

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ DCM-SMM НА ДАННЫХ ПО ФРАГМЕНТАЦИИ УГЛЕРОДА ПРИ 300 МэВ/НУКЛОН

А. А. Куликовская^{1,2,*}, *Б. М. Абрамов*¹, *С. А. Булычёв*¹,
*И. А. Духовской*¹, *В. В. Куликов*¹, *М. А. Мартемьянов*¹,
*М. А. Мацюк*¹

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, 123182, Россия

² ОАНО ВО «МосТех», Москва, 105318, Россия

Проведено тестирование модели DCM-SMM (Dubna Cascade Model – Statistical Multifragmentation Model) на экспериментальных данных по фрагментации ¹²C при энергии 300 МэВ/нуклон. Показано, что эта модель хорошо описывает выходы легких фрагментов, что указывает на ее применимость и в области более низких энергий — масштаба нескольких сот МэВ/нуклон.

The DCM-SMM (Dubna Cascade Model – Statistical Multifragmentation Model) model was tested on experimental data on ¹²C fragmentation at an energy of 300 MeV/nucleon. It is shown that this model describes the yields of light fragments well, which indicates its applicability in the region of lower energies of the scale of several hundred MeV/nucleon.

PACS: 25.70.Mn; 25.70.Pq

ВВЕДЕНИЕ

Одним из активно развиваемых направлений физики тяжелых ионов является создание моделей ядро-ядерных взаимодействий. В настоящее время поддерживается и продолжает развиваться модель DCM-SMM [1], объединяющая и совершенствующая модель Дубненского внутриядерного каскада (DCM) [2, 3] и статистическую модель мультифрагментации (SMM) [4]. Предполагается, что данная модель станет важным инструментом при анализе экспериментальных данных, полученных в рамках международного проекта NICA [5] в широком диапазоне энергий при взаимодействии тяжелых ионов. Уже сейчас, когда еще полностью не завершено создание инфраструктурной части проекта, эта модель широко используется для моделирования физических задач [6, 7], детекторных систем [8, 9] и анализа первых экспериментальных данных по физике тяжелых ионов, полученных на установке BM@N [10, 11]. Энергетический диапазон ядро-ядерных взаимодействий в этих применениях обычно

* E-mail: annkull316@mail.ru

превышает несколько ГэВ/нуклон, а продукты реакций составляют нуклоны, мезоны и исключительно легкие ядра. Однако механизмы ядерных реакций, заложенные в DCM-SMM, не имеют жестких энергетических ограничений, а использование механизма статистической мультифрагментации обещает хорошее описание образования тяжелых фрагментов. Поэтому представляет интерес оценить возможности DCM-SMM в области энергий ион-ионных взаимодействий в несколько сот МэВ/нуклон, где велик вклад образования фрагментов широкого диапазона масс. Это и является целью данной работы, в которой в качестве теста будут использованы наши данные по фрагментации ^{12}C на установке ФРАГМ.

В этой области энергий существует значительное количество моделей ядро-ядерных взаимодействий, которые имеют различные ограничения как на массы взаимодействующих ядер, так и на интервалы по энергии. Мы будем проводить сравнение с двумя активно используемыми моделями: бинарного каскада (BC) [12] и Льежского внутриядерного каскада (INCL) [13].

1. ЭКСПЕРИМЕНТ ФРАГМ

Экспериментальные данные были получены на установке ФРАГМ тяжелоионного ускорительно-накопительного комплекса ТВН (тера-ваттного накопителя). Установка представляет собой двухступенчатый магнитооптический канал длиной 42 м, расположенный под углом $(3,5 \pm 0,5)^\circ$ относительно пучка ионов углерода в вакуумной камере ускорителя. Использовались различные мишени: ^9Be , ^{27}Al , ^{64}Cu , ^{181}Ta . Измерения были проведены при энергиях ионов ^{12}C от 300 до 3200 МэВ/нуклон. Фрагменты регистрировались сцинтилляционными счетчиками, расположенными в обоих фокусах магнитооптического канала. Сигналы со счетчиков служили для определения ионизационных потерь фрагментов и измерения времени пролета. Подробное описание установки приведено в работах [14, 15].

Импульсные спектры образовавшихся фрагментов измерялись с помощью сканирования по жесткости магнитооптического канала с шагом 50–100 МэВ/с. Идентификация фрагментов осуществлялась по корреляционным распределениям амплитуда – время пролета, где амплитуда сигнала являлась функцией заряда фрагмента, а время пролета — его массы [16]. Надежно разделялись все фрагменты: от изотопов водорода до изотопов налетающего ядра углерода. Поскольку экспериментальная установка позволяла регистрировать весь импульсный спектр фрагментов, вычислялись дифференциальные сечения выхода фрагментов в области фрагментации налетающего ядра под углом регистрации установки на разных мишенях.

Для получения сечений выхода фрагментов экспериментальные данные нормировались на предсказания моделей ион-ионных взаимодействий в максимуме фрагментационного пика протонов. Протоны были

выбраны потому, что их спектры в области максимума пика хорошо описываются в этих моделях. В свою очередь, в теоретических расчетах используется в качестве нормировки полное сечение ион-ионных взаимодействий, которое также хорошо известно для налетающих ионов углерода и разных мишеней. В частности, оно вычисляется в рамках модели LAQGSM [17] и при энергии 300 МэВ/нуклон изменяется от 772,8 мб для ${}^9\text{Be}$ -мишени до 2731,3 мб для ${}^{181}\text{Ta}$ [18]. Следует отметить, что компьютерный код модели DCM-SMM также позволяет определять полное сечение процесса взаимодействия сталкивающихся ядер.

2. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Экспериментальные данные по дважды дифференциальным сечениям $d^2\sigma/(dp d\Omega)$ под углом $3,5^\circ$ выхода легких фрагментов (протонов, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$), образующихся при фрагментации ядер ${}^{12}\text{C}$ с энергией 300 МэВ/нуклон на бериллиевой мишени в области фрагментации налетающего ядра, в зависимости от импульса фрагмента приведены на рис. 1 вместе с предсказаниями моделей ядро-ядерных взаимодействий DCM-SMM, BC и INCL. Видно, что импульсное распределение протонов хорошо описывается во всех моделях, включая DCM-SMM. Причем хорошее описание сохраняется и в глубоко кумулятивной области при импульсах, больших 1,5 ГэВ/с, где кумулятивное число близко к двум и сечение падает на четыре порядка величины по сравнению с максимумом фрагментационного пика при 0,8 ГэВ/с.

Для более тяжелых фрагментов все модели испытывают серьезные трудности при описании экспериментальных данных в широком энергетическом интервале. Можно говорить о хорошем описании импульсных спектров только в области больших сечений в окрестности максимумов фрагментационных пиков, где скорости фрагментов близки к скорости налетающего ядра. В этой области предсказания DCM-SMM хорошо согласуются с экспериментальными данными для всех фрагментов: от дейтронов до ${}^4\text{He}$. Это подтверждают и данные рис. 2, где приведены дифференциальные сечения $d\sigma/d\Omega$ выходов протонов, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ на различных мишенях, полученные интегрированием по всему импульсному захвату установки ФРАГМ данных, приведенных на рис. 1 для бериллиевой мишени и аналогичных импульсных распределений на других мишенях. Видно хорошее согласие предсказаний DCM-SMM с экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При первом сравнении предсказаний модели DCM-SMM с данными по фрагментации ионов углерода при энергии 300 МэВ/нуклон, полученными в эксперименте ФРАГМ, видно хорошее согласие и применимость

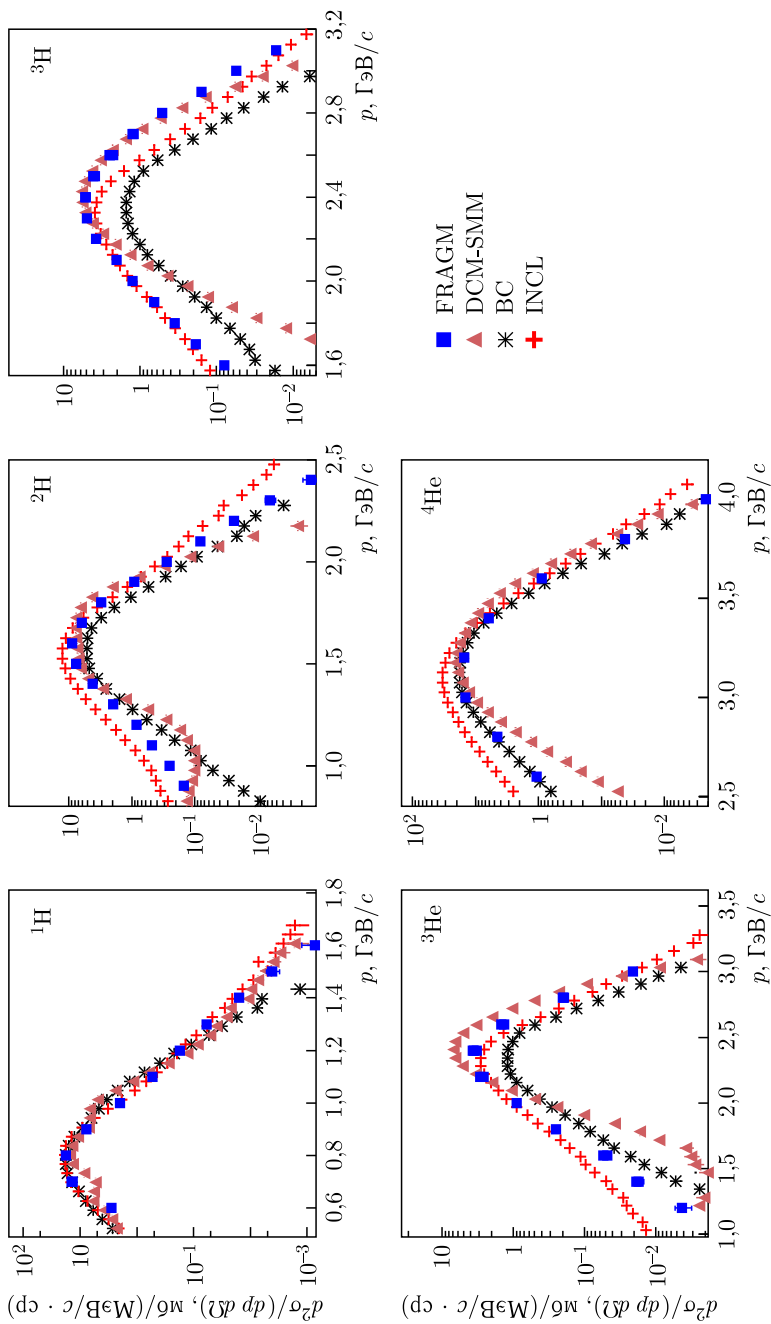


Рис. 1. Дважды дифференциальные сечения $d^2\sigma / (dp d\Omega)$ выхода легких фрагментов под углом $3,5^\circ$ в зависимости от их импульса при фрагментации ^{12}C с энергией 300 МэВ/нуклон на бериллиевой мишени

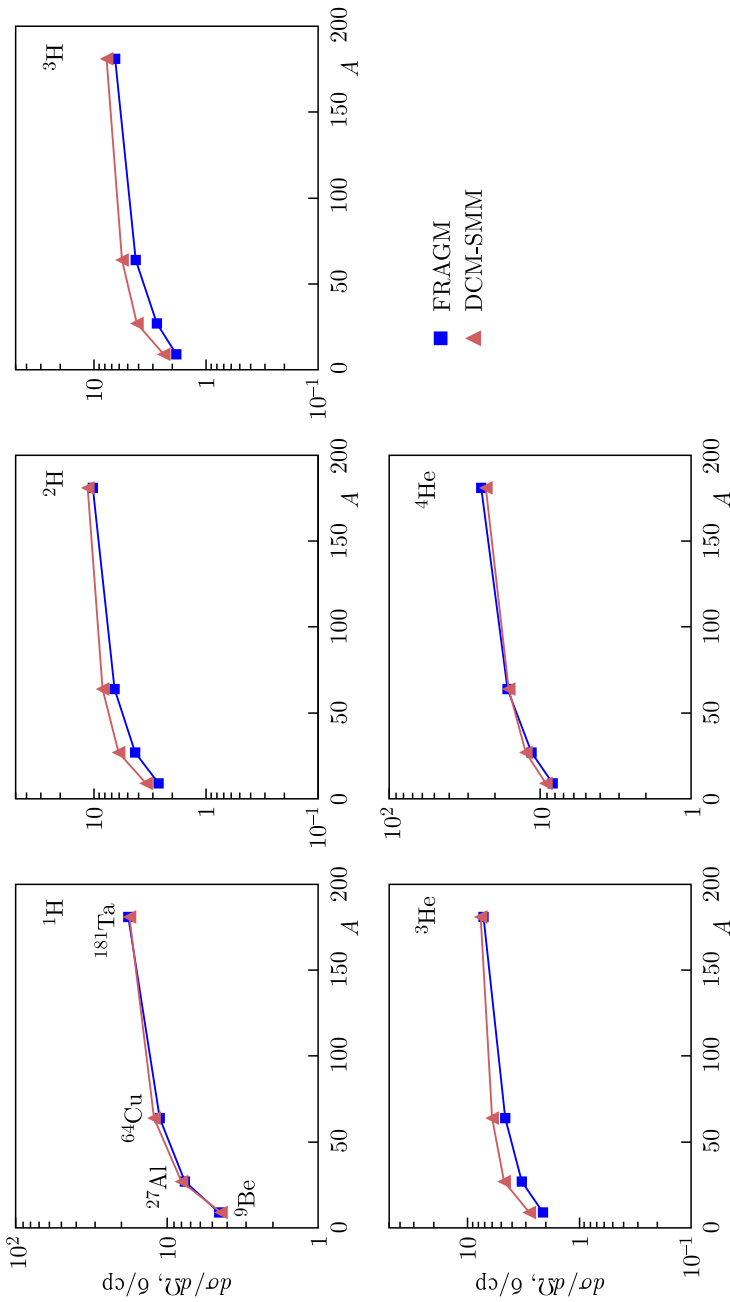


Рис. 2. Дифференциальное сечение $d\sigma/d\Omega$ выхода легких фрагментов под углом $3,5^\circ$ в зависимости от атомного номера ядра-мишени A при фрагментации ^{12}C с энергией 300 МэВ/нуклон

модели в этой области энергий. Следует отметить, что такое согласие наблюдалось для широкого диапазона масс мишеней: от бериллия до тантала. Как отмечалось выше, современные модели ядро-ядерных взаимодействий еще находятся на этапе развития, и хочется надеяться, что проведенный анализ поможет расширению области применимости модели DCM-SMM и ее совершенствованию.

Благодарности. Авторы благодарны в первую очередь Ж. Ж. Мусльманбекову за предоставление компьютерного кода, а также М. Базнату и А. С. Ботвине за многократные обсуждения. Мы также признательны персоналу ускорительного комплекса ТВН и техническому персоналу эксперимента ФРАГМ за большой вклад в проведение измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baznat M., Botvina A., Musulmanbekov G., Toneev V., Zhezher V.* Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2020. V. 17, No. 3. P. 303–324; arXiv:1912.09277 [nucl-th].
2. *Toneev V. D., Gudima K. K.* Particle Emission in Light and Heavy Ion Reactions // *Nucl. Phys. A.* 1983. V. 400. P. 173–190.
3. *Toneev V. D., Amelin N. S., Gudima K. K., Sivoklokov S. Yu.* Dynamics of Relativistic Heavy Ion Collisions // *Nucl. Phys. A.* 1990. V. 519. P. 463–478.
4. *Bondorf J. P., Botvina A. S., Ilinov A. S., Mishustin I. N., Sneppen K.* Statistical Multifragmentation of Nuclei // *Phys. Rep.* 1995. V. 257. P. 133–221.
5. *Trubnikov G., Butenko A., Golovatyuk V., Guskov A., Kapishin M., Kekelidze V., Lednicky R., Meshkov I., Sorin A.* NICA Heavy-Ion Collider at JINR (Dubna). Status of Accelerator Complex and First Physics at NICA // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2023. V. 2586. P. 012013.
6. *Abduln R. et al. (MPD Collab.).* MPD Physics Performance Studies in Bi + Bi Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ GeV // *Revista Mexicana de Fisica.* 2025. V. 71, No. 41201. P. 1–45.
7. *Demanov A. E., Taranenko A. V.* Methods for Centrality Determination in the BM@N Experiment // *Phys. Part. Nucl.* 2025. V. 56. P. 886–890.
8. *Riabov V. G.* Performance of the Trigger System of the MPD Experiment // *Phys. At. Nucl.* 2025. V. 88. P. 297–301.
9. *Azdeev S. P., Busin S. G., Buryakov M. G., Golovatyuk V. M., Malakhov A. I. et al.* Detector for Setting Up Beam Convergence and Determining Luminosity at the Interaction Point on the MPD NICA // *Phys. At. Nucl.* 2023. V. 86. P. 605–617.
10. *Afanasiev S. et al. (BM@N Collab.).* Production of Protons, Deuterons and Tritons in Argon-Nucleus Interactions at 3.2A GeV // *J. High Energy Phys.* 2005. V. 08, No. 095. P. 1–34.
11. *Afanasiev S. et al. (BM@N Collab.).* Production of π^+ and K^+ Mesons in Argon-Nucleus Interactions at 3.2A GeV // *J. High Energy Phys.* 2003. V. 07, No. 174. P. 1–25.
12. *Folger G., Ivanchenko V. N., Wellisch J. P.* The Binary Cascade: Nucleon Nuclear Reaction // *Eur. Phys. J. A.* 2004. V. 21. P. 407–417.

13. *Dudouet J., Cussol D., Durand D., Labalme M.* Benchmarking Geant4 Nuclear Models for Hadron Therapy with 95 MeV/nucleon Carbon Ions // *Phys. Rev. C.* 2014. V. 89. P. 054616; arXiv:1309.1544 [nucl-ex].
14. *Abramov B. M., Alekseev P. N., Borodin Yu. A., Bulychjov S. A., Dukhovskoy I. A., Krutenkova A. P., Kulikov V. V., Martemyanov M. A., Matsyuk M. A., Turdakina E. N., Khanov A. I.* Manifestation of Quark Clusters in the Emission of Cumulative Protons in the Experiment on the Fragmentation of Carbon Ions // *JETP Lett.* 2013. V. 97. P. 439–443; arXiv:1304.6220 [nucl-ex].
15. *Abramov B. M., Alekseev P. N., Borodin Yu. A., Bulychjov S. A., Dukhovskoy I. A., Krutenkova A. P., Kulikov V. V., Martemianov M. A., Matsyuk M. A., Mashnik S. G., Turdakina E. N., Khanov A. I.* Protons from Carbon Ion Fragmentation at 0.3–2.0 GeV/nucleon: Comparison with Models of Ion–Ion Interactions // *Phys. At. Nucl.* 2015. V. 78, No. 3. P. 373–380.
16. *Abramov B. M., Borodin Yu. A., Bulychjov S. A., Dukhovskoy I. A., Krutenkova A. P., Kulikov V. V., Kulikovskaya A. A., Martemianov M. A., Matsyuk M. A., Turdakina E. N.* Ion Identification Using a FRAGM Magnetic Spectrometer // *Phys. At. Nucl.* 2022. V. 85, No. 9. P. 1541–1545.
17. *Mashnik S. G.* Validation and Verification of MCNP6 against Intermediate and High-Energy Experimental Data and Results by Other Codes // *Eur. Phys. J. Plus.* 2011. V. 126. P. 49; arXiv:1011.4978 [nucl-th].
18. *Kulikovskaya A. A., Abramov B. M., Bulychjov S. A., Dukhovskoy I. A., Krutenkova A. P., Kulikov V. V., Martemianov M. A., Matsyuk M. A.* Measurement of the A -Dependence of the Charge-Exchange Reaction (^{12}C , ^{12}B) and Quasi-Elastic Scattering of Carbon Ions at 300 MeV/nucleon // *Phys. Part. Nucl.* 2025. V. 56, Iss. 2. P. 524–527.