

УДК 539.125.17:539.126.17

ЕСТЬ ЛИ СВЯЗЬ МЕЖДУ КОЛЛАЙДЕРНЫМ “RIDGE” ЭФФЕКТОМ И КОМПЛАНАРНОСТЬЮ ЧАСТИЦ В ГАММА-АДРОННЫХ СЕМЕЙСТВАХ?

© 2021 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 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

На основе моделирования протон-протонных взаимодействий с использованием модели FANSY 2.0 показано, что “long-range ridge” эффект, обнаруженный CMS Коллаборацией на LHC, и компланарность в гамма-адронных семействах в стволах широких атмосферных ливней, обнаруженная в экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами, могут быть объяснены в рамках единого физического процесса.

DOI: 10.31857/S0367676521040232

ВВЕДЕНИЕ

Одним из неожиданных результатов, полученных в экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами, является сильный азимутальный эффект, проявляющийся в виде тенденции к компланарности наиболее энергичных подстволов т.н. гамма-адронных (γ - h) семейств, т.е., групп частиц (γ , e^\pm , адроны) высоких энергий ($E \gtrsim 5$ ТэВ) в стволах относительно молодых широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициируемых, в основном, протонами первичного космического излучения (ПКИ) с энергиями $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ ($\sqrt{s} \gtrsim 5$ ТэВ). Эффект был обнаружен Сотрудничеством “Памир” [1–5] в γ - h семействах с энергией $\Sigma E_\gamma > 700$ ТэВ, и позднее – в экспериментах [6–9]. Поскольку в рамках традиционных моделей вероятность его флуктуационного возникновения мала ($\lesssim 10^{-10}$) [10–12], эффект интерпретировался как компланарная генерация частиц (КГЧ) наиболее энергичных адронов ($x_F \gg 0$) с поперечными импульсами $p_t^{copl} \gtrsim 1$ ГэВ/с.

Для объяснения этого явления было предложено несколько теоретических идей [13–16], а также экзотическая “Crystal world” гипотеза [17], постулирующая переход размерности пространства при высоких энергиях с трех до двух измерений. Это ведет к локализации поперечного импульса в некоторой плоскости и подавлению его компонентов, перпендикулярных этой плоскости.

Поскольку на Большом адронном коллайдере (БАК) изучается подходящий диапазон энергий, интересно поискать возможную связь явления компланарности с “long-range ridge” эффектом, обнаруженным Коллаборацией CMS [20], который выражается в двухчастичной $\Delta\eta - \Delta\phi$ корреляции при $\Delta\phi \approx 0$ и $|\Delta\eta| \gtrsim 3.5$. Здесь $\Delta\eta$ – разность величин псевдобыстрот $\eta = \ln(\text{tg}(\theta/2))$ (где θ – полярный угол импульса частицы относительно оси пучка) двух адронов, а $\Delta\phi$ – разность их азимутального угла ϕ (в радианах). Однако эксперименты на БАК и в космических лучах проводятся с разными критериями отбора событий (очень высокая множественность частиц небольших энергий в центральной области η и несколько самых энергичных частиц в стволе ШАЛ, соответственно).

Для изучения этой проблемы разработана феноменологическая модель FANSY 2.0 [18, 19], позволяющая моделировать традиционную и компланарную генерацию частиц (QGSJ [18] и CPG [19]) и, в частности, воспроизводящая генерацию резонансов, что очень важно при анализе двухчастичных корреляций.

В FANSY 2.0 CPG [19] максимальная компланарность при моделировании связана с самыми энергичными адронами: чем меньше быстрота $|\eta|$, тем слабее степень компланарности. В центральной кинематической области ($|\eta| \lesssim 3$) явление компланарности отсутствует. После розыгрыша характеристик n частиц в рамках модели FANSY 2.0 QGSJ в случае моделирования ком-

планарной генерации частиц (КГЧ), адроны упорядочиваются в порядке убывания продольных импульсов, то есть $p_{max} > p_1 > p_2 > p_3 \dots p_n > -p_{max}$. Соответствующие значения y равны $y_1, y_2,$

$y_3, \dots, y_n, p_{max} = \sqrt{(s/4 - m_p^2)}$. После этого применяется алгоритм “копланаризации” для адронов с быстротами $|y| > |y_{thr}^{CPG}|$. Здесь пороговое значение $y_{thr}^{CPG} = |y_2| - \Delta y^{CPG}$, где y_2 – быстрота 2-го по энергии адрона, Δy^{CPG} – параметр, зависящий от энергии взаимодействия. Величина $|y_{thr}^{CPG}|$ может меняться из-за флуктуаций даже при постоянном Δy^{CPG} . Алгоритм поворачивает вектор поперечного импульса \vec{p}_t каждого адрона в сторону плоскости компланарности вдоль кратчайшего пути. Процедура останавливается при $|y| < |y_{thr}^{CPG}|$. Азимутально-угловое распределение импульсов \vec{p}_t относительно плоскости компланарности при $|y| > |y_{thr}^{CPG}|$, подчиняется распределению Гаусса со стандартным отклонением $\sigma_\phi^{CPG}(y) = \sigma_{\phi_0}^{CPG} (|y_2|/|y|)$, т.е. $\sigma_\phi^{CPG}(y)$ минимально при $|y| = |y_2|$ и растет с уменьшением $|y|$. Все результаты, приведенные в данной работе, получены при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ, $\Delta y^{CPG} = 3.55$, $\sigma_{\phi_0}^{CPG} = 0.10$ рад. При этом $\langle y_2 \rangle = 7.13$, $\langle \Delta y_{thr}^{CPG} \rangle = 3.58$.

Очевидно, алгоритм “копланаризации” [19] не имеет теоретической основы и может быть использован только в качестве феноменологического инструмента для оценки влияния КГЧ на характеристики взаимодействия.

ДАнные БАК И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

“Ridge” эффект был обнаружен Коллаборацией CMS [20] при анализе событий, отбор которых состоял из двух этапов. На первом этапе отбирались события с множественностью заряженных частиц $n_{ch} > 110$ (т. н. $n_{trk}^{offline}$) в интервале $|\eta| < 2.4$ и в диапазоне поперечных импульсов $0.4 < p_t < 5.0$ ГэВ/с. На втором этапе рассматривались только частицы с $1.0 < p_t < 3.0$ ГэВ/с. Аналогичный отбор проводился также для т.н. “minimum bias” событий в тех же диапазонах p_t и $|\eta|$, но уже независимо от множественности.

Корреляционная функция определяется как функция отношения сигнал/фон следующим образом [20]:

$$R(\Delta\eta, \Delta\phi) = \left\langle \left(\langle N \rangle - 1 \right) \left(\frac{S_N(\Delta\eta, \Delta\phi)}{B_N(\Delta\eta, \Delta\phi)} - 1 \right) \right\rangle. \quad (1)$$

Здесь $\Delta\eta = |\eta_1 - \eta_2|$, $\Delta\phi = |\phi_1 - \phi_2|$ – абсолютная величина различий в псевдобыстроотах η и азиму-

тальных углах двух частиц ϕ , $\langle N \rangle$ – среднее число треков на одно событие, S_N и B_N – функции плотности сигнала и фона, определяемые выражениями (2) и (3), соответственно.

$$S_N(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{2}{N(N-1)} \frac{d^2 N^{signal}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}, \quad (2)$$

$$B_N(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N_1 N_2} \frac{d^2 N^{mixed}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}. \quad (3)$$

Поскольку всегда $\Delta\eta > 0$ и $\Delta\phi > 0$, то реально заполняется один квадрант $\Delta\eta - \Delta\phi$ распределений; остальные три квадранта заполняются отражением. Поэтому распределения симметричны относительно точки $(\Delta\eta, \Delta\phi) = (0, 0)$ по определению, и для упрощения рисунка можно отрезать часть распределения без потери его информативности. Распределение функции плотности сигнала S_N в каждом событии определяется числом всех пар заряженных частиц с множественностью N , т.е. $N(N-1)/2$, и нормируется с его помощью на единичный интеграл. Фоновое распределение B_N построено путем случайного выбора двух различных событий и сопряжения каждой частицы из одного события с каждой частицей в другом событии с множественностями N_1 и N_2 , соответственно.

Рисунки 1а и 1б (рис. 7б и 7д в [21]) показывают корреляционные функции $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$ для событий типа “minimum bias” (а) и высокой множественности (б) для адронов с поперечными импульсами в диапазоне от 1 до 3 ГэВ/с. Очевидно, во втором случае при $\Delta\phi \approx 0$ и $|\Delta\eta| \approx 3.5$ появляется гребнеподобная (“ridge”) структура, растущая вплоть до $|\Delta\eta| = 4$. Эта особенность, которая никогда ранее не была замечена в двухчастичных корреляционных функциях. Для “minimum bias” событий подобное явление не наблюдается.

В рамках FANSY 2.0 CPG моделировались взаимодействия (без учета отклика детекторов) и был проведен аналогичный анализ отобранных событий. В искусственных “minimum bias” событиях особенности также не наблюдаются, но в распределении $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$ для событий высокой множественности хорошо видна структура, аналогичная экспериментальному “ridge” эффекту (рис. 2а). Следует отметить, что при $|\Delta\phi| \sim \pi$ функция $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$ для искусственных событий имеет особенности, тогда как в эксперименте поведение $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$ более монотонное. Подчеркнем, что для количественного сравнения экспериментальных данных и результатов моделирования необходимо провести учет отклика детекторов.

Интересный результат наблюдается при расширении диапазона $\Delta\eta$. На рис. 2б показано распределение корреляционной функции $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$ для событий высокой множественности, полученное в диапазоне $|\Delta\eta| \leq 8$. Можно видеть быстрый

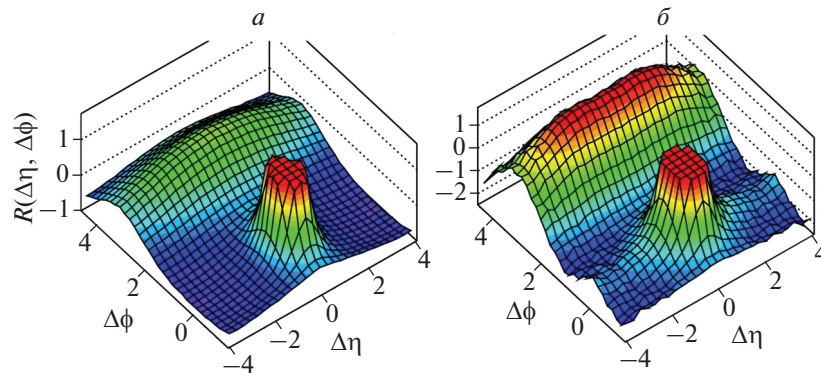


Рис. 1. Распределение корреляционной функции $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$, полученное Коллаборацией CMS, для событий типа “minimum bias” (а) и событий с множественностью $n_{trk}^{offline} > 110$ при $|\eta| < 2.4$ (б) для заряженных частиц с p_t от 1 до 3 ГэВ/с.

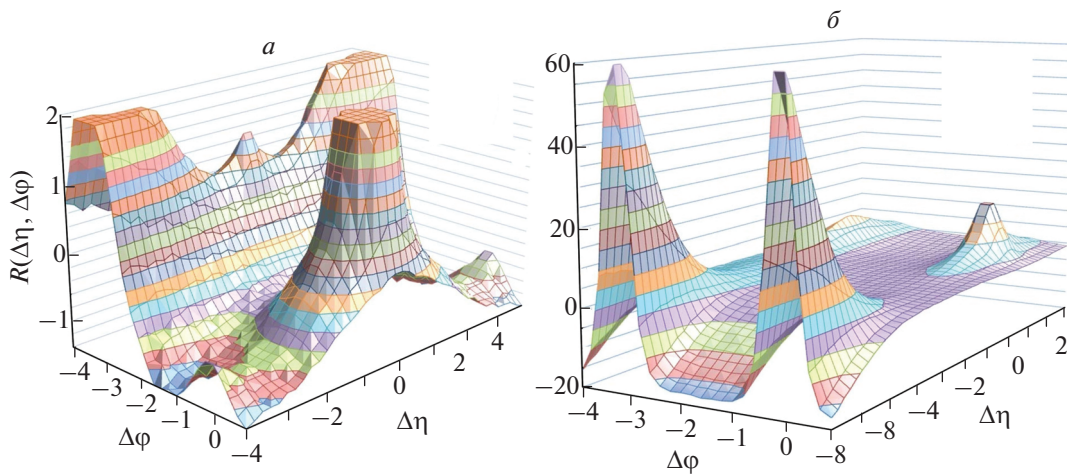


Рис. 2. Распределение корреляционной функции $R(\Delta\eta, \Delta\phi)$, полученное в рамках FANSY 2.0 CPG, для событий с $n_{ch} \geq 110$ (при $|\eta| < 2.4$) для заряженных частиц с p_t от 1 до 3 ГэВ/с в диапазоне $\Delta\eta \leq 4$ (а) и $\Delta\eta \leq 8$ (б).

рост амплитуды “ridge” эффекта и его развитие в гораздо более яркое явление при $|\Delta\phi| \sim 0$ и $\sim\pi$, а также $|\Delta\eta| > 4$, которое можно назвать “twin peaks” эффектом.

Следует еще раз подчеркнуть, что алгоритм компланаризации модели в высшей степени произволен и может быть использован только в качестве феноменологического инструмента для оценки влияния процессов КГЧ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках феноменологической модели FANSY 2.0 “ridge” эффект, обнаруженный Коллаборацией CMS [20], возникает как следствие компланарной генерации наиболее энергичных вторичных частиц с высокими значениями скорости $|\eta|$. FANSY 2.0 предсказывает появление “twin

peaks” эффекта в диапазоне $|\Delta\eta| > 4$. Для решения проблемы необходимо детальное исследование на БАК в более широком диапазоне значений $\Delta\eta$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов А.С., Гусева З.М., Денисова В.Г. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 50. С. 2125.
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., Roganova T.M. // Phys. Rev. D. 1995. V. 52. P. 2766.
4. Pamir Collaboration // Preprint INP MSU No. 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. ICRC1999. (Salt Lake City, 1999). V. 1. P. 127.

7. *Apanasenko A.V., Dobrotin N.A., Goncharova L.A. et al.* // Proc. ICRC1977. (Plovdiv, 1977). V. 7. P. 220.
8. *Osedlo V.I., Rakobolskaya I.V., Galkin V.I. et al.* // Proc. ICRC2001. (Hamburg, 2001). V. 1. P. 1426.
9. *Capdevielle J.N.* // J. Phys. G. 1988. V. 14. P. 503.
10. *Mukhamedshin R.A.* // J. High Energy Phys. 2005. V. 05. Art. No. 049.
11. *Mukhamedshin R.A.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2009. V. 196C. P. 98.
12. *Mukhamedshin R.A.* // Eur. Phys. J. C. 2009. V. 60. P. 345.
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. 175–176. P. 137.
15. *Yuldashbaev T.S. et al.* // Nuovo Cim. C. 2001. V. 24. P. 569.
16. *Mukhamedshin R.A.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 1999. V. 75A. P. 141.
17. *Anchordoqui L.A., Dai De Ch., Goldberg H. et al.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. Art. No. 114046.
18. *Mukhamedshin R.A.* // Eur. Phys. J. Plus. 2019. V. 134. P. 584.
19. *Mukhamedshin R.A.* // Eur. Phys. J. C. 2019. V. 79. P. 441.
20. *The CMS Collaboration* // J. High Energy Phys. 2010. V. 09. Art. No. 091.
21. *The CMS Collaboration* // arXiv: 1009.4122v1. 2010.

Is there a relationship between the collider “ridge” effect and particle coplanarity in gamma-ray-hadron families?

R. A. Mukhamedshin*

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

**e-mail: rauf_m@mail.ru*

Based on the simulation of proton-proton interactions using the FANSY 2.0 model, it is shown that the “long-range ridge” effect discovered by the CMS Collaboration at the LHC and the coplanarity in gamma-hadron families in EAS cores, found in experiments with X-ray emulsion chambers, can be explained within a single physical process.