

УДК 53.01

## ОПИСАНИЕ ДАННЫХ КОЛЛАБОРАЦИИ NA61/SHINE О РОЖДЕНИИ СТРАННЫХ ЧАСТИЦ В $pp$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ В МОДЕЛИ GEANT4 FTF

© 2023 г. В. В. Ужинский<sup>1</sup>, \*, А. С. Галоян<sup>1</sup> от имени адронной рабочей группы Geant4

<sup>1</sup>Международная межправительственная организация  
“Объединенный институт ядерных исследований”, Дубна, Россия

\*E-mail: uzhinsky@jinr.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Обсуждаются последние данные коллаборации NA61/SHINE о рождении  $K^{*0}$  и  $\phi$  мезонов,  $\Xi^-$  и  $anti-\Xi^+$  гиперонов в  $pp$  взаимодействиях при  $P_{lab}$  от 40 до 158 ГэВ  $\cdot$  с<sup>-1</sup>. Как было показано ранее в экспериментальных работах монтекарловские модели – EPOS 1.99, UrQMD 3.4 и Pythia 6, не могут описать данные достаточно хорошо. В настоящей работе выходы частиц анализируются в рамках модели Geant4 FTF. Достигнуто хорошее описание экспериментальных данных.

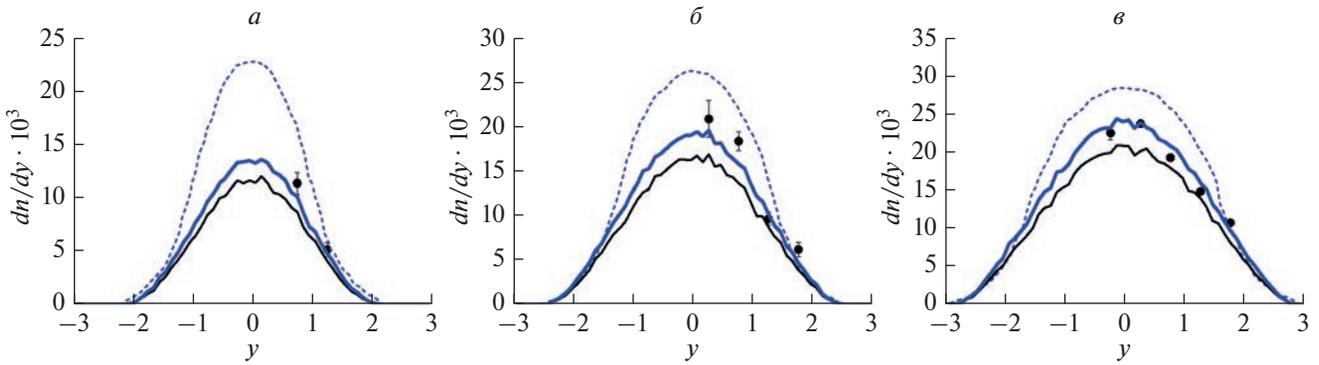
DOI: 10.31857/S0367676523702046, EDN: ZCCICV

Недавно коллаборация NA61/SHINE опубликовала [1–3] экспериментальные данные о рождении векторных мезонов –  $\phi(1020)$  и  $K^{*0}(892) + anti-K^{*0}(892)$  (ссылаемых далее как  $K^{*0}$ ), в  $pp$  взаимодействиях при импульсах пучков в лабораторной системе ( $P_{lab}$ ) 40, 80 и 158 ГэВ  $\cdot$  с<sup>-1</sup>. Также были опубликованы данные о  $\Xi^-$  и  $anti-\Xi^+$  гиперонах при  $P_{lab} = 158$  ГэВ  $\cdot$  с<sup>-1</sup> [4]. Коллаборация сравнила данные с предсказаниями модели EPOS 1.99 [5, 6] для инклюзивных распределений частиц. Данные для мезонов и некоторые модельные расчеты, выполненные коллаборацией, представлены на рис. 1. Как видно, модель EPOS существенно переоценивает данные в центральной области. Сравнение предсказаний моделей (EPOS 1.99 [5, 6], UrQMD 3.4 [7, 8] и Pythia 6 [9]) о полных выходах частиц см. в экспериментальных работах [1–4]. Мы проанализируем данные в рамках модели Geant4 FTF. Все модели предполагают создание и фрагментацию кварковых струн. Они, в основном, отличаются механизмом создания струн, однако фрагментация струн примерно одинакова.

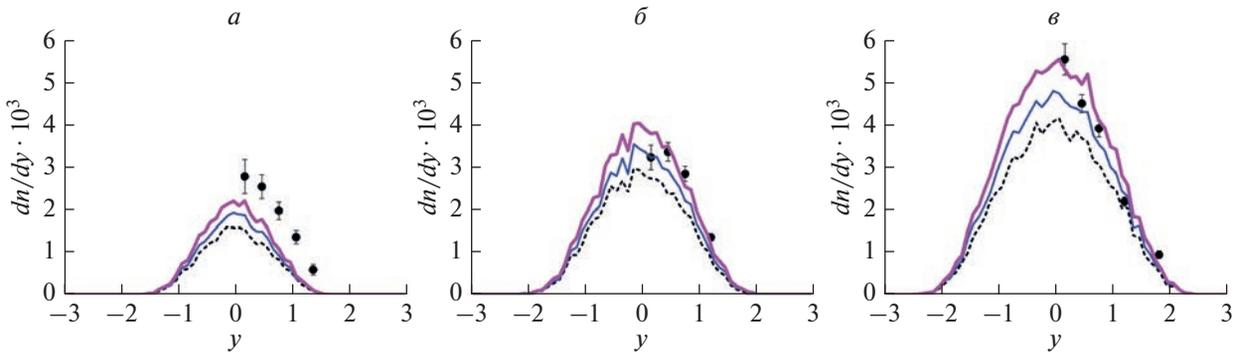
Geant4 является хорошо известным пакетом программ для моделирования прохождений частиц в веществе, который используется во многих высокоэнергетических экспериментах [10–12]. В Geant4 есть модель FTF (Fritiof), отвечающая за моделирование элементарных взаимодействий. Поэтому очень важно для различных приложений иметь хорошее описание экспериментальных дан-

ных в рамках модели FTF. Цель может быть достигнута “подгонкой” параметров модели. Мы используем последнюю версию Geant4 – 11.0, как основной вариант.

С теоретической точки зрения выход  $K^{*0}$  мезонов пропорционален вероятности рождения пары странный кварк – странный антикварк из вакуума при фрагментации кварков или дикварков ( $P_{s\ anti-s}$ ), и вероятности рождения векторных мезонов –  $P_{vec}$ . Численные значения вероятностей неизвестны для модели EPOS. В классической работе Р.Д. Филда и Р.П. Фейнмана [13] было предложено что  $P_{s\ anti-s}$  и  $P_{vec}$  равны 20 и 50%, соответственно. В знаменитой модели Pythia 6.4 [9] они равны 13 и 60% для мезонов с  $s$ -кварками.  $P_{vec} = 0.5$  для нестранных мезонов. Обоснований для этого выбора не было дано. В модели Geant4 FTF мы выбрали асимптотическое значение  $P_{s\ anti-s} = 12\%$  при описании рождения  $K^\pm$  мезонов в  $pp$  взаимодействиях, и  $P_{vec} = 0.5$  (для всех мезонов). FTF расчеты с этими значениями показаны на рис. 1 тонкими сплошными линиями. Как видно, в этом случае мы недооцениваем данные. Выбирая  $P_{vec} = 0.6$  для всех мезонов, мы получаем хорошие результаты (см. толстые сплошные кривые на рис. 1). Наши результаты при  $P_{lab} = 158$  ГэВ  $\cdot$  с<sup>-1</sup> очень близки к результатам EPOS. Это указывает на то, что в модели EPOS  $P_{vec}$  порядка 3/4 (максимальное допустимое значение). При нашем выборе  $P_{vec} = 0.6$  мы переоцениваем рождение  $\pi^\pm$  мезонов в  $pp$  взаимодействиях. Поэтому



**Рис. 1.** Быстротные распределения,  $dn/dy$ ,  $K^{*0}$  мезонов в  $pp$  взаимодействиях для трех импульсов пучка  $P_{lab} = 40, 80$  and  $158 \text{ ГэВ} \cdot \text{с}^{-1}$  (а, б, в, соответственно). Черные точки – данные, представленные коллаборацией NA61/SHINE, со статистическими ошибками [2, 3]. Пунктирные кривые – предсказания модели EPOS, полученные коллаборацией. Предсказания модели Geant4 FTF при  $P_{Vec} = 0.5$  (для всех мезонов) и  $0.6$  (только для странных мезонов) показаны тонкими и толстыми сплошными линиями, соответственно.



**Рис. 2.** Быстротные распределения,  $dn/dy$ ,  $\phi$  мезонов для трех импульсов пучка ( $40, 80$  и  $158 \text{ ГэВ} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Черные точки – данные коллаборации NA61/SHINE только со статистическими ошибками [1]. Предсказания модели Geant4 FTF при  $P_{Vec} = 0.5, 0.6$  и  $0.7$  (только для  $\phi$  мезонов) показаны пунктирной кривой, тонкими и толстыми сплошными кривыми, соответственно.

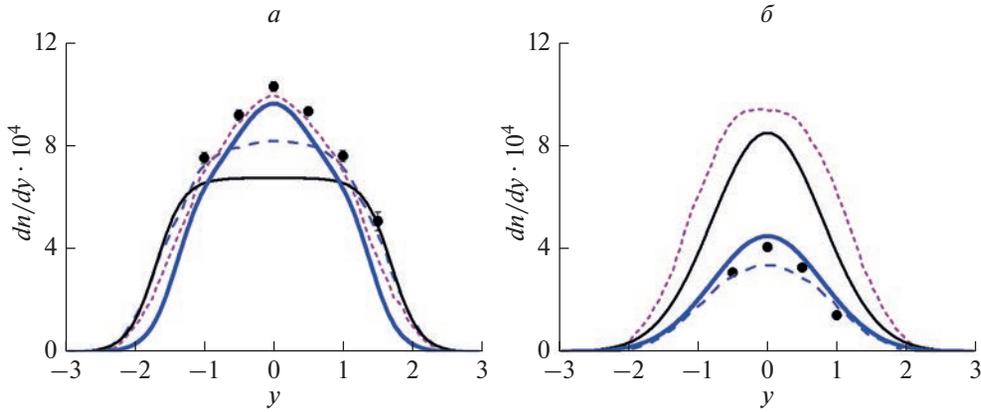
мы используем  $P_{Vec} = 0.6$  только для мезонов с одним странным кварком или антикварком. Аналогичный подход используется в модели Pythia 6.4 (см. [9], стр. 490, параметры PARJ(11), PARJ(12) и PARJ(13)).

Слабая энергетическая зависимость результатов EPOS показывает, что возможно в модели нет энергетической зависимости  $P_{s \text{ anti-}s}$ . Очевидно, что  $P_{s \text{ anti-}s}$  должно зависеть от массы струны. Если масса меньше двух масс  $K$ -мезона, рождение странных мезонов невозможно,  $P_{s \text{ anti-}s} = 0$ . Поэтому мы ввели зависимость  $P_{s \text{ anti-}s}$  от массы струны:

$P_{s \text{ anti-}s} = P_{s \text{ anti-}s}^{\text{asym}} [1 - (M_{th}/M_{str})^{2.5}]$ , которая приводит к энергетической зависимости рождения  $K$ -мезонов. Здесь  $P_{s \text{ anti-}s}^{\text{asym}} = 12\%$  – асимптотическое значение,  $M_{th}$  пороговая масса порядка  $1.25 \text{ ГэВ}$ , а  $M_{str}$  – масса струны.

Предложенное значение параметра ( $P_{Vec}$ ) не позволяет удовлетворительно описать рождение  $\phi$  мезонов. Тем не менее, посредством изменения значения  $P_{Vec}$  на  $0.7$  для мезонов с странными кварками и антикварками ( $\phi$ ), согласие с экспериментом может быть улучшено (см. рис. 2).

Как видно, наша модель Geant4 FTF недооценивает только данные при  $P_{lab} = 40 \text{ ГэВ} \cdot \text{с}^{-1}$ . В настоящий момент неясно, что необходимо сделать для устранения недостатка? Увеличение вероятности рождения векторных мезонов приведет к переоценке данных при высоких энергиях. Тот же результат может быть получен при увеличении  $P_{s \text{ anti-}s}$ . Дополнительно к этому, так же увеличится выход  $K^\pm$  мезонов. Возможно необходимо рассмотреть альтернативный механизм рождения  $\phi$  мезона при низких энергиях. Конечно, не ис-



**Рис. 3.** Быстротные распределения  $\Xi^-$  и  $anti-\Xi^+$  гиперонов при импульсе пучка  $P_{lab} = 158 \text{ ГэВ} \cdot \text{с}^{-1}$  (а и б, соответственно). Черные точки – данные коллаборации NA61/SHINE только со статистическими ошибками [4]. Предсказания стандартной модели Geant4 FTF показаны тонкими сплошными линиями. Толстая сплошная кривая для  $\Xi^-$  гиперонов показывает результаты с фрагментационной функцией  $f(z) \sim (1-z)^\alpha$ . Аналогичная кривая для  $anti-\Xi^+$  гиперонов была получена, предполагая реаранжировку странных кварков и странных антикварков в последнем распаде дикварк – анти-дикварковых струн. Линии с коротким штрихом – предсказания модели UrQMD. Линии с длинными штрихами показывают результаты EPOS.

ключено, что соответствующие экспериментальные данные могут измениться.

Более сложная ситуация имеет место при описании данных по  $\Xi^-$  и  $anti-\Xi^+$  гиперонам при  $P_{lab} = 158 \text{ ГэВ} \cdot \text{с}^{-1}$ , показанным на рис. 3. Как видно, модель EPOS недооценивает рождение гиперонов в центральной области. Модель UrQMD хорошо описывает выход  $\Xi^-$  и существенно переоценивает выход  $anti-\Xi^+$ . Предсказания модели Geant4 FTF для  $anti-\Xi^+$  близки к предсказаниям UrQMD. Детальный анализ показывает, что  $anti-\Xi^+$  гипероны в основном рождаются в последнем распаде  $ss-anti-s anti-s$  струн в модели Geant4 FTF.

В модели Fritiof (FTF) [14, 15] предполагается, что две кварк – дикварковые струны рождаются в неупругих  $pp$  взаимодействиях при достаточно высоких энергиях. Струны фрагментируют в адроны. Струны с малой массой в конце фрагментационного процесса распадаются в два адрона. Это имеет место в моделях UrQMD и Geant4 FTF. Более сложная гипотеза используется в модели EPOS.

В последнем распаде кварк-анти-кварковой струны рождаются два мезона  $-q + anti-q \rightarrow M_1(q anti-q_s) + M_2(q_s anti-q)$ , где  $q_s$  and  $anti-q_s$  пара морских кварка и анти-кварка, созданная из вакуума в поле струны. Мезон ( $M$ ) может быть псевдоскаляром или векторным мезоном. В последнем распаде кварк – дикварковой струны рождаются барион ( $B$ ) и мезон  $-q_1 + q_2 q_3 \rightarrow M(q_1 anti-q_s) + B(q_s q_2 q_3)$ . Могут быть две возможности при моделировании последнего распада анти-дикварк – дикварковой струны: а)  $anti-q_1 anti-q_2 + q_3 q_4 \rightarrow anti-B(anti-q_1 anti-q_2 anti-q_s) +$

$+ B(q_s q_3 q_4)$ ; б) (реаранжировка)  $anti-q_1 anti-q_2 + q_3 q_4 \rightarrow M_1(anti-q_1 q_3) + M_2(anti-q_2 q_4)$ . Процесс "а" позволяет рождение двух барионов, например, при  $anti-p p$  аннигиляции. Он "работает" достаточно хорошо для всех других адронных реакций. Однако, для описания рождений  $anti-\Xi^+$  гиперонов мы должны предполагать только процесс "б" для последнего распада струны с дважды странным дикварком и дважды странным анти-дикварком:  $anti-s_1 anti-s_2 + s_3 s_4 \rightarrow M_1(anti-s_1 s_3) + M_2(anti-s_2 s_4)$ . Результат этого предположения можно видеть на рис. 3б.

Если гипотеза верна, мы можем ожидать, что в  $pp$  взаимодействиях в событиях рождаются два близких  $\phi$  мезонов. Альтернативной гипотезой рождения двух  $\phi$  мезонов может быть коррелированное создание пар  $s anti-s$  из вакуума. Мы надеемся, что будущие экспериментальные исследования прольют свет на этот предмет.

Форма быстротного спектра  $\Xi^-$  зависит от функций фрагментации. Достаточно сложно изменить эти функции, используя стандартные возможности LUND алгоритма фрагментации струн [16], реализованного в моделях UrQMD и Geant4 FTF. Поэтому мы использовали для фрагментации дикварков в барионы предписание модели кварк-глюонных струн (QGSM) [17–19], а именно,  $f(z) \sim z^\alpha$ . Для фрагментации дикварков в  $\Xi^-$  мы должны использовать функцию  $f(z) \sim (1-z)^\alpha$ , которая позволяет получить горб в центральной области быстрот.

Можно достичь хорошего описания экспериментальных данных по рождению векторных мезонов в  $pp$  взаимодействиях подгонкой основных

параметров модели фрагментации струн –  $P_{s\text{-anti-}s}$  and  $P_{\text{vec}}$ , по крайней мере в Geant4 FTF модели. Для описания  $\Xi^-$  и  $\text{anti-}\Xi^+$  гиперонных данных необходимо более точно определить фрагментацию струн в гипероны.

Авторы благодарны М.А. Иванову (БЛТФ, ОИЯИ) и А. Рибону за полезные обсуждения работы. Авторы также благодарны команде гетерогенных вычислений ЛИТ ОИЯИ (HybriLIT) за поддержку вычислений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aduszkiewicz A., Andronov E.V., Antićić T. et al. (NA61/SHINE Collaboration) // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80. P. 199.*
2. *Aduszkiewicz A., Andronov E.V., Antićić T. et al. (NA61/SHINE Collaboration) // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80. P. 460.*
3. *Acharya A., Adhikary H., Allison K.K. et al. (NA61/SHINE Collaboration) // Eur. Phys. J. C. 2022. V. 82. P. 322.*
4. *Aduszkiewicz A., Andronov E.V., Antićić T. et al. (NA61/SHINE Collaboration) // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80. P. 833.*
5. *Werner K., Liu F.-M., Pierog T. // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. Art. No. 044902.*
6. *Pierog T., Werner K. // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2009. V. 196. P. 102.*
7. *Bass S.A., Belkacem M., Bleicher M. et al. // Prog. Part. Nucl. Phys. 1998. V. 41. P. 255.*
8. *Bleicher M., Zabrodin E., Spieles C. et al. // J. Phys. G. 1999. V. 25. P. 1859.*
9. *Sjostrand T., Mrenna S., Skands P.Z. // JHEP. 2006. V. 05. P. 026.*
10. *Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 506. P. 250.*
11. *Allison T., Amako K., Apostolakis J. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53. P. 270.*
12. *Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. (Geant4 Collaboration) // Nucl. Instrum. Meth. A. 2016. V. 835. P. 186.*
13. *Field R.D., Feynman R.P. // Nucl. Phys. B. 1978. V. 136. P. 1.*
14. *Andersson B., Gustafson G., Nilsson-Almqvist B. // Nucl. Phys. B. 1987. V. 281. P. 289.*
15. *Nilsson-Almqvist B., Stenlund E. // Comput. Phys. Commun. 1987. V. 43. P. 387.*
16. *Andersson B., Gustafson G., Ingelman G., Sjostrand T. // Phys. Reports. 1983. V. 97. P. 31.*
17. *Kaidalov A.B. // Phys. Lett. 1982. V. 116B. P. 459.*
18. *Kaidalov A.B., Ter-Martirosian K.A. // Phys. Lett. 1982. V. 117B. P. 247.*
19. *Kaidalov A.B., Piskunova O.I. // Z. Phys. C. 1986. V. 30. P. 145.*

## Geant4 FTF model description of the NA61/SHINE collaboration data on strange particle production in $pp$ -interactions

V. V. Uzhinsky<sup>a, \*</sup>, A. S. Galoyan<sup>a</sup> on behalf of Geant4 hadronic working group

<sup>a</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

\*e-mail: uzhinsky@jinr.ru

The latest data by the NA61/SHINE collaboration on inclusive distributions of  $K^*0$  and  $\phi$  meson's,  $\Xi^-$  and  $\text{anti-}\Xi^+$  hyperon's production in  $pp$  interactions at  $P_{\text{lab}}$  from 40 up to 158 GeV/c are considered. As it was shown before in experimental papers, Monte Carlo models – EPOS 1.99, UrQMD 3.4 and Pythia 6, cannot describe reasonably well the data. In the presented paper, the yields of the particles are analyzed within the framework of the Geant4 FTF model. A good description of the experimental data has been reached.