВ/нуклон [7, 8]. На основе их анализа выяснилось, что при фрагментации ионов ^{12}C , в результате однократной перезарядки нуклонов, могут образовываться три изотопа: ^{11}Be (7 нейтронов), ^{12}B (7 нейтронов) и ^{12}N (7 протонов), и два при двукратной перезарядке: ^{11}Li и ^{12}Be (8 нейтронов). Образование таких ионов сопровождается рождением как виртуальных, так и реальных пионов [1].

Настоящая работа содержит измерения дифференциальных сечений рождения трех изотопов: ^{11}Be , ^{12}B , ^{12}Be . Для сравнения с экспериментальными результатами были привлечены расчеты по ион-ионным взаимодействиям, полученные в модели бинарного каскада (BC) [9] и квантовой молекулярно-динамической модели (QMD) [10]. Представленные результаты дополняют данные [11].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка ФРАГМ предназначалась для регистрации ядерных фрагментов, рожденных на внутренней мишени ускорительного комплекса ИТЭФ-ТВН. ФРАГМ представляет собой двухступенчатый магнитооптический канал, расположенный под углом 3.5° к внутреннему пучку [12]. Каждая ступень канала состояла из дублета квадрупольных линз и поворотного магнита. В качестве мишени, расположенной в вакуумной камере ускорителя, использовалась узкая вертикальная бериллиевая фольга толщиной 50 мкм. Это позволило одновременно иметь высокую светимость за счет многократного прохождения ионов через мишень и малые размеры источника для полного использования высокого импульсного разрешения канала. Два фокуса установки располагались на расстоянии 26 и 42 м от мишени. Сцинтилляционные счетчики, расположенные в первом и втором фокусах магнитооптического канала, использовались для измерения амплитуды и времени пролета. Каждый счетчик просматривался двумя ФЭУ с противоположных сторон для компенсации их геометрических размеров при времяпролетных измерениях. Совпадение сигналов двух счетчиков в разных фокусах использовалось в качестве триггера для считывания и записи информации на диск. В первом фо-

кусе также был расположен годоскоп, который состоял из двадцати вертикальных и восьми горизонтальных элементов размером $20 \times 1 \times 1$ см и предназначался для измерения профиля пучка и для уточнения импульса фрагмента с учетом фокусирующих свойств магнитооптического канала. Контроль интенсивности исходного пучка осуществлялся с помощью монитора из трех сцинтилляционных счетчиков, направленного на мишень под углом 2° .

МЕТОДИКА ОТБОРА ФРАГМЕНТОВ

Измерение импульсных спектров фрагментов осуществлялось при сканировании по жесткости магнитооптического канала в диапазоне от 0.9 до 2.8 ГэВ/с с шагом 50 МэВ/с. При каждой настройке идентификация различных ионов проводилась по корреляционной зависимости времени пролета (TDC) от амплитуды сигнала с зарядово-цифрового преобразователя (QDC) с сцинтилляционного счетчика в первом фокусе. Временные измерения определены таким образом, что ионы с большей массой имеют меньшую величину в каналах TDC. На рис. 1 представлены основные этапы выделения ^{11}Be : (а) — корреляционное распределение при жесткости канала в 2.1 ГэВ/с, где события с изотопами Be ограничены двумя наклонными линиями; (б) — распределение отобранных по времени пролета событий ^{11}Be по номеру ячейки годоскопа, фоновые события, связанные с существенно более интенсивным образованием ^{10}Be , вычитаются в соответствии с фитирующей функцией; (в) — нормированные на показания пучкового монитора распределения по жесткости, определяемые по номеру ячейки годоскопа, полученные при различных настройках магнито-оптического канала. Видно, что каждая настройка по жесткости дает более десяти добавочных точек, каждая из которых уточняет импульс фрагмента до 0.4%. В дальнейшем для определения выходов искоемых фрагментов ближайшие по импульсу точки из разных настроек канала суммируются с шагом 10–20 МэВ/с. Поиск фрагментов, соответствующих ^{11}Be , осуществлялся при жесткости в пределах от 2 до 2.25 ГэВ/с, ^{12}Be — от 2.15 до 2.45 ГэВ/с, ^{12}B — от 1.75 до 1.95 ГэВ/с, ^{12}N — от 1.25 до 1.45 ГэВ/с. Были обнаружены выходы трех фрагментов, родившихся в зарядово-обменных реакциях: ^{11}Be , ^{12}Be и ^{12}B . Распределение по годоскопическому счетчику в случае ^{12}N не дало четко выраженного пика.

При вычислении абсолютных значений дифференциальных сечений $d^2\sigma/dp d\Omega$ была проведена нормировка выходов фрагментов на полное сечение взаимодействия ионов углерода с бериллиевой мишенью. Величина сечения была получена с помощью пакета LAQGSM [7, 13], $\sigma_{\text{tot}} = 772.8$ мбн

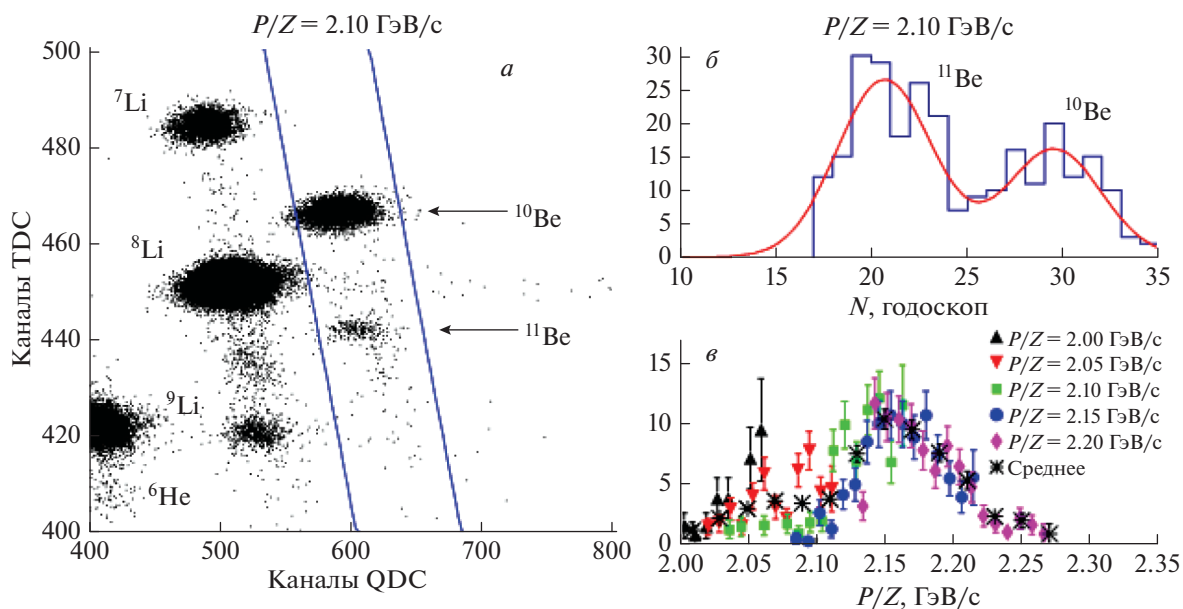


Рис. 1. Методика выделения ^{11}Be : корреляционное распределение времени пролета (TDC) и амплитуды сигнала (QDC) при жесткости канала в 2.1 ГэВ/с (а); распределение по номеру ячейки годоскопического счетчика, вклад от эффекта (^{11}Be) и фона от ^{10}Be определены в соответствии с фитирующей функцией, приведенной красным цветом (б); нормализованные распределения по жесткости (P/Z — отношение импульса к заряду фрагмента), вычисленной по номеру ячейки годоскопа, полученные при различных настройках магнито-оптического канала (в).

при кинетической энергии 300 МэВ/нуклон, что хорошо согласуется с энергонезависимым приближением полного сечения в пределах 0.5% [14]. Кроме того, была учтена импульсная зависимость регистрации ионов установкой ФРАГМ. Эффективность регистрации ионов была определена при помощи моделирования магнитооптического канала на базе программного пакета Geant4 [15]. При моделировании учитывались параметры следующих элементов магнитооптического канала: магнитных полей отклоняющих магнитов и квадрупольных линз.

СРАВНЕНИЕ С МОДЕЛЯМИ ИОН-ИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

На рис. 2 приведены дифференциальные сечения рождения трех долгоживущих изотопов ^{11}Be , ^{12}Be и ^{12}B в зависимости от импульса фрагмента в пределах от 8 до 9.8 ГэВ/с. Экспериментальные данные приводятся в сравнении с аналогичными спектрами, полученными в рамках моделей ион-ионных взаимодействий ВС (рис. 2а) и QMD (рис. 2б). Полученные сечения более чем на два порядка меньше сечений выхода других изотопов, образующихся без зарядового обмена. Экспериментальные формы распределений ^{12}B и ^{11}Be имеют гауссову форму с более узкой шириной спектра, порядка 100–150 МэВ/с, по сравнению с рождением изотопов бора и бериллия, образу-

ющихся без перезарядки нуклонов. Модели ион-ионных взаимодействий показывают, что низко-энергетический вклад, связанный с рождением реального пиона, является незначительным для реакций с однократной перезарядкой. В случае ^{12}Be в модели ВС, вклад такой компоненты становится сравнимым по сечению с вкладом, обусловленным перезарядкой, идущей без рождения пиона. Экспериментальные данные также показали разделение спектра на две независимые области. Как видно из распределений, модель ВС, хорошо согласуется с экспериментом по среднему значению и ширине спектра, однако расходится по абсолютным значениям с экспериментальными данными в случае ^{11}Be и ^{12}B . Также данная модель предсказывает разделение импульсного спектра ^{12}Be на две области, связанные с обменом виртуальным и реальным пионами. Модель QMD отображает основной пик зарядово-обменных реакций, однако существенно занижает вклад от рождения пионов по отношению к ВС. В рамках модели ВС, выходы ^{12}B и ^{12}N идентичны. Однако установка ФРАГМ имеет угол регистрации, отличный от нулевого, при этом основной вклад в рождение ^{12}N будут давать возбужденные состояния, которые имеют ширину порядка 100 кэВ и распадаются в основном по каналу $^{11}\text{C} + p$, что приводит к существенному подавлению регистрации установкой изотопа ^{12}N .

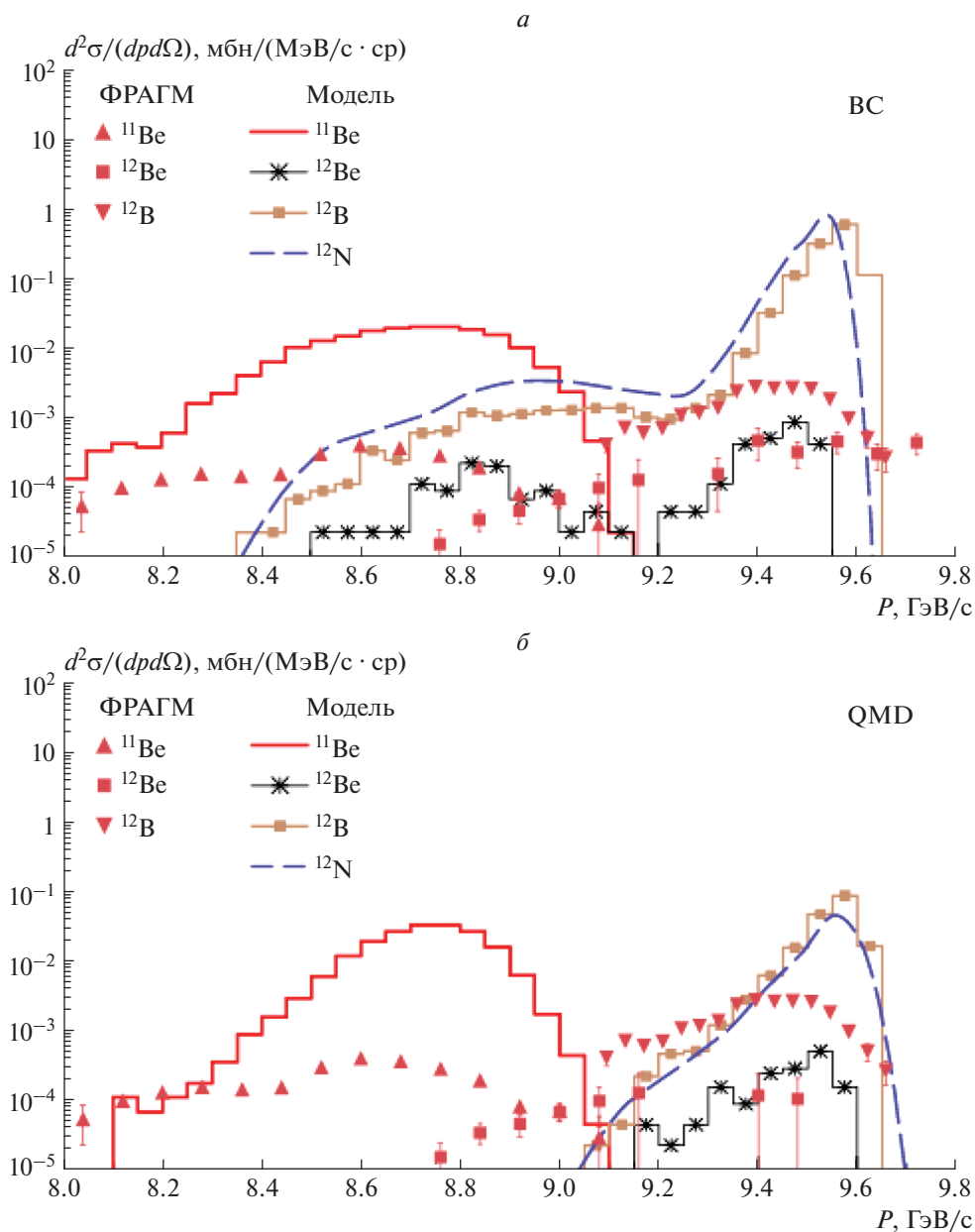


Рис. 2. Дифференциальные сечения выходов ионов бериллия и бора, образованных в зарядово-обменных реакциях, в зависимости от импульса фрагмента. Приводится сравнение экспериментальных данных с моделями ВС (а) и QMD (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты фрагментации ионов углерода, полученные на тяжелоионном ускорительном комплексе ИТЭФ-ТВН и экспериментальной установке ФРАГМ по поиску зарядово-обменных процессов. Были измерены импульсные зависимости дифференциальных сечений выходов ^{11}Be и ^{12}B , образованных в результате однократной перезарядки нуклонов, а также ^{12}Be , рождающего при двукратной перезарядке. Не удалось обнаружить ^{12}N . Подавление ^{12}N , зеркального к ^{12}B , по-видимому, связано с извест-

ным эффектом доминирования образования короткоживущих возбужденных состояний изотопа ^{12}N , которые распадаются в области мишени за счет сильного взаимодействия на более легкие фрагменты. Было проведено сравнение дифференциальных сечений выходов ионов бериллия и бора с двумя моделями ион-ионных взаимодействий (ВС и QMD). Данные ВС неплохо описывают формы импульсных спектров фрагментов, совпадают по среднему значению и ширине распределения, но завышают абсолютные значения. Полученные результаты предоставляют собой

новый материал для тестирования моделей ион-ионных взаимодействий.

Авторы выражают благодарность персоналу ускорительного комплекса ИТЭФ-ТВН и техническому персоналу эксперимента ФРАГМ за большой вклад в проведение измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roy-Stephan M. // Nucl. Phys. A. 1988. V. 482. P. 373.
2. Saito T.R., Ekawa H., Nakagawa M. // Eur. Phys. J. A. 2021. V. 57. P. 159.
3. Rodríguez-Sánchez J.L., Benlliure J., Vidaña I. et al. // Phys. Lett. B. 2020. V. 807. P. 135565.
4. Kelić A., Schmidt K.-H., Enqvist T. et al. // Phys. Rev. C. 2004. V. 70. Art. No. 064608.
5. Lenske H. Theory of heavy ion single and double charge exchange reactions. Proc. 1. CERN, 2019. P. 49.
6. Алексеев Н.Н., Акимов Г.Н., Алексеев П.Н. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 120. С. 78.
7. Абрамов Б.М., Алексеев П.Н., Бородин Ю.А. и др. // ЯФ. 2015. Т. 78. № 5. С. 403; Abramov B.M., Alekseev P.N., Borodin Yu.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78. No. 3. P. 373.
8. Abramov B.M., Alexeev P.N., Borodin Yu.A. et al. // EPJ Web Conf. 2017. V. 138. Art. No. 03002.
9. Folger G., Ivanchenko V.N., Wellisch J.P. // Eur. Phys. J. A. 2004. V. 21. P. 407.
10. Pal Singh T., Gautam S. // arXiv: 1110.6687v1. 2011.
11. Куликовская А.А., Абрамов Б.М., Бородин Ю.А. и др. // ЯФ. 2022. Т. 85. № 5. С. 339.
12. Абрамов Б.М., Алексеев П.Н., Бородин Ю.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. С. 509; Abramov B.M., Alekseev P.N., Borodin Yu.A. et al. // JETP Lett. 2013. V. 97. P. 439.
13. Mashnik S.G. // Eur. Phys. J. Plus. 2011. V. 126. P. 49.
14. L. Sihver L., Tsao C.H., Silberberg R. et al. // Phys. Rev. C. 1993. V. 47. P. 1225.
15. <https://geant4userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/BookForApplicationDevelopers.pdf>.

Charge exchange processes during carbon ion fragmentation at an energy of 300 MeV/nucleon: comparison with models of ion-ion interactions

A. A. Kulikovskaya^a, *, B. M. Abramov^a, Yu. A. Borodin^a, S. A. Bulychjov^a, I. A. Dukhovskoy^a, A. P. Krutenkova^a, V. V. Kulikov^a, M. A. Martemianov^a, M. A. Matsyuk^a, E. N. Turdakina^a

^a National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: annkull@mail.ru

Experimental data are presented on the differential cross sections to produce ^{11}Be , ^{12}Be , and ^{12}B isotopes at the carbon beam fragmentation with an energy of 300 MeV/nucleon in the FRAGM experiment conducted based on the ИТЭФ-TWAC multipurpose accelerator complex. The obtained experimental data are compared with the predictions of the models of ion-ion interactions: binary cascade and quantum molecular dynamics model.