

ОПИСАНИЕ НОВЫХ ДАННЫХ КОЛЛАБОРАЦИИ NA61/SHINE ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМ $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ В МОДЕЛИ GEANT4 FTF

А. Галоян¹, А. Рибон², В. Ужинский^{1,}
от имени рабочей группы Geant4 по адронной физике*

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Европейский центр ядерных исследований, Женева

Показано, что модель FTF (FRITIOF), используемая в пакете Geant4 для моделирования адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий при высоких энергиях, хорошо описывает данные коллаборации NA61/SHINE по распределениям π^- -мезонов во взаимодействиях $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ с центральностью 0–5% при $\sqrt{s_{NN}} = 5,2, 6,1, 7,6$ и $8,8$ ГэВ. При более высоких энергиях ($\sqrt{s_{NN}} = 11,9$ и $16,8$ ГэВ) модель недооценивает экспериментальные данные. Это рассматривается как указание на то, что кварк-глюонная плазма образуется в центральных взаимодействиях легких и средних ядер при более высоких энергиях, чем энергия столкновений тяжелых ядер ($\sqrt{s_{NN}} \sim 6$ ГэВ). В настоящее время в модель Geant4 FTF не включено моделирование жестких партон-партонных рассеяний и образование кварк-глюонной плазмы.

It is shown that FTF (FRITIOF) model, used in the Geant4 toolkit for simulations of hadron–hadron, hadron–nucleus and nucleus–nucleus interactions at high energies, describes well the NA61/SHINE collaboration data on π^- -meson distributions in $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ interactions with centralities 0–5% at $\sqrt{s_{NN}} = 5.2, 6.1, 7.6$ and 8.8 GeV. At higher energies, $\sqrt{s_{NN}} = 11.9$ and 16.8 GeV, the model underestimates the experimental data. This is considered as an indication of the formation of the quark–gluon plasma (QGP) at higher energies in the central collisions of light and intermediate nuclei than in collisions of heavy nuclei ($\sqrt{s_{NN}} \sim 6$ GeV). At the moment, simulations of the hard parton–parton scatterings and the formation of the quark–gluon plasma are not included in the Geant4 FTF model.

PACS: 24.10.Lx; 13.85.Ni; 14.20.–c

ВВЕДЕНИЕ

Недавно были опубликованы [1] экспериментальные данные коллаборации NA61/SHINE по рождению π^- -мезонов в центральных взаимодействиях $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ при импульсах налетающих ядер от $13A$

* E-mail: uzhinsky@jinr.ru

до 150А ГэВ/с. В коллаборации проведены сравнения этих результатов с данными расчетов по моделям EPOS [2], UrQMD [3, 4] и HIJING [5, 6]. Как было показано коллаборацией, модели EPOS и UrQMD дают удовлетворительное описание экспериментальных данных только при начальном импульсе 150А ГэВ/с [1]. При меньших энергиях модель EPOS переоценивает распределения по быстротам π^- -мезонов при $y \sim 0$, а модель UrQMD недооценивает экспериментальные данные. Как будет показано ниже, модель Geant4 FTF хорошо воспроизводит экспериментальные данные, за исключением данных при импульсе 75А и 150А ГэВ/с.

Модель Geant4 FTF основана на хорошо известной модели FRITIOF [7, 8], которая широко применялась для моделирования адрон-нуклонных, адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий. В модели FRITIOF предполагается, что все нуклон-нуклонные взаимодействия являются бинарными реакциями с образованием резонансов и возбужденных нуклонов в конечных состояниях. Распределение по квадратам масс возбужденных нуклонов является ключевым ингредиентом модели. Мы параметризовали распределение в виде $a/M_x^2 + b$ *.

Возбужденные нуклоны рассматриваются как кварк-глюонные струны, при фрагментации которых рождаются адроны. Для моделирования фрагментации струн используется алгоритм LUND [9, 10] (Jetset 6.2), имплементированный в пакет Geant4 **.

Модель Geant4 FTF рассматривает дифракционную диссоциацию в состоянии с большой массой, процессы с кварковыми обменами и недифракционные взаимодействия. Феноменологические параметризации соответствующих сечений имплементированы в Geant4 (см. детали в Geant4 Physics Reference Manual [12]). Для моделирования ядро-ядерных взаимодействий мы применяем глауберовскую аппроксимацию [13, 14]. Ферми-движение ядерных нуклонов учитывается в соответствии с методом работ [15, 16]. Точная настройка параметров модели FTF была осуществлена с использованием данных NA61/SHINE по pp -взаимодействиям при различных энергиях [17].

Результаты расчетов по модели FTF для распределений по быстротам (dn/dy) π^- -мезонов во взаимодействиях $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ представлены

* $a = c / \ln(M_{x,\text{max}}^2 / M_{x,\text{min}}^2)$, $b = (1 - c) / (M_{x,\text{max}}^2 - M_{x,\text{min}}^2)$, $c = 0,55$ для недифракционных взаимодействий. $M_{x,\text{min}}^2$ и $M_{x,\text{max}}^2$ — минимальные и максимальные значения квадратов масс, разрешенные кинематикой реакций. Для процессов одновершинной дифракционной диссоциации $c = 1$. В расчетах использовалась переменная светового конуса ($P^- = E - P_z$) вместо M_x^2 .

** Пакет Geant4 [11] применяется для моделирования прохождения частиц через вещество. Он позволяет оценить отклики детекторов, поэтому используется многими экспериментальными группами во всем мире и, в частности, коллаборациями на Большом адронном коллайдере для проектирования, калибровки и изучения работы детекторов.

на рис. 1 вместе с экспериментальными данными для центральныхностей 0–5%. Коллаборация NA61/SHINE применяет PSD (Projectile Spectator Detector) для отбора центральных взаимодействий. Не имея точного геометрического описания PSD, мы выбрали диапазон параметра соударения 0–1,96 Фм для воспроизведения высоты распределения по быстротам

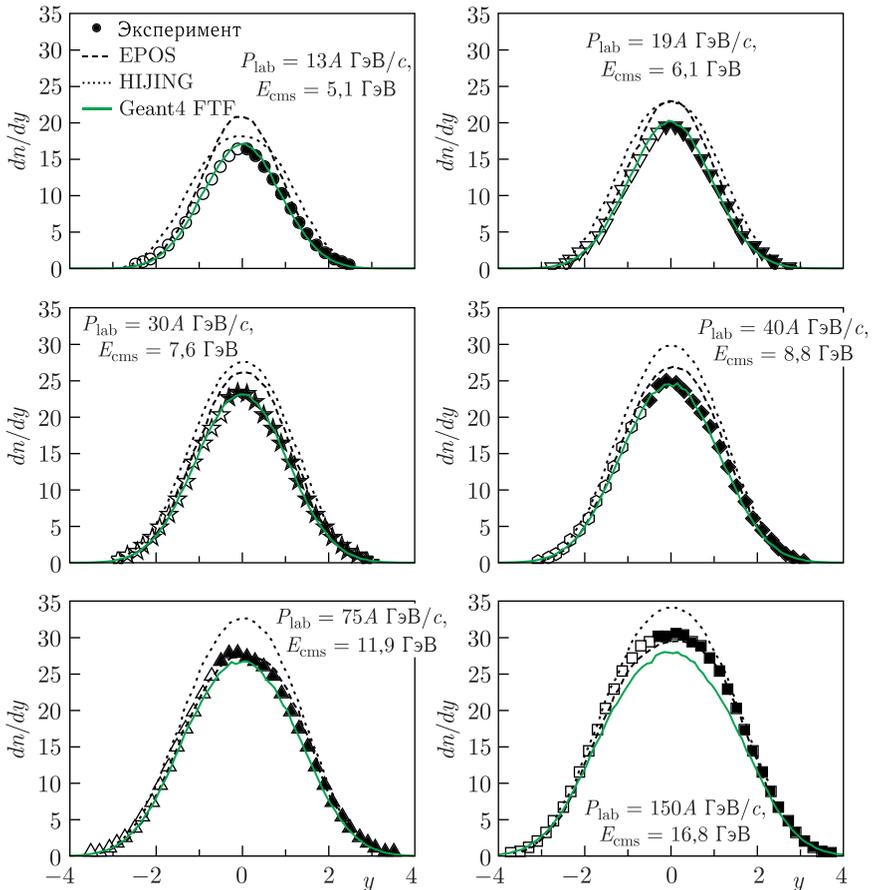


Рис. 1. Распределения по быстротам (dn/dy) π^- -мезонов для шести импульсов пучков. Черные точки — данные, измеренные коллаборацией NA61/SHINE для центральныхностей 0–5%. Светлые точки — значения, экстраполированные коллаборацией в неизмеренную область. Все экспериментальные ошибки меньше, чем размеры символов. Расчеты по моделям EPOS и HIJING [1] показаны штриховой и пунктирной линиями соответственно. Результаты модели Geant4 FTF показаны сплошной линией

при 19А ГэВ/с. Как видно из рис. 1, мы описываем достаточно хорошо dn/dy π^- -мезонов при импульсах пучков 13А, 30А и 40А ГэВ/с. При более высоких импульсах налетающих ядер мы недооцениваем экспериментальные данные.

Из рис. 1 видно, что модель HIJING переоценивает экспериментальные данные при всех энергиях. Однако удовлетворительное описание может быть достигнуто уменьшением результатов HIJING на 10–15%. Простейшим способом уменьшения результатов модели является увеличение вероятности одновершинной дифракционной диссоциации в нуклон-нуклонных взаимодействиях, как это было предложено в работе [18]. В этом случае данные NA61/SHINE по pp -взаимодействиям [17] хорошо воспроизводятся [18]. Имеются также дополнительные возможности улучшения результатов модели HIJING [19].

Мы не нашли простой способ улучшения результатов модели EPOS при низких энергиях.

Модель FTF не рассматривает жесткие взаимодействия и формирование кварк-глюонной плазмы (КГП). Этим можно объяснить отклонение результатов модели FTF от данных при импульсах 75А и 150А ГэВ/с. При столкновениях тяжелых ионов формирование КГП, возможно, имеет место при $\sqrt{s_{NN}} \simeq 6-7$ ГэВ [20, 21]. Мы ожидали, что отклонение результатов FTF от данных по взаимодействиям $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ будет начинаться также при $\sqrt{s_{NN}} \sim 6-7$ ГэВ. Однако этого не произошло. Поэтому мы интерпретируем наши результаты как указание на то, что формирование кварк-глюонной плазмы при столкновениях легких и промежуточных ядер имеет место при более высоких энергиях, чем энергия столкновений тяжелых ядер. Было бы интересно проверить эту гипотезу, используя данные NA61/SHINE по взаимодействиям $^7\text{Be} + ^9\text{Be}$.

Проанализируем распределения π^- -мезонов, рожденных во взаимодействиях $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$, по поперечным импульсам p_T . На рис. 2 приведены экспериментальные данные NA61/SHINE в сравнении с расчетами по моделям EPOS и HIJING, полученными коллаборацией. Видно, что модель FTF хорошо описывает распределения при импульсах 13А, 19А, 30А, 40А и 75А ГэВ/с. Модели EPOS и HIJING переоценивают, прежде всего, среднее p_T рожденных частиц при $P_{\text{аб}} < 150\text{А}$ ГэВ/с. Только при начальном импульсе 150А ГэВ/с расчеты по модели EPOS близки к экспериментальным данным. При этом импульсе пучка результаты модели FTF заметно ниже экспериментальных данных при $p_T \leq 0,5$ ГэВ/с. Здесь, возможно, есть место для рождения частиц КГП.

Как видно из рис. 3, модель FTF недооценивает хвосты распределений для начальных импульсов 75А и 150А ГэВ/с при $p_T \geq 0,6$ ГэВ/с. Эта недостача связана с отсутствием жестких процессов в модели FTF.

Модель HIJING рассматривает жесткие и полужесткие взаимодействия, но, по-видимому, эти процессы «включаются» слишком рано — начиная с 19А ГэВ/с. Только при 150А ГэВ/с расчеты по модели согласуются с экспериментальными данными. Поэтому было бы хорошо

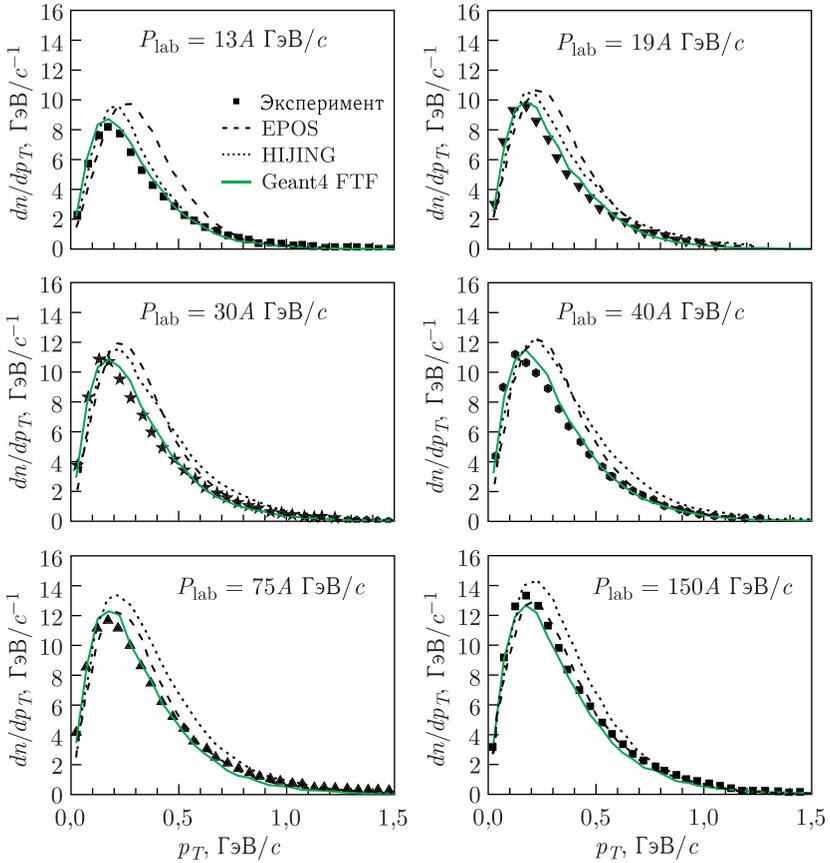


Рис. 2. Распределения по поперечному импульсу π^- -мезонов dn/dp_T в центральной области быстрот ($0 < y < 0,2$) для шести импульсов пучков. Точки — экспериментальные данные коллаборации NA61/SHINE для центральностей 0–5%. Все экспериментальные ошибки меньше, чем размеры символов. Расчеты по моделям EPOS и HIJING, взятые из [1], показаны штриховой и пунктирной линиями соответственно, результаты модели Geant4 FTF — сплошной линией

улучшить энергетическую зависимость этих процессов в модели. При этом также уменьшится общая множественность рожденных частиц.

Модель EPOS хорошо описывает данные по p_T при начальных импульсах 75A и 150A ГэВ/с. При меньших импульсах модель описывает данные только при $p_T \geq 800$ МэВ/с. Поэтому мы полагаем, что энергетическая зависимость жестких и полужестких процессов корректно воспроизводится в этой модели. Мягкие взаимодействия играют большую роль

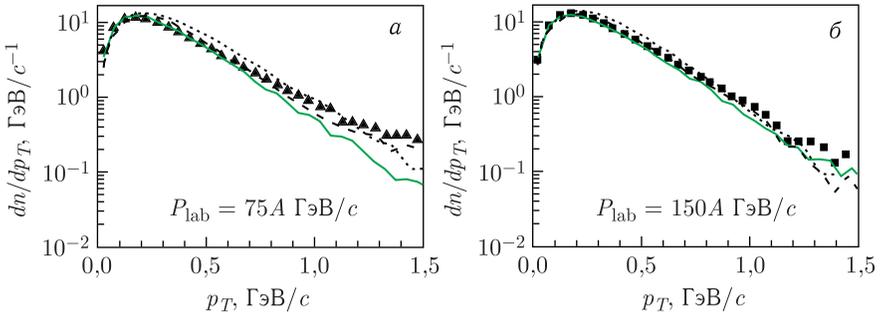


Рис. 3. Распределения по поперечному импульсу π^- -мезонов dn/dp_T в центральной области быстрот ($0 < y < 0,2$) для импульсов пучков 75A (а) и 150A (б) ГэВ/с. Точки — экспериментальные данные коллаборации NA61/SHINE для центральностей 0–5%. Все экспериментальные ошибки меньше, чем размеры символов. Расчеты по моделям EPOS и HIJING, взятые из [1], показаны штриховой и пунктирной линиями соответственно, результаты модели Geant4 FTF — сплошной линией

при малых p_T ($p_T < 800$ МэВ) и меньших импульсах налетающих ядер. Желательно улучшить фрагментацию мягких струн в модели EPOS, как мы это сделали в модели Geant4 FTF.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Детальные расчеты по модели Geant4 FTF хорошо согласуются с экспериментальными данными по распределениям по быстройтам и поперечным импульсам π^- -мезонов, рожденных во взаимодействиях $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ при $\sqrt{s_{NN}} < 10$ ГэВ, полученными коллаборацией NA61/SHINE.

2. При более высоких энергиях модель FTF недооценивает dn/dy и хвосты распределений dn/dp_T . Эти расхождения могут быть компенсированы при включении жестких процессов и формировании КТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acharya A. et al. (NA61/SHINE Collab.) // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81. P. 397.
2. Werner K., Liu F.-M., Pierog T. // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 044902.
3. Bass S. A. et al. // Prog. Part. Nucl. Phys. 1998. V. 41. P. 255.
4. Bleicher M. et al. // J. Phys. G. 1999. V. 25. P. 1859.
5. Wang X.-N., Gyulassy M. // Phys. Rev. D. 1991. V. 44. P. 3501.
6. Gyulassy M., Wang X.-N. // Comput. Phys. Commun. 1994. V. 83. P. 307.
7. Andersson B., Gustafson G., Nilsson-Almqvist B. // Nucl. Phys. B. 1987. V. 281. P. 289.
8. Nilsson-Almqvist B., Stenlund E. // Comput. Phys. Commun. 1987. V. 43. P. 387.

9. *Andersson B., Gustafson G., Ingelman G., Sjostrand T.* // Phys. Rep. 1983. V.97. P.31.
10. *Sjostrand T.* // Comput. Phys. Commun. 1986. V.39. P.347.
11. *Allison J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V.835. P.186.
12. <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/index.html>
13. *Glauber R.* Lectures in Theoretical Physics. V.1. New York: Intersci. Publ., 1959.
14. *Shmakov S. Yu., Uzhinski V. V., Zadorojny A. M.* // Comput. Phys. Commun. 1989. V.54. P.125.
15. *Adamovich M. I. et al.* // Z. Phys. A. 1997. V.385. P.331.
16. *Abdel-Waged Kh., Felemban N.* // Phys. Rev. C. 2015. V.91. P.034908.
17. *Aduszkiewicz A. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2017. V.77. P.671.
18. *Galoyan A. S., Uzhinsky V. V.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2020. V.84. P.446.
19. *Abdel-Waged Kh., Felemban N.* // J. Phys. G. 2020. V.47. P.065104.
20. *Afanasyev S. V. et al.* // Phys. Rev. C. 2002. V.66. P.054902.
21. *Alt C. et al.* // Phys. Rev. C. 2008. V.77. P.02490.