

КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ МНОЖЕСТВЕННОСТЬЮ И ПОПЕРЕЧНЫМ ИМПУЛЬСОМ В pp -, p -Pb- И Pb-Pb-СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ БАК В ДИПОЛЬНОЙ МОНТЕ-КАРЛОВСКОЙ МОДЕЛИ СО СЛИЯНИЕМ СТРУН

В. Н. Коваленко *

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследуются корреляции между множественностью и поперечным импульсом в pp -, p -Pb- и Pb-Pb-столкновениях при энергиях БАК в рамках партонно-струнной монте-карловской модели, в которой элементарные соударения реализованы как взаимодействия цветных диполей. Анализируется вклад различных механизмов в корреляционную функцию $\langle p_T \rangle_{N_{ch}} - N_{ch}$.

The correlation between the mean transverse momentum and multiplicity of charged particles is studied in the framework of string-parton Monte Carlo model, in which the elementary collisions are realized by interactions of color dipoles. The contribution of different mechanisms to $\langle p_T \rangle_{N_{ch}} - N_{ch}$ correlation is analyzed.

PACS: 13.85.-t; 25.40.Fq; 25.75.Gz

ВВЕДЕНИЕ

Протон-протонные и протон-ядерные столкновения традиционно рассматривались в качестве базовых систем для изучения свойств кварк-глюонной плазмы, образующейся на ускорителях тяжелых ионов, в связи с тем, что в данных процессах не ожидалось значительные коллективные эффекты, связанные с образованием горячей и плотной кварк-глюонной материи. Однако недавно полученные на Большом адронном коллайдере (БАК) результаты продемонстрировали ряд коллективных явлений в протон-протонном рассеянии, а величины азимутальных потоков в p -Pb-столкновениях оказались сравнимыми по величине с потоками в системе свинец-свинец.

*E-mail: v.kovalenko@spbu.ru

В частности, в эксперименте ALICE была измерена корреляция между средним поперечным импульсом и множественностью заряженных частиц в pp -, p -Pb- и Pb-Pb-столкновениях на БАК [1]. Результаты показали достаточно сильную корреляцию $\langle p_T \rangle_{N_{ch}} - N_{ch}$ в pp - и p -Pb-столкновениях, которую трудно объяснить в рамках существующих моделей.

В данной работе исследуется корреляционная функция $\langle p_T \rangle_{N_{ch}} - N_{ch}$ в рамках струнно-партонной монте-карловской модели [2, 3]. Результаты сравниваются с данными эксперимента ALICE [1] и проводится анализ физических эффектов, которые могут давать вклад в корреляции $\langle p_T \rangle_{N_{ch}} - N_{ch}$.

МОДЕЛЬ

Монте-карловская модель [2, 3] основана на партонной картине нуклонного взаимодействия. В данной модели учитывается сохранение энергии и момента импульса в начальном состоянии и используется дипольный подход [4, 5] для описания элементарных партонных столкновений. Множественность и поперечный импульс рождающихся частиц вычисляются в рамках модели цветных струн, натягивающихся между партонами снаряда и мишени. Взаимодействие между струнами осуществляется в соответствии с предписаниями модели слияния струн [6, 7], согласно которой средняя множественность μ и средний поперечный импульс p_T частиц, рождающихся из кластера k перекрывающихся струн, выражаются через соответствующие величины для одной струны (μ_1, p_{T_1}) следующим образом:

$$\mu = \sqrt{k}\mu_1, \quad p_T = \sqrt[4]{k}p_{T_1}. \quad (1)$$

Для реализации модели слияния струн мы применяли дискретный подход [8], в котором используется решетка с площадью ячейки, равной поперечной площади струны πr_{str}^2 . Струны считаются слившимися, если их центры в поперечной плоскости лежат в одной и той же ячейке. Стоит отметить, что величина r_{str} (поперечный радиус струны) характеризует интенсивность взаимодействия между струнами и в предельном случае $r_{str} = 0$ слияние струн отсутствует. В модели предполагается, что множественность рождающихся частиц от одной струны (или кластера из слившихся струн) имеет распределение Пуассона, а для поперечного импульса используется гауссово распределение.

Для того чтобы обеспечить правильное описание спектра поперечных импульсов, в модели также учитывается жесткость элементарных столкновений [9, 10]. А именно считается, что поперечный импульс, который приобретают струны в результате столкновения двух диполей, обратно пропорционален поперечному размеру взаимодействующих диполей:

$$d_i = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|, \quad d'_i = |\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}'_2|. \quad (2)$$

Квадрат среднего поперечного импульса частиц имеет вид суммы вкладов от обоих краев струны плюс дополнительный постоянный член p_0 , соответствующий внутреннему поперечному импульсу струны:

$$p_{T_1}^2 = \frac{1}{d_i^2} + \frac{1}{d_i'^2} + p_0^2. \quad (3)$$

С учетом слияния струн поперечный импульс от кластера k слившихся струн имеет вид $p_T^4 = \sum_{i=1}^k p_{T_{1_i}}^4$, где $p_{T_{1_i}}^2 = \frac{1}{d_i^2} + \frac{1}{d_i'^2} + p_0^2$.

Параметры настоящей модели ограничены данными по неупругому сечению и множественности в pp -, p -Pb- и Pb-Pb-столкновениях [2, 3]. Для варианта модели со слиянием струн мы использовали значение радиуса струны $r_{\text{str}} = 0,2$ фм. Внутренний поперечный импульс струны мы приняли равным $p_0 = 0,2$ ГэВ/с. Данные значения обеспечивают хорошее описание распределения по поперечному импульсу, а также фактора ядерной модификации при энергиях БАК [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 показана корреляционная функция $\langle p_T \rangle_{N_{\text{ch}}} - N_{\text{ch}}$ в pp -столкновениях для заряженных частиц, попадающих в псевдобыстротный интервал $|\eta| < 0,3$ и имеющих поперечный импульс от 0,15 до 10 ГэВ/с.

Сравнение рассчитанных и экспериментальных данных показывает, что недостаточно учитывать слияние струн и жесткость элементарных столкновений по отдельности, чтобы описать экспериментально полученные корреляции между поперечным импульсом и множественностью.

В случае отсутствия слияния струн (когда корреляция $\langle p_T \rangle_{N_{\text{ch}}} - N_{\text{ch}}$ вызвана только учетом жесткости элементарных столкновений) поперечный импульс слабо зависит от множественности (наклон корреляционной функции близок к нулю). Включение слияния струн мультипликативным образом усиливает эту $\langle p_T \rangle_{N_{\text{ch}}} - N_{\text{ch}}$ -корреляцию, что приводит к правильному описанию эксперимента.

Стоит отметить, что результаты варианта модели без слияния струн, учитывающего только жесткость столкновений, практически совпадают с монтекарловским генератором PYTHIA 8 [12], в котором выключен эффект пересоединения цвета (color reconnection, CR [13]). Таким образом, можно предположить, что модель слияния струн и эффект пересоединения цвета в модели PYTHIA 8 описывают с разных сторон одно и то же физическое явление, приводящее к проявлению коллективности в протон-протонных столкновениях. Свойства данного явления в протон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях

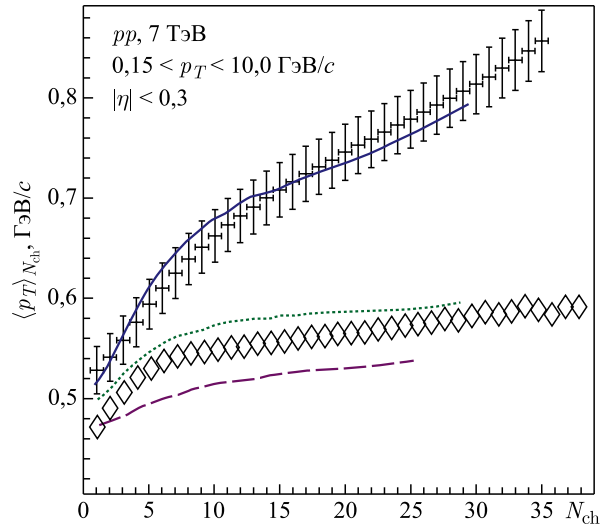


Рис. 1. Корреляция между поперечным импульсом и множественностью в pp -столкновениях при энергии 7 ТэВ. Представлены результаты монте-карловской модели с учетом слияния струн (штриховая линия), жесткости элементарных соударений (пунктирная), а также с одновременным учетом этих процессов (сплошная). Расчеты сравниваются с экспериментальными данными (крестики) и моделью RYTHIA 8 без учета эффекта пересоединения цвета [1] (ромбы)

могут быть описаны только на языке слияния струн ввиду того, что модель RYTHIA не применима к взаимодействиям с ядрами.

На рис. 2 показана корреляционная функция между поперечным импульсом и множественностью в протон-ядерных столкновениях при энергии 5,02 ТэВ. Кинематические критерии отбора частиц такие же, как и для pp -столкновений. В целом полученные результаты аналогичны случаю pp -рассеяния. Чтобы описать корреляцию между поперечным импульсом и множественностью в столкновениях протон–свинец, следует учитывать не только жесткость элементарных процессов, но и слияние струн. При этом достигается хорошее согласие с экспериментальными данными и оба этих эффекта дают сопоставимый вклад в общую корреляционную функцию.

На рис. 3 показана корреляционная функция между поперечным импульсом и множественностью в Pb–Pb-столкновениях при энергии 2,76 ТэВ. В модельных расчетах наблюдается рост поперечного импульса более сильный, чем в экспериментальных данных. Таким образом, описание $\langle p_T \rangle_{N_{ch}} - N_{ch}$ достигается только на качественном уровне. По нашему мнению, причина расхождения кроется в том, что в высокоэнергетических ядро-ядерных столкновениях начинает играть значительную роль эффект потери партонами

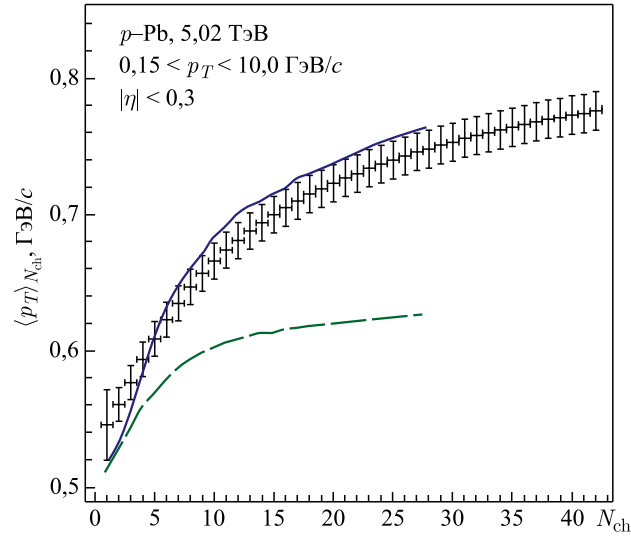


Рис. 2. Корреляция между поперечным импульсом и множественностью в p -Pb-столкновениях при энергии 5,02 ТэВ. Показаны результаты модели с учетом (сплошная линия) и без учета (штриховая) слияния струн, экспериментальные данные [1] (точки)

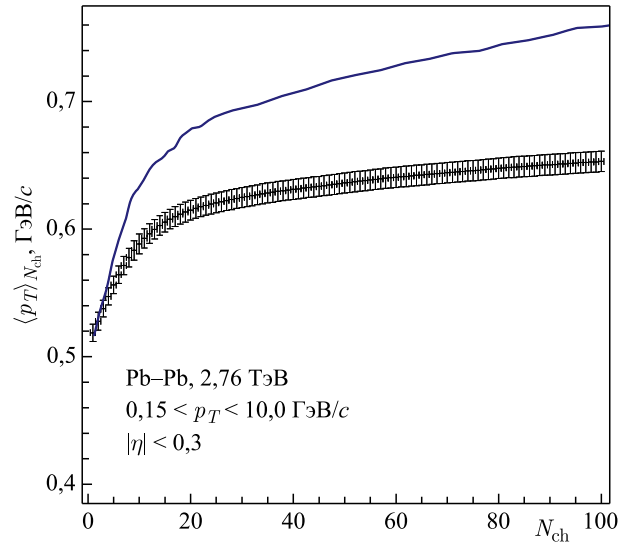


Рис. 3. Корреляция между поперечным импульсом и множественностью в Pb-Pb-столкновениях при энергии 2,76 ТэВ. Сравнение результатов модели (сплошная линия) с экспериментальными данными [1] (точки)

части энергии при прохождении сквозь сильновзаимодействующую среду (parton energy loss) [14]. При этом ввиду того, что даже в периферических Pb–Pb-соударениях площадь перекрытия ядер значительно больше, чем область pp - и p -Pb-взаимодействий, среднее расстояние, которое необходимо преодолеть партону, чтобы покинуть среду, является достаточно большим и соответствующие потери надо учитывать при расчете поперечного импульса. Как показано в работах [15–17], явный учет этого механизма совместно со слиянием струн позволяет успешно описать коэффициенты коллективного потока и азимутальные корреляции.

ВЫВОДЫ

При сравнении полученных в данной работе результатов с экспериментальными данными можно сделать следующие выводы.

1. Одновременный учет слияния струн и жесткости элементарных столкновений позволяет успешно описать $\langle p_T \rangle_{N_{ch}} - N_{ch}$ -корреляцию в pp - и p -Pb-столкновениях, причем оба эффекта дают сопоставимый вклад. Механизм слияния струн играет роль, аналогичную процессу пересоединения цвета в протон-протонных столкновениях.

2. В ядро-ядерных соударениях в корреляционную функцию $\langle p_T \rangle_{N_{ch}} - N_{ch}$ начинает давать значительный вклад эффект потери энергии партонной струны при прохождении горячей среды, который не учтен в настоящей модели.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (соглашение № 14.610.21.0003) и СПбГУ (гранты № 11.38.242.2015 и № 11.42.995.2016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abelev B. et al. (ALICE Collab.). Multiplicity Dependence of the Average Transverse Momentum in pp , p -Pb, and Pb-Pb Collisions at the LHC // Phys. Lett. B. 2013. V. 727. P. 371–380.
2. Коваленко В. Н. Моделирование эксклюзивных партонных распределений и дальних быструх корреляций в pp -столкновениях при энергиях БАК // ЯФ. 2013. Т. 76. С. 1251–1257 (Kovalenko V. N. Modeling of Exclusive Parton Distributions and Long-Range Rapidity Correlations in Proton-Proton Collisions at the LHC Energies // Phys. At. Nucl. 2013. V. 76. P. 1189–1195); arXiv:1211.6209 [hep-ph].
3. Kovalenko V. N., Vechernin V. V. Model of pp and AA Collisions for the Description of Long-Range Correlations // PoS (Baldin ISHEPP XXI). 2012. P. 077; arXiv:1212.2590 [nucl-th].
4. Flensburg C., Gustafson G., Lonnblad L. Elastic and Quasi-Elastic pp and γ^*p Scattering in the Dipole Model // Eur. Phys. J. C. 2009. V. 60. P. 233–247.

5. *Gustafson G.* Multiple Interactions, Saturation, and Final States in pp Collisions and DIS // *Acta Phys. Polon. B.* 2009. V. 40. P. 1981–1996.
6. *Amelin N. S. et al.* Long and Short Range Correlations: A Signature of String Fusion // *Phys. Rev. Lett.* 1994. V. 73. P. 2813–2816.
7. *Braun M. A. et al.* Correlations between Multiplicities and Average Transverse Momentum in the Percolating Color Strings Approach // *Eur. Phys. J. C.* 2004. V. 32. P. 535–546.
8. *Вечернин В. В., Колеватов Р. С.* Дискретный подход к описанию дальних корреляций множественности и pt в модели слияния струн // *Вестн. СПбГУ. Сер. 4: Физика. Химия.* 2014. Вып. 4. С. 11–27; arXiv:hep-ph/0305136 [hep-ph].
9. *Flensburg C., Gustafson G., Lonnblad L.* Inclusive and Exclusive Observables from Dipoles in High Energy Collisions // *JHEP.* 2011. V. 1108. P. 103.
10. *Kovalenko V., Vechernin V.* Forward-Backward Multiplicity Correlations in pp Collisions at High Energy in Monte Carlo Model with String Fusion // *DESY Conf. Proc.* 2014-04. P. 691–694; doi: 10.3204/DESY-PROC-2014-04/82; arXiv:1410.3884 [hep-ph].
11. *Дрожжова Т. А. и др.* Центральность и множественное рождение частиц в ультра-релятивистских ядерных столкновениях БАК // *ЯФ.* 2016. Т. 79. С. 508–519 (*Drozhdzova T. A. et al.* Centrality and Multiparticle Production in Ultrarelativistic Nuclear Collisions // *Phys. At. Nucl.* 2016. V. 79. P. 737–748).
12. *Sjostrand T., Mrenna S., Skands P. Z.* A Brief Introduction to PYTHIA 8.1 // *Comp. Phys. Commun.* 2008. V. 178. P. 852–867.
13. *Sjostrand T., Mrenna S., Skands P. Z.* PYTHIA 6.4 Physics and Manual // *JHEP.* 2006. V. 0605. P. 026.
14. *Gubser S. S. et al.* Gluon Energy Loss in the Gauge-String Duality // *JHEP.* 2008. V. 0810. P. 052.
15. *Braun M. A., Pajares C.* Elliptic Flow from Color Strings // *Eur. Phys. J. C.* 2011. V. 71. P. 1558.
16. *Braun M. A., Pajares C., Vechernin V. V.* Anisotropic Flows from Colour Strings: Monte Carlo Simulations // *Nucl. Phys. A.* 2013. V. 906. P. 14–27.
17. *Braun M. A., Pajares C., Vechernin V. V.* Ridge from Strings // *Eur. Phys. J. A.* 2015. V. 51. P. 44.