

УДК 539.125.17:539.126.17

## ОБ ИЗУЧЕНИИ СИГНАТУРЫ МЕТРИКИ ПРОСТРАНСТВА ПО КОРРЕЛЯЦИЯМ ЧАСТИЦ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ АДРОНОВ

© 2023 г. Р. А. Мухамедшин\*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
“Институт ядерных исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

\*E-mail: rauf\_m@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Long-range near-side “ridge” эффект, обнаруженный коллаборацией CMS на Большом адронном коллайдере, и компланарность подстволов в гамма-адронных семействах, могут быть воспроизведены в рамках компланарной генерации наиболее энергичных адронов в сильных взаимодействиях, объясняемой, в частности, гипотезой об изменении сигнатуры метрики пространственно-временного континуума, а именно, переходом основного трехмерного состояния, в двумерное ( $3D \leftrightarrow 2D$ ). Предлагается способ экспериментальной проверки этой гипотезы с помощью изучения азимутальных корреляций частиц во взаимодействиях адронов.

DOI: 10.31857/S0367676523701685, EDN: OOIAQY

### ВВЕДЕНИЕ

В высокогорных и стратосферных экспериментах с рентгено-эмульсионными камерами была обнаружена [1–9] тенденция к компланарности наиболее энергичных подстволов т.н. гамма-адронных ( $\gamma$ - $h$ ) семейств, интерпретированная как компланарная генерация частиц (КГЧ) наиболее энергичных адронов с большими поперечными импульсами в плоскости компланарности,  $p_t^{copl} \gtrsim 1$  ГэВ/с [10–12].

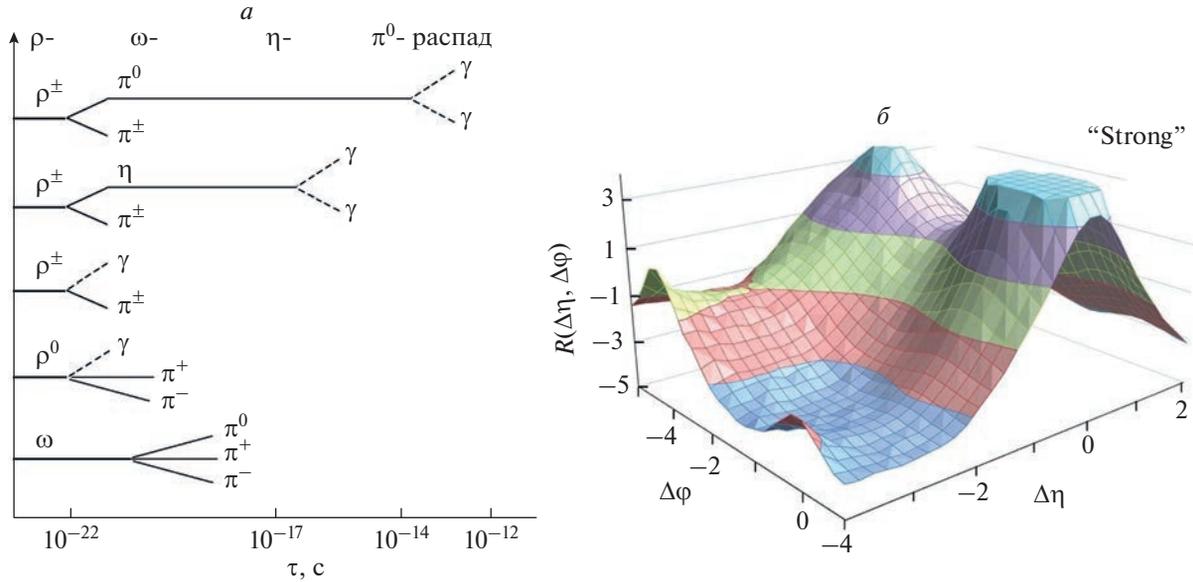
Идеи, предложенные для объяснения этого явления, разделяются на две принципиально разные группы: 1) относительно традиционные концепции в рамках адронных взаимодействий, связывающих эффект с образованием лидирующих систем [13–16] или с угловым моментом кварк-глюонной струны [17], подразумевающие большие  $p_t^{copl}$  в плоскости компланарности; 2) гипотеза, постулирующая переход размерности пространства на малых масштабах при высоких энергиях от трех к двум измерениям [18, 19].

Коллаборацией CMS на Большом адронном коллайдере (LHC) был обнаружен т.н. long-range near-side “ridge” эффект (далее “ridge” эффект) [20], выраженный в аномально высоком значении двухчастичной корреляционной функции  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$  при  $|\Delta\eta| \gtrsim 3$  и  $|\Delta\phi| \approx 0$  в событиях с высокой множественностью заряженных адронов ( $h^\pm$ ). Здесь  $\Delta\eta$  – разность псевдобыстрот адронов,  $\Delta\phi$  – разность их азимутальных углов  $\phi$ .

Для анализа связи этих явлений была разработана модель FANSY 2.0 [21–24], моделирующая как традиционную (QGSJ [21]), так и компланарную генерацию частиц (CPG [22]). В модели максимальная компланарность связана с самыми энергичными адронами: меньше быстрота  $|y|$  – слабее компланарность, исчезающая при  $|y| \lesssim 2-3$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И СИГНАТУРА ПРОСТРАНСТВА

Теоретические модели [13–17] почти неизбежно требуют большие значения поперечного импульса  $p_t^{copl}$ , что противоречит данным LHC. Поэтому с феноменологической точки зрения наиболее подходящим является предположение об уменьшении размерности пространства [18, 19], которое не требует больших  $p_t^{copl}$ . Предположим, что при энергиях взаимодействия адронов  $\sqrt{s} \sim 7$  ТэВ очень высокая кратковременная пространственно-временная плотность энергии вызывает флуктуационный переход трехмерного состояния в двумерное и обратно ( $3D \leftrightarrow 2D$ ). Время существования  $\tau_{2D}$  и размеры этой локальной области,  $L_{2D} \sim c \cdot \tau_{2D}$  (где  $c$  – скорость света), неизвестны. Рассмотрим экспериментальные возможности оценки этих параметров, исходя из того, что при генерации частиц прямо рождаются как относительно стабильные частицы, так и резонансы с малыми временами жизни.



**Рис. 1.** Примерные временные масштабы некоторых каналов распадов первичных резонансов ( $\rho^{\pm, 0}$ ,  $\omega$ ) и последующих распадов вторичных частиц при  $|y| \sim 3$  (а); корреляционная функция  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$  для пар  $h^{\pm}h^{\pm}$  для  $\tau_{2D} \lesssim 10^{-22}$  с (б) (модель FANSY 2.0 CPG “strong” [23, 24]).

Частицы, родившись в 2D пространстве, разлетаются компланарно, “помня” свою историю. Резонансы могут распадаться (например,  $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ,  $\rho^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^0$ ) еще в 2D пространстве, если их время жизни  $\tau = \tau_0 \gamma_L \lesssim \tau_{2D}$  (где  $\gamma_L$  – Лоренц-фактор адрона), так и в 3D, если  $\tau > \tau_{2D}$ . Моделирование показывает, что экспериментальная и расчетная функции  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$  в области “ridge” эффекта близки друг к другу при “копланаризации” в области быстрот  $y \gtrsim 3$  [22]. При  $|y| \sim 3$  и  $E = 17.5$  ГэВ для  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\eta$  и  $\pi^0$  мезонов имеем  $\tau \sim 10^{-22}$ ,  $10^{-21}$ ,  $10^{-17}$  и  $10^{-14}$  с, соответственно, что задает масштабы временных интервалов, где возможны изменения в поведении компланарности. Рисунок 1а показывает временные масштабы некоторых каналов распадов  $\rho^{\pm, 0}$  и  $\omega$  резонансов, а также продуктов их распадов. Для получения более детальных результатов необходимы эксперименты по изучению характеристик генерации и распада энергичных адронов в широком кинематическом диапазоне при сверхвысоких энергиях (в идеальном случае,  $3 \lesssim |\eta|$ ,  $|y| \lesssim 10$ ,  $x_F \gtrsim 0.01$  на LHC), для получения информации о каналах рождения, энергии и импульсах и угловых характеристиках резонансов; заряженных частиц; гамма-квантов, а также осуществления полного кинематического анализа каждого взаимодействия и восстановления кинематической истории распадов нестабильных частиц.

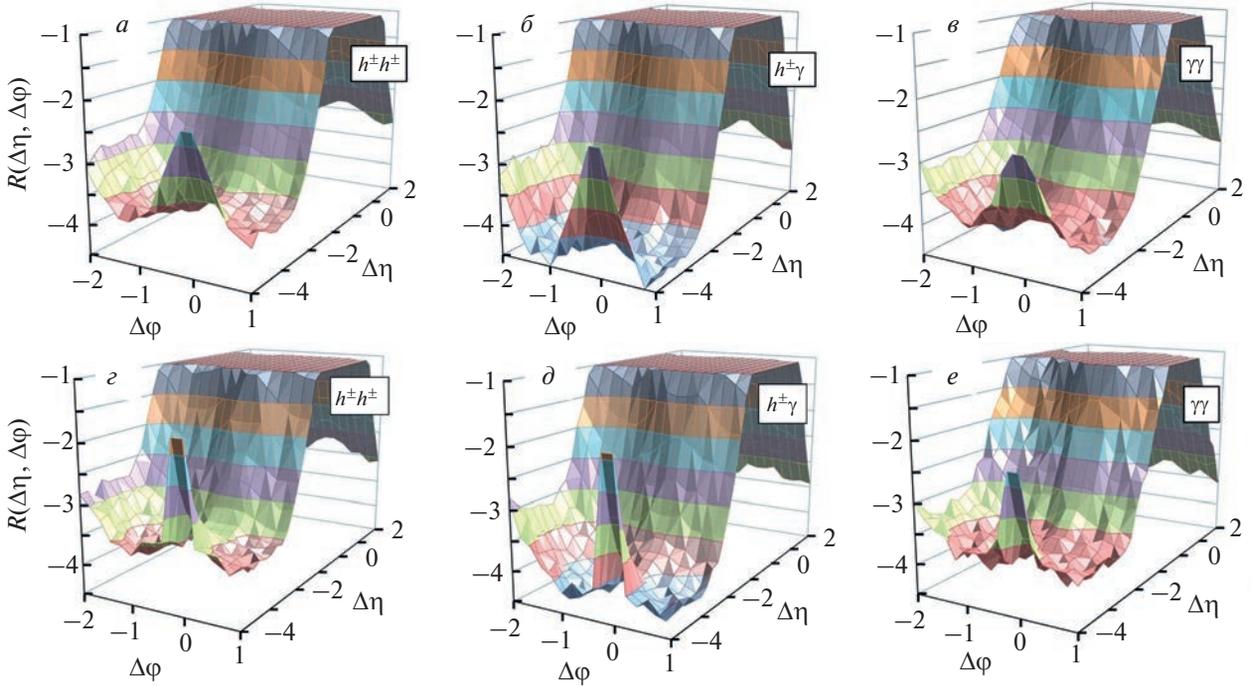
При различных значениях  $\tau_{2D}$  высокую компланарность могут иметь 1)  $\rho$  и  $\omega$  резонансы (и другие

адроны прямой генерации) при  $\tau_{2D} \lesssim 10^{-22}$  с; 2)  $\eta$  мезоны (дополнительно к  $\rho, \omega$ ) при  $\tau_{2D} \lesssim 10^{-16}$  с; 3) дополнительно  $\pi^0$  мезоны при  $\tau_{2D} \lesssim 10^{-14}$  с; 4) дополнительно,  $\gamma$ -кванты при  $\tau_{2D} \gtrsim 10^{-14}$  с.

Отметим, что, в рамках концепции изменения размерности пространства, как минимум, первый случай уже имеет место. На возможность четвертого случая намекают характеристики стратосферного события “JF2af2” [9] (включающего только  $e^{\pm}$  и  $\gamma$ -кванты) с энергией  $\Sigma E_{\gamma} \gtrsim 1.4$  ПэВ и числом частиц  $n_{\gamma} = 38$ , имеющее экстремальную выстроенность треков вдоль прямой линии. Вероятность наблюдать подобное событие в результате флуктуаций крайне низка ( $\lesssim 10^{-10}$ ) [24].

### ПОИСК 2D СИГНАТУР НА LHC

Хотя диапазон псевдобыстрот  $|\eta| \lesssim 2.4$ , в котором Коллаборация CMS обнаружила “ridge” эффект в  $pp$  взаимодействиях [20], не является оптимальным для анализа эффектов, связанных с компланарной генерацией частиц, для выяснения возможности его использования для анализа  $h^{\pm}\gamma$  и  $\gamma\gamma$  корреляций, было проведено моделирование в рамках двух версий FANSY 2.0 CPG, а именно, версии “strong” [23, 24] (моделирование компланарной генерации в 3D пространстве и случайной ориентации всех последующих распадов, что формально соответствует  $\tau_{2D} \lesssim 10^{-22}$  с) и вариант “2D”, в которой генерация частиц ( $c|\eta| \gtrsim 2$ ) и все последующие распады (при  $\tau \lesssim \tau_{2D}$ ) имеют ме-



**Рис. 2.** Корреляционные функции  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$  для пар  $h^\pm h^\pm$  (a, z);  $h^\pm \gamma$  (б, d);  $\gamma\gamma$  (e, e) для  $\tau_{2D} \lesssim 10^{-22}$  с (a, б, e) (версия “strong” [23, 24]) и для  $\tau_{2D} \lesssim 10^{-12}$  с (версия “2D”) (z, d, e).

сто в очень близком (хотя и не абсолютном) приближении к 2D пространству. Рисунки 1б и 2а показывают одну и ту же функцию  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$  для  $h^\pm h^\pm$  пар по версии “strong”, но в разных масштабах. В целом, в верхнем и нижнем рядах на рис. 2 представлены функции  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$  для различных вариантов пар частиц именно в области “ridge” эффекта (при  $\Delta\eta = 4$  и  $-2 < \Delta\phi < 1$ ). Верхний ряд показывает функции  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$ , полученные для пар  $h^\pm h^\pm$  (a),  $h^\pm \gamma$  (б),  $\gamma\gamma$  (e) в рамках версии “strong” ( $\tau_{2D} \lesssim 10^{-22}$  с). Нижние графики показывают функции  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$  для пар  $h^\pm h^\pm$  (z),  $h^\pm \gamma$  (d),  $\gamma\gamma$  (e) в рамках версии “2D” (для  $\tau_{2D} \sim 10^{-12}$  с), в которой для расчетов использовалось сечение перехода  $3D \leftrightarrow 2D$  в  $pp$  взаимодействиях в  $\sim 50$  раз меньше, чем использованное в рамках версии “strong” [22], чтобы величины “ridge” эффекта для пар  $h^\pm h^\pm$  в обоих расчетах были близки.

Очевидно, при  $\Delta\eta = 4$  и  $-1 \lesssim \Delta\phi \lesssim 1$ : а) вариант “2D” дает заметно более узкие пики; б) из трех возможных типов корреляций самый сильный эффект проявляют  $h^\pm \gamma$  корреляции. Если определить такие параметры, как высота пика  $H$  (разность уровней максимального значения и ближайшего локального минимума функции  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$  при  $\Delta\eta = 4$ ), полуширина пика  $\sigma_{1/2}$  на его полувисоте  $H_{1/2}$ , и параметр “стройность” (“slimness”)  $S = \sigma_{1/2}/H_{1/2}$ , то для  $h^\pm \gamma$  корреляций версии “2D” и “strong” дают  $S_{h^\pm \gamma} \sim 0.10$  и  $\sim 0.25$ , соответ-

ственно. Для реального перехода  $3D \leftrightarrow 2D$  можно ожидать большее различие, т.к. версия “2D” является лишь близким (но не полным) приближением к 2D размерности.

Для сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными необходимо дополнить учет методические эффекты отклика детектора, искажающие форму функции  $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальное исследование кинематических историй взаимодействий (генерация резонансов и их распады в мезоны и  $\gamma$ -кванты) может подтвердить или опровергнуть существование локальных ( $3D \leftrightarrow 2D$ ) флуктуаций сигнатуры метрики пространства.

Анализ двухчастичных  $h^\pm h^\pm$ ,  $h^\pm \gamma$  и  $\gamma\gamma$  корреляций в области  $|\eta| \lesssim 2.4$ ,  $|\Delta\eta| \gtrsim 3$  может помочь поиску связи азимутальных корреляций с 2D флуктуациями сигнатуры метрики пространства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Borisov A.S. et al. (Pamir Collaboration) // Proc. 4th ISVHECRI. (Beijing, 1986). P. 4.*
2. *Иваненко И.П., Копенкин В.В., Манагадзе А.К. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 50. № 11. С. 192.*

3. *Kopenkin V.V., Managadze A.K., Rakobolskaya I.V. et al.* // Phys. Rev. D. 1995. V. 52. P. 2766.
4. *Pamir Collaboration* // Preprint INP MSU. 89-67/144. 1989.
5. *Borisov A.S., Mukhamedshin R.A., Puchkov V.S. et al.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2001. V. 97. P. 118.
6. *Xue L., Dai Z.Q., Li J.Y. et al.* // Proc. 26th ICRC. V. 1. (Salt Lake City, 1999) P. 127.
7. *Apanasenko A.V., Dobrotin N.A., Goncharova L.A. et al.* // Proc. 15th ICRC. V. 7. (Plovdiv, 1977) P. 220.
8. *Osedlo V.I., Rakobolskaya I.V., Galkin V.I. et al.* // Proc. 27th ICRC. V. 1. (Hamburg, 2001) P. 1426.
9. *Capdevielle J.N.* // J. Phys. G. 1988. V. 14. P. 503.
10. *Mukhamedshin R.A.* // JHEP. 2005. V. 0505. P. 049.
11. *Mukhamedshin R.A.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2009. V. 196C. P. 98.
12. *Манагадзе А.К., Мухамедшин Р.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 11. С. 1573; *Managadze A.K., Mukhamedshin R.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 11. P. 1315.
13. *Royzen I.I.* // Mod. Phys. Lett. A. 1994. V. 9. No. 38. P. 3517.
14. *Capdevielle J.N.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2008. V. 175. P. 137.
15. *Yuldashbaev T.S., Nuritdinov Kh., Chudakov V.M.* // Nuovo Cimento. 2001. V. 24C. P. 569.
16. *Mukhamedshin R.A.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 1999. V. 75A. P. 141.
17. *Wibig T.* // arXiv: hep-ph/0003230. 2000.
18. *Anchordoqui L., Dai D.C., Fairbairn M. et al.* // Mod. Phys. Lett. A. 2012. V. 27. Art. No. 1250021.
19. *Stojkovic D.* // arXiv:1406.2696v1 [gr-qc]. 2014.
20. *The CMS Collaboration* // arXiv:1009.4122v1 [hep-ex]. 2010.
21. *Mukhamedshin R.A.* // Eur. Phys. J. Plus. 2019. V. 134. P. 584.
22. *Mukhamedshin R.A., Sadykov T.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1181. Art. No. 012089.
23. *Mukhamedshin R.A.* // Eur. Phys. J. C. 2022. V. 82. P. 155.
24. *Мухамедшин Р.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 534; *Mukhamedshin R.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 402.

## On the study of the space metrics signature from correlations of particles in hadron interactions

**R. A. Mukhamedshin\***

*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

*\*e-mail: rauf\_m@mail.ru*

Long-range near-side “ridge” effect discovered by the CMS Collaboration at the LHC, and the coplanarity of subcores in gamma-ray-hadron families, can be reproduced in the framework of the coplanar generation of the most energetic hadrons in hadron interactions, explained, in particular, by the hypothesis of change of the signature of the metric of the space-time continuum, namely, the transformation of the basic three-dimensional state into two-dimensional one (3D  $\leftrightarrow$  2D). A method is proposed for experimental verification of this hypothesis by studying the azimuthal correlations of particles in hadron interactions.