

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА ВЫСТРОЕННОСТИ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

© 2024 г. И. П. Лохтин^{1)*}, А. В. Никольский^{2),**}, А. М. Снигирев^{1),2),***}

Поступила в редакцию 30.10.2023 г.; после доработки 30.10.2023 г.; принята к публикации 30.10.2023 г.

Рассматриваются кинематические причины возникновения выстроенности у семейств адронов и фотонов, которая наблюдалась коллаборацией “Памир” в эмульсионных экспериментах с космическими лучами. В рамках обсуждаемого подхода показано, что высокая степень выстроенности продуктов взаимодействия ядер мишени и космического излучения может быть следствием процедуры отбора наиболее энергичных кластеров частиц совместно с законом сохранения их поперечного импульса. Полученные результаты корректно описывают экспериментальные данные для трех энергетических центров, а также достаточно близки к измерениям в случае четырех и пяти кластеров, что свидетельствует об обнадеживающих перспективах предлагаемого метода объяснения выстроенности.

DOI: 10.31857/S0044002724030079, EDN: IWNZG

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование космического излучения коллаборацией “Памир” проводилось на юге центральной Азии в горной системе Памир, граничащей с северной грядой Гималаев. В эксперименте использовались рентгеноэмульсионные камеры большой площади, расположенные на высоте около 4.5 км. Одним из главных результатов эксперимента “Памир” можно назвать наблюдение сильной угловой скоррелированности у семейств адронов и фотонов, которые являются продуктами взаимодействия космических лучей и ядер мишени [1–3]. Это явление потенциально способно свидетельствовать о компланарном характере наблюдаемых событий и получило название “выстроенность” [4]. Кроме того, эффект сильной азимутальной скоррелированности частиц наблюдался в эксперименте [5] на борту самолета “Concorde”, где также для регистрации использовалась эмульсионная камера. На количественном уровне выстроенность показывает отклонение от прямой линии наиболее энергичных регистрируемых частиц и их кластеров на плоскости эмульсионной пленки. Выстроенность не имеет общепринятого объяснения до настоящего времени, хотя и были предприняты многочисленные попытки [6–12] корректно описать этот эффект. Анализ экспериментальных данных, включающий моделирование ядерных столкновений в широком диапазоне энергии взаимодействия (1 ТэВ–20 ПэВ), не выявил избыточной анизотропии и выстроенности событий

[9]. Необходимо отметить, что в коллайдерных экспериментах не было получено каких-либо указаний на проявление выстроенности или ее аналогов, даже принимая во внимание, что энергия столкновений на Большом адронном коллайдере (ЛHC) уже превышает порог энергии взаимодействия $\sqrt{s_{\text{eff}}} \geq 4$ ТэВ в эксперименте “Памир”, при котором проявляется этот эффект.

Открытие ридж-эффекта (дальнодействующих азимутальных корреляций), сделанное при анализе данных по рождению частиц в соударениях тяжелых ионов на RHIC [13] и в протон-протонных взаимодействиях с высокой множественностью на LHC [14], мотивировало поиск каких-либо проявлений выстроенности в коллайдерных экспериментах [11, 15, 16]. В течение этого времени предлагались методы для установления связи между этими двумя эффектами [15, 16]. Определение какого-либо соответствия между ридж-эффектом и выстроенностью не увенчалось успехом из-за сильно отличающихся кинематических условий наблюдения двух механизмов, а именно: различных интервалов быстроты и систем отсчета. Более того, последующие исследования позволили найти объяснение ридж-эффекта в рамках устоявшихся теоретических подходов [17]. Этот факт, в принципе, согласуется с предположением, что наблюдаемая коллаборацией “Памир” азимутальная корреляция частиц является “шлейфом” в угловом распределении, вызванном флуктуациями. Однако в ряде работ [10, 15, 18] данное заключение ставится под сомнение.

Тем не менее, явление выстроенности не описывается в рамках современных теоретических методов и до настоящего времени не наблюдалось в экспериментах на ускорителях. В нашем подходе предлагается геометрическая интерпретация выстроенности, основанная на моделировании процедуры отбора наи-

¹⁾ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, Россия.

²⁾ Лаборатория теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова, ОИЯИ, Россия.

* E-mail: igor.lokhtin@cern.ch

** E-mail: alexn@theor.jinr.ru

*** E-mail: snig@mail.cern.ch

более энергичных частиц (или их кластеров) с учетом кинематических соотношений между ними [19]. Рассматриваемый метод демонстрирует, что высокая степень азимутальной скоррелированности может быть следствием наличия порога энергии у регистрируемых частиц совместно с законом сохранения их поперечного импульса.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСТРОЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ЕЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдаемые события в эксперименте “Памир”, а именно семейства адронов и γ -квантов, генерируются протонами космического излучения с энергией 10^4 ТэВ (и выше) на высоте h от сотен метров до нескольких километров над эмульсионной камерой в атмосфере Земли [1–3]. Продукты взаимодействия протонов и ядер мишени наблюдаются на плоскости пленки при радиальном отдалении от центра $r_{\max}$ (несколько сантиметров) с расстоянием между точками $r_{\min}$ около 1 мм. Выстроенность событий проявляется при суммарной энергии γ -квантов $\Sigma E_\gamma > 0.5$ ПэВ, что соответствует энергии столкновений $\sqrt{s_{\text{eff}}} \geq 4$ ТэВ и означает наличие порога энергии у детектируемых частиц. Далее для полноты изложения будут рассмотрены необходимые кинематические соотношения у регистрируемых событий. 4-импульс каждой частицы i , сгенерированной в первичном столкновении с протоном, может быть параметризован с помощью ее поперечного импульса p_{Ti} относительно оси столкновения z (рис. 1), азимутального угла ϕ_i , псевдобыстроты η_i в системе центра масс (с.ц.м.)

$$\left[\sqrt{p_{Ti}^2 + m_i^2} \cosh \eta_i, \quad p_{Ti} \cos \phi_i, \quad p_{Ti} \sin \phi_i, \quad \sqrt{p_{Ti}^2 + m_i^2} \sinh \eta_i \right]. \quad (1)$$

При рассматриваемых энергиях взаимодействия частицы являются ультрарелятивистскими, и как известно, в этом случае значение быстроты и псевдобыстроты практически совпадает. По этой причине в дальнейшем под быстротой будет подразумеваться псевдобыстрота. Переход от системы центра масс к лабораторной системе происходит посредством сдвига быстроты: $\zeta_i = \eta_0 + \eta_i$, где η_0, ζ_i – быстрота системы центра масс и частицы i соответственно в лабораторной системе отсчета. Для оценки максимальной степени выстроенности пренебрегается дальнейшим взаимодействием частиц в атмосфере. Тогда положение частицы на пленке определяется

$$\mathbf{r}_i = \frac{\mathbf{v}_{ri}}{v_{zi}} h = \frac{\mathbf{p}_{Ti}}{\sqrt{p_{Ti}^2 + m_i^2} \sinh(\eta_0 + \eta_i)} h, \quad (2)$$

где v_{zi} и $\mathbf{v}_{ri}$ – продольная и поперечная компоненты скорости частицы соответственно.

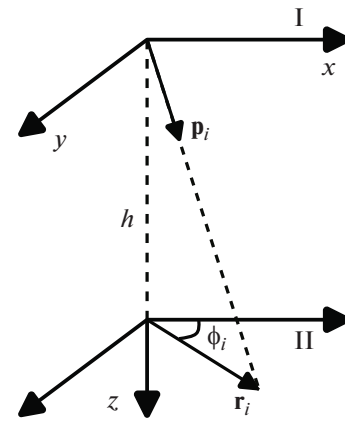


Рис. 1. Кинематика исследуемых событий. I – атмосфера Земли, где инициируются протонами космического излучения семейства адронов и фотонов, для которых исследуется выстроенность, II – плоскость эмульсионной пленки. $\mathbf{p}_i$ – импульс детектируемой частицы (кластера), $\mathbf{r}_i$ – положение частицы на пленке, ϕ_i – азимутальный угол частицы, h – высота над эмульсионной пленкой, на которой сгенерирована частица.

Поскольку размер области наблюдения составляет несколько сантиметров, то расстояния r_i должны удовлетворять соотношениям

$$r_{\min} < r_i, \quad (3)$$

$$r_i < r_{\max}. \quad (4)$$

Ограничение (3) говорит о несовпадении точек на пленке с центром, формируемым частицами из области фрагментации протона и движущимися вдоль оси столкновения z . Дистанция между частицами определяется выражением

$$d_{ij} = \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\phi_i - \phi_j)} \quad (5)$$

и должна удовлетворять условию

$$d_{ij} > r_{\min}, \quad (6)$$

которое означает отличие координат событий i, j друг от друга. При несоблюдении условия (6) частицы образуют кластер до того момента, когда ограничение (6) снова начинает выполняться. При этом положение нового кластера (или частицы-кластера) определяется как координаты центра масс двух тел в классической механике

$$\mathbf{r}_{ij} = (\mathbf{r}_i E_i + \mathbf{r}_j E_j) / (E_i + E_j). \quad (7)$$

Из числа кластеров, которые удовлетворяют условиям (3), (4) и (6), отбираются 2, ..., 7 с наибольшей энергией, и затем для них вычисляется выстроенность λ_N [6]:

$$\lambda_N = \frac{\sum_{i \neq j \neq k}^N \cos(2\phi_{ijk})}{N(N-1)(N-2)}, \quad (8)$$

с учетом центрального кластера, т.е. $N - 1 = 2, \dots, 7$. В определении (8) ϕ_{ijk} — угол между векторами $(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j)$ и $(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i)$ для центрального события $\mathbf{r} = 0$. Выстроенность — это безразмерный параметр, который изменяется в пределах от $-1/(N - 1)$ до 1 и характеризует расположение N точек вдоль прямой линии (рис. 2а). Комбинаторный фактор $N(N-1)(N-2)$ производит нормировку параметра λ_N , так как он учитывает количество вариантов выбора трех из N точек. Например, для случая $N = 3$ (треугольник), каждый угол которого учитывается дважды определением (8), комбинаторный множитель $N(N-1)(N-2) = 6$ и тем самым нормирует λ_3 . Если конфигурация трех точек симметрична, т.е. это равносторонний треугольник (рис. 2б), то $\lambda_3 = -0.5$. Важно отметить, что $\lambda_N = 1$ при строгом расположении точек на прямой линии, независимо от их количества N (рис. 2в). Под степенью выстроенности P_N понимают долю от общего числа событий, для которых $\lambda_N > 0.8$ [6] с числом энергетических центров в этих событиях не меньше N .

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСТРОЕННОСТИ

Как уже описывалось ранее, мотивация исследования заключается в стремлении оценить влияние непосредственно процедуры отбора наиболее энергичных частиц-кластеров на явление выстроенности, наблюдаемое в эксперименте “Памир”. Немалым побуждающим фактором для предлагаемого метода является отсутствие каких-либо проявлений выстроенности или ее аналогов в экспериментах с ускорителями. В рамках подхода предпринята попытка понять — каким образом порог энергии, сохранение поперечного импульса отражаются на степени выстроенности регистрируемых частиц. Разработанная модель основана на классическом методе Монте-Карло и включает следующие этапы:

- случайным образом генерируются координаты двух, трех, четырех событий на плоскости (xy) в квадрате с центром в начале координат;
- координаты каждого события находятся в диапазоне $x = [-1; 1], y = [-1; 1]$, центральная точка $O(0; 0)$ всегда зафиксирована;
- рассчитывается выстроенность (степень выстроенности) по определению (8) для трех, четырех, пяти точек.

Область генерации, в данном случае квадрат, имитирует плоскость эмульсионной пленки, используемой в эксперименте “Памир”. Отдаленность каждого события от точки O задается радиальным расстоянием $|\mathbf{r}_i| = \sqrt{x^2 + y^2}$ и воспроизводит положение (2) частицы на пленке. Радиус вписанной в квадрат окружности равен 1 и выбран в качестве характеристического масштаба, при необходимости все расстояния могут

быть пересчитаны в традиционные единицы измерения. Результаты моделирования для $N = 3, 4, 5$ (2, 3, 4 случайные точки + точка O соответственно) в сравнении с данными эксперимента “Памир” показаны в табл. 1. Из сравнения данных в табл. 1 можно явно заключить, что хаотического распределения точек на плоскости недостаточно для описания степени выстроенности, наблюдаемой коллаборацией “Памир”, даже с учетом большой экспериментальной погрешности измерения.

Степень выстроенности трех точек P_3 (две случайно расположенные точки и центральная точка O в начале координат) может быть оценена из геометрических соотношений. Подробные детали можно найти в недавней работе [19], здесь же приведен лишь краткий анализ и некоторые выводы. Минимальное значение степени выстроенности для конфигурации из трех точек дается выражением

$$P_3^{\min}(\lambda_0) = \frac{5\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{1-\lambda_0}}{4\pi}, \quad (9)$$

из которого при $\lambda_0 = 0.8$ получим $P_3^{\min}(\lambda_0) \simeq 0.16$, что весьма близко к значению $P_3 = 0.2$ из Монте-Карло-моделирования (табл. 1). Помимо этого, из отношения площадей треугольника и окружности с центром в точке O вытекает выражение для зависимости степени выстроенности от числа частиц-кластеров N [19]

$$P_N = P_3^{N-2}, \quad (10)$$

которое также хорошо согласуется с результатами нашего моделирования в табл. 1.

3.1. Влияние порога энергии и сохранения поперечного импульса на выстроенность

В данном разделе продемонстрировано влияние дополнительных кинематических ограничений, имитирующих в некотором роде условия эксперимента “Памир”, на степень выстроенности. Положение частицы i на эмульсионной пленке определяется быстротой η_i и поперечным импульсом $\mathbf{p}_{T_i}$. Радиус-вектор $\mathbf{r}_i$ частицы (кластера) направлен вдоль ее поперечного импульса, его модуль $r_i = |\mathbf{r}_i|$ возрастает с увеличением поперечного импульса и уменьшается с ростом скорости. Существование порога энергии у детектируемых в эксперименте фотонов и адронов ($\Sigma E_\gamma > 0.5$ ПэВ) означает, что должен быть порог в радиальных расстояниях у событий на эмульсионной пленке. В нашем подходе суммарный энергетический порог запишется в виде

$$|\mathbf{r}_1| + |\mathbf{r}_2| + \dots + |\mathbf{r}_{N-1}| > (N-1)R, \quad (11)$$

где R — средний энергетический порог на одну частицу. Полный поперечный импульс всех частиц должен быть равен нулю ввиду его сохранения. Сохранение поперечного импульса учитывается в виде “баланса” Δ полного поперечного импульса или, эквивалентно,

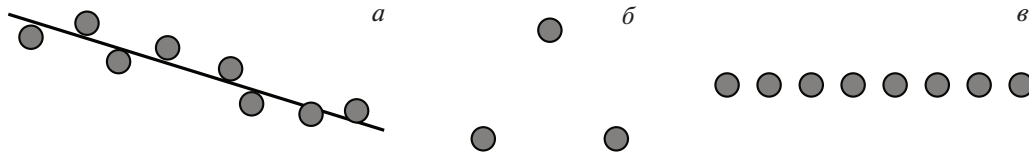


Рис. 2. Некоторые примеры событий с выстроенностью. *a* — иллюстрация произвольного расположения точек вдоль прямой линии, *б* — симметричная конфигурация трех точек на плоскости (равносторонний треугольник), $\lambda_3 = -0.5$, *в* — события лежат строго вдоль прямой линии, $\lambda_N = 1$.

Таблица 1. Результаты моделирования степени выстроенности P_N для $N=3, 4, 5$ (2, 3, 4 случайные точки + точка O соответственно) в сравнении с данными эксперимента “Памир”

N	3	4	5
Результаты Памир	0.83 ± 0.27	0.67 ± 0.33	0.33 ± 0.24
Результаты моделирования	0.2	0.04	0.008

модуля суммарного радиус-вектора между точками на плоскости эмульсионной пленки

$$|\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \dots + \mathbf{r}_{N-1}| < \Delta. \quad (12)$$

На рис. 3а, 3б формально проиллюстрировано влияние порога R и баланса Δ суммарного поперечного импульса на примере трех событий ($N = 3$), смоделированных в квадрате $x = [-1; 1]$, $y = [-1; 1]$. При помощи порога R остаются точки вне круга радиуса R , а влияние Δ выражается в отклонении координат событий от прямой линии, проходящей через точку $O(0; 0)$ и противоположные углы квадрата. Согласно описанному подходу, максимальная степень выстроенности будет достигаться при большом значении R (углы квадрата на рис. 3а) и близком к нулю Δ (противоположные углы квадрата на рис. 3б).

Поскольку энергетический порог (11) имеет азимутальную симметрию (круг), а область генерации событий (квадрат) имеет отличный тип симметрии, степень выстроенности может быть “чувствительна” к форме области при значениях R , близких к $R_{\max}$, которое определяется геометрией области наблюдения-генерации событий и высотой взаимодействия h . С целью проверки этого предположения далее генерация точек будет производиться также и в эллипсе с различным эксцентриситетом: $e = 0$ (круг), $e = 0.5$ (рис. 3в). Центр эллипса зафиксирован в начале координат O , большая полуось эллипса равна 1 и совпадает с осью ординат, малая полуось совпадает с осью абсцисс.

3.2. Результаты моделирования

На рис. 4а–в показаны результаты моделирования степени выстроенности как функции баланса поперечного импульса для трех точек $P_3(\Delta)$ с новыми кинематическими ограничениями R (11) и Δ (12). В случае генерации в квадрате (рис. 4а) отчетливо видно, что при значении R , близком к $R_{\max} = \sqrt{2}$, наблюдается максимальная степень выстроенности в широком диапазоне Δ . Это обусловлено тем, что две слу-

чайные точки расположены в основном в противоположных углах квадрата. Выстроенность начинает уменьшаться при увеличении значения Δ в условии (12), поскольку в этом режиме становятся возможными позиции случайных точек во всех углах квадрата. Похожее поведение имеет место для эллипса ($R_{\max} = 1$) с эксцентриситетом $e = 0.5$ (рис. 4б). В случае круга, $e = 0$ (рис. 4в), степень выстроенности начинает уменьшаться при значении $\Delta_0 = 0.44R$, которое подразумевает азимутальную симметрию области генерации и соответствует максимальному значению баланса суммарного радиус-вектора [19]. Как и ожидалось, при промежуточных значениях R выстроенность не чувствительна к форме области моделирования.

Результаты моделирования для четырех точек $P_4(\Delta)$ (три случайные и центральная точка O) представлены на рис. 5а–в. Благодаря кинематическим ограничениям R (11) и Δ (12) заметно увеличение степени выстроенности на фактор 3, при умеренных R и Δ , в сравнении с результатом без ограничений $P_4 = 0.04$ (табл. 1). В этом случае $P_4(\Delta)$ также не чувствительна к форме области. При приближении R к $R_{\max}$ наблюдается несколько неожиданное поведение: очень малая выстроенность при малых Δ . Это связано с нечетным количеством случайно сгенерированных точек. При достаточно больших значениях R баланс Δ для нечетного числа точек будет также порядка R , если точки находятся вблизи прямой линии, проходящей через начало координат. Малые Δ не позволяют сгенерироваться таким конфигурациям, и поэтому степень выстроенности близка к нулю. При промежуточных R вероятность конфигураций с малым Δ и, следовательно, с достаточно высоким значением выстроенности повышается, поскольку доступны различные радиальные расстояния, полностью не исключенные условием (11). Описанное поведение характерно для всех типов формы области моделирования.

Степень выстроенности для пяти точек в виде $P_5(\Delta)$ показана на рис. 6а–в. В этом случае также наблюда-

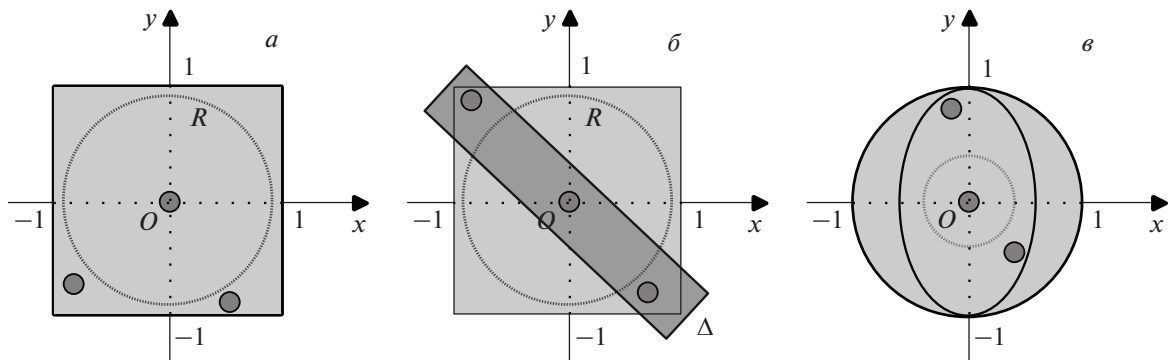


Рис. 3. Новые кинематические ограничения на примере трех ($N = 3$) событий. *a* – точечный круг иллюстрирует энергетический порог детектируемых частиц в виде порога радиального расстояния R , *б* – эффект от “баланса” Δ полного поперечного импульса или, эквивалентно, модуля суммарного вектора между точками на плоскости эмульсионной пленки. *a*, *б* – генерация событий в квадрате, *в* – генерация событий в круге и эллипсе.

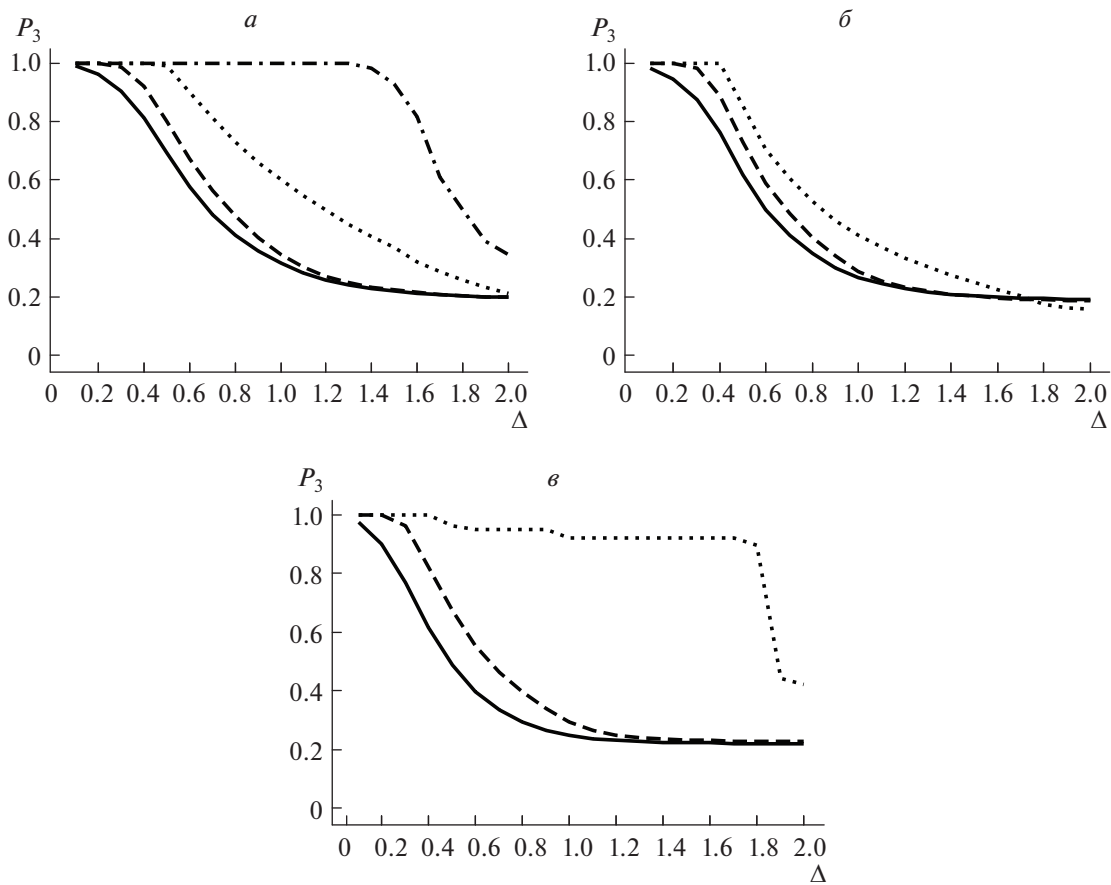


Рис. 4. Степень выстроенности трех точек P_3 как функция баланса Δ суммарного радиус-вектора при различных значениях среднего порога R . *a*, *б*, *в* – область генерации событий: квадрат, круг, эллипс с эксцентриситетом $e = 0.5$ соответственно. Кривые: сплошная – $R = 0$, штриховая – $R = 0.4$, точечная – $R = 0.9$, штрихпунктирная – $R = 1.2$. Для квадрата $R_{\max} = 1.41$, для круга и эллипса $R_{\max} = 1$.

ется увеличение на фактор приблизительно 3 при умеренных R и относительно малых Δ в сравнении с результатом без условий (11) и (12) $P_5 = 0.008$ (табл. 1) и нечувствительность $P_5(\Delta)$ к форме области генерации. При R , близком к $R_{\max}$, для квадрата (рис. 6*a*) и эллипса (рис. 6*в*) начинают проявляться флуктуа-

ции с большой амплитудой, которые отсутствуют для круга (рис. 6*б*). Более детально сингулярное поведение $P_5(\Delta)$ для квадрата и эллипса продемонстрировано вблизи $R_{\max}$ на рис. 7. Такое поведение связано с наличием выделенного направления у типа симметрии квадрата и эллипса. Флуктуации наблюдались и

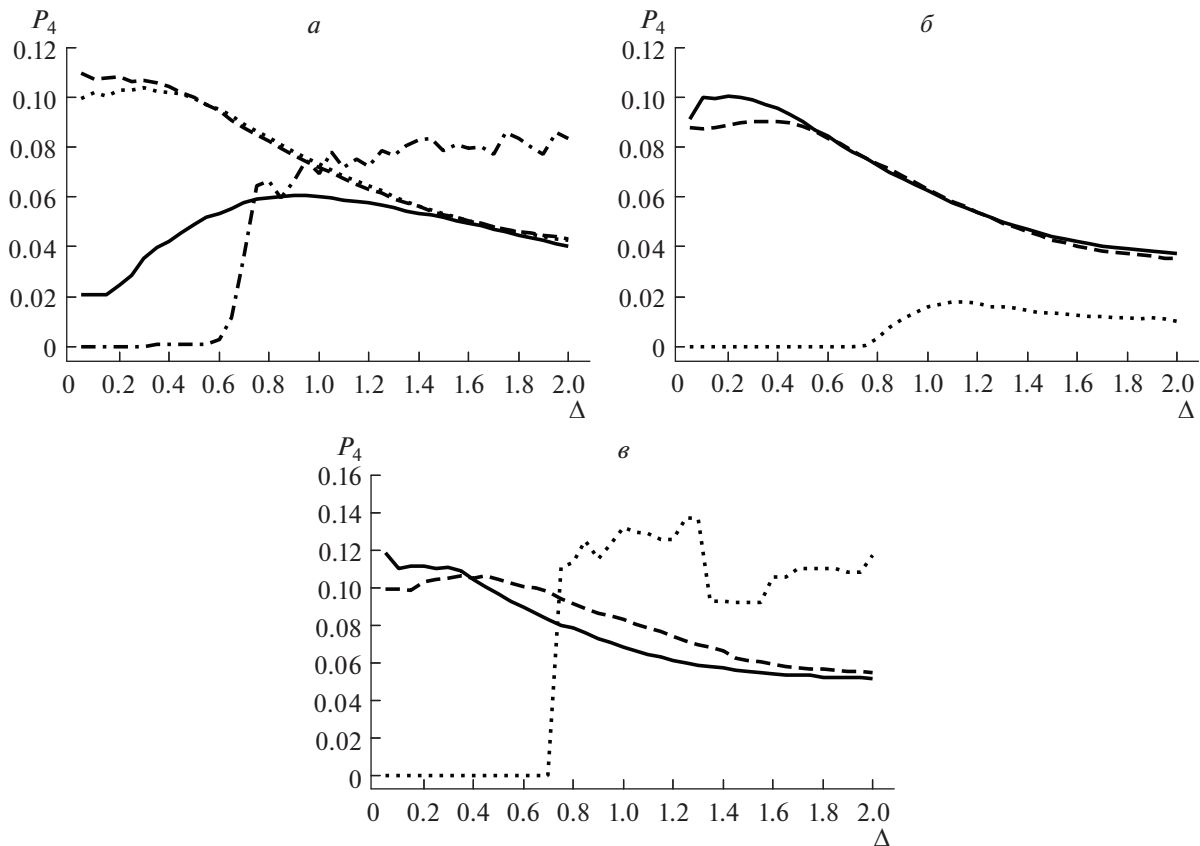


Рис. 5. Степень выстроенности четырех точек P_4 как функция баланса Δ суммарного радиус-вектора при различных значениях среднего порога R . *а* – генерация событий в квадрате, *б* – в круге, *в* – в эллипсе с эксцентриситетом $e = 0.5$. Кривые: сплошная – $R = 0$, штриховая – $R = 0.4$, точечная – $R = 0.9$, штрихпунктирная – $R = 1.2$. Для квадрата $R_{\max} = 1.41$, для круга и эллипса $R_{\max} = 1$.

в $P_4(\Delta)$ для квадрата (рис. 5*а*) и эллипса (рис. 5*в*), но не столь выражено, как в случае пяти точек.

На рис. 8 приведены результаты моделирования степени выстроенности для трех, четырех, пяти частиц-кластеров в сравнении с данными эксперимента “Памир”. Отчетливо видно, что для трех точек ($N = 3$) модель, с учетом порога R и баланса Δ (точечная линия), верно описывает экспериментальные значения, в то время как для четырех ($N = 4$) и пяти ($N = 5$) энергетических центров предлагаемого подхода недостаточно для описания данных эксперимента “Памир” (сплошная линия), однако наблюдается значительное улучшение (примерно на фактор 3) в сравнении с результатом без дополнительных кинематических ограничений R и Δ (нижняя пунктирная линия).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОоды

В работе обсуждаются кинематические причины возникновения выстроенности (азимутальной скоррелированности) у семейств адронов и фотонов, наблюдаемой коллаборацией “Памир” в высокогорном эксперименте с космическими лучами. В основе предложенного подхода описания выстроенности лежит геометрическое моделирование координат событий классическим методом Монте-Карло. Наличие поро-

га энергии ($\Sigma E_\gamma > 0.5$ ПэВ) в эксперименте “Памир” имитируется с помощью суммарного порога радиального расстояния (11) для детектируемых частиц (кластеров) на плоскости эмульсионной пленки. Влияние сохранения поперечного импульса частиц отражается в форме баланса (12) суммарного радиус-вектора между случайными событиями. Закон сохранения полного поперечного импульса в виде баланса Δ позволяет отбирать конфигурации с максимально близким расположением точек к прямой линии, а средний энергетический порог R предоставляет возможность использовать реалистичные значения Δ для получения высокой степени выстроенности.

Для случая трех кластеров ($N = 3$) описанный подход позволяет получить максимальную степень выстроенности P_3 при значении R вблизи $R_{\max} = \sqrt{2}$ и близком к нулю Δ , т.е. реализуется так называемая back-to-back конфигурация частиц-кластеров. Для случаев четырех ($N = 4$) и пяти ($N = 5$) энергетических центров разработанной модели недостаточно для описания центральных значений P_4 и P_5 в эксперименте “Памир” (рис. 8), однако с учетом погрешностей измерения результаты моделирования весьма близки к данным коллаборации “Памир”. Для всех типов области генерации событий (квадрат, круг, эллипс) полученные результаты не зависят от ее абсо-

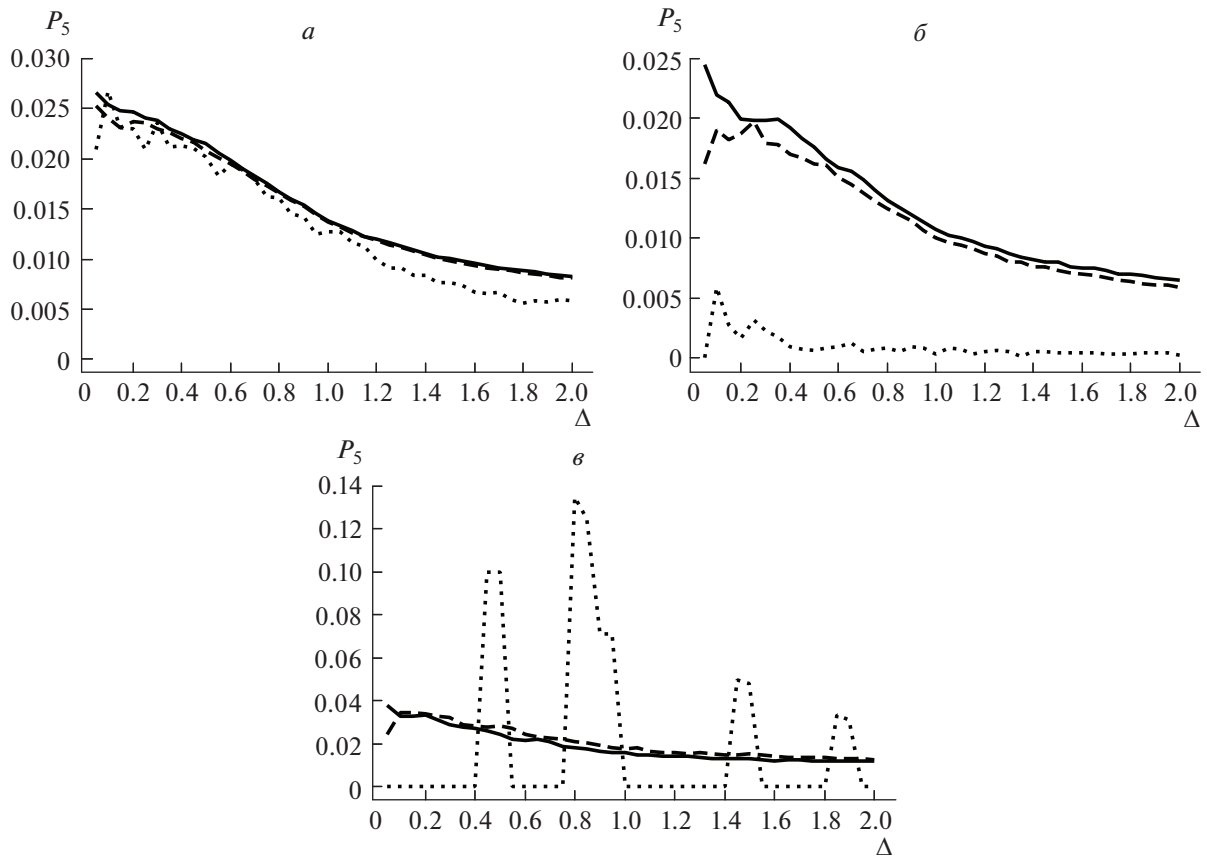


Рис. 6. Степень выстроенности пяти точек P_5 как функция баланса Δ суммарного радиус-вектора при различных значениях среднего порога R . *а* – моделирование в квадрате, *б* – в круге, *в* – в эллипсе с эксцентриситетом $e = 0.5$. Кривые: сплошная — $R = 0$, штриховая — $R = 0.4$, точечная — $R = 0.9$. Для квадрата $R_{\max} = 1.41$, для круга и эллипса $R_{\max} = 1$.

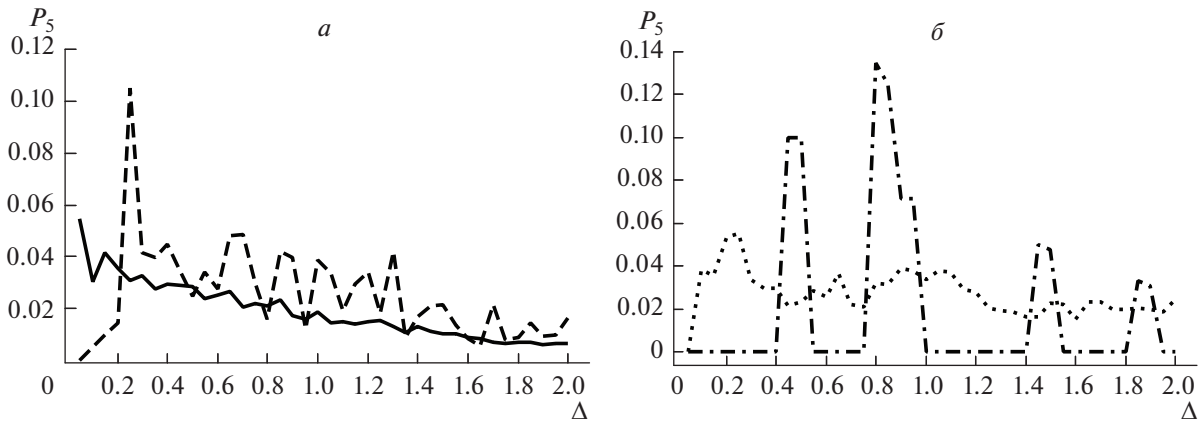


Рис. 7. Флуктуации степени выстроенности для пяти точек вблизи $R_{\max}$. *а* – область генерации квадрат, сплошная кривая — $R = 1.1$, штриховая — $R = 1.2$. *б* – область генерации эллипс с эксцентриситетом $e = 0.5$, точечная кривая — $R = 0.8$, штрихпунктирная — $R = 0.9$. Для квадрата $R_{\max} = 1.41$, для эллипса $R_{\max} = 1$.

лютного размера, однако чувствительны к форме области и ее границы. Подчеркнем, что значения P_3 , P_4 , P_5 без порога R и баланса Δ (табл. 1) совпадают с расчетами в работе [11], основанными на моделировании методом Монте-Карло с использованием генератора событий PYTHIA [20].

Полученные в рамках представленного геометрического подхода результаты описывают максимальную степень выстроенности для трех точек в широком

диапазоне значений баланса Δ суммарного радиального расстояния, однако недостаточны для объяснения эффекта в случае четырех и пяти кластеров. Дальнейшее развитие этой задачи видится в использовании генераторов ядро-ядерных взаимодействий типа HYDJET++ [21], для которых возможно моделирование анизотропного потока для нецентральных столкновений, что позволит модифицировать параметры вычисления выстроенности четырех и пяти кластеров

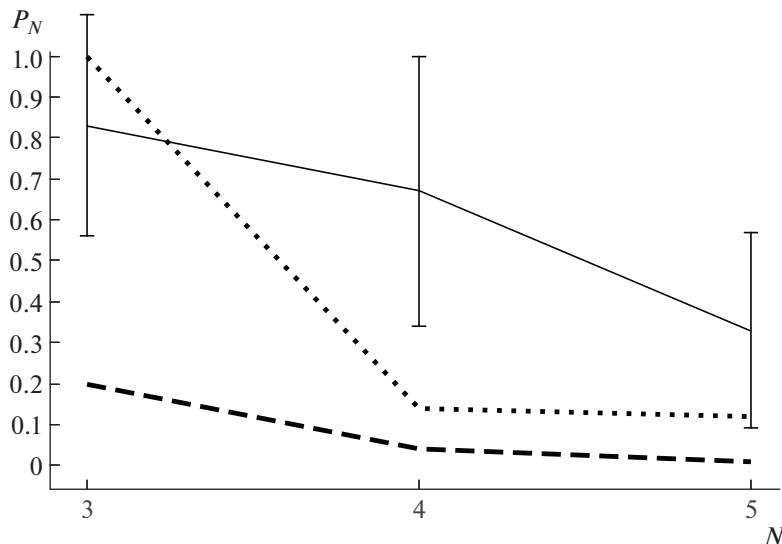


Рис. 8. Сравнение результатов моделирования степени выстроенности P_N с экспериментальными данными коллаборации “Памир” для трех, четырех, пяти точек. Сплошная кривая — результат эксперимента, точечная кривая — моделирование событий с энергетическим порогом R и балансом поперечного импульса Δ , штриховая кривая — хаотическое распределение точек на плоскости, без дополнительных кинематических ограничений (табл. 1).

и в перспективе может привести к корректной интерпретации данных эксперимента Памир.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность организаторам конференции “The 4th International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics” (ISCR-2023), на которой были представлены результаты этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pamir Collab. (A. Borisov *et al.*), in *Proceedings of the 4th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Beijing*, Ed. by D. Linkai (1986), p. 4.
2. Pamir Collab., in *Proceedings of the 21st International Cosmic Ray Conference, Adelaide, Australia, 1989*, Ed. by R. J. Protheroe (Univ. of Adelaide, Australia, 1990), p. 227.
3. S. A. Slavatskiy, in *Proceedings of the 5th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Lodz, Poland, 1988*, Ed. by M. Giler (Univ. of Lodz, Poland, 1989), p. 90.
4. Сотрудничество “Памир” (Л. Т. Барадзей и др.), Изв. АН СССР. Сер. физ. **50**, 2125 (1986).
5. J. N. Capdevielle, J. Phys. G **14**, 503 (1988).
6. V. V. Kopenkin, A. K. Managadze, I. V. Rakobolskaya, and T. M. Roganova, Phys. Rev. D **52**, 2766 (1995).
7. F. Halzen and D. A. Morris, Phys. Rev. D **42**, 1435 (1990).
8. В. В. Копенкин, А. К. Манагадзе, И. В. Ракобольская, Т. М. Роганова, Изв. РАН. Сер. физ. **58**, 13 (1994).
9. В. И. Галкин, А. К. Манагадзе, В. И. Оседло, Т. М. Роганова, Г. Шозиёв, Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон., № 6, 34 (2003).
10. R. A. Mukhamedshin, JHEP **0505**, 049 (2005).
11. I. P. Lokhtin, A. K. Managadze, L. I. Sarycheva, and A. M. Snigirev, Eur. Phys. J. C **44**, 51 (2005).
12. A. De Roeck, I. P. Lokhtin, A. K. Managadze, L. I. Sarycheva, and A. M. Snigirev, in *Proceeding of the 13th International Conference on Elastic and Diffractive Scattering (Blois Workshop) - Moving Forward into the LHC Era, CERN, Geneva, Switzerland, 2009*, Ed. by M. Deile, D. d’Enterria, and A. De Roeck (Verlag Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY, Hamburg, 2010), p. 308; arXiv: 1002.3527 [hep-ph].
13. PHOBOS Collab., Phys. Rev. C **81**, 024804 (2010).
14. CMS Collab. (V. Khachatryan *et al.*), JHEP **1009**, 091 (2010).
15. R. A. Mukhamedshin, Eur. Phys. J. C **60**, 345 (2009).
16. И. П. Лохтин, А. К. Манагадзе, А. М. Снигирев, ЯФ **76**, 645 (2013) [Phys. At. Nucl. **76**, 602 (2013)]. I. P. Lokhtin, A. K. Managadze, A. M. Snigirev, Phys. Atom. Nucl. **76**, 602 (2013).
17. G. Eyyubova, V. L. Korotkikh, I. P. Lokhtin, S. V. Petrushanko, A. M. Snigirev, L. V. Bravina, and E. E. Zabrodin, Phys. Rev. C **91**, 064907 (2015).
18. R. A. Mukhamedshin, Eur. Phys. J. C **82**, 155 (2022).
19. I. P. Lokhtin, A. V. Nikolskii, and A. M. Snigirev, Eur. Phys. J. C **83**, 324 (2023).
20. T. Sjostrand, Comput. Phys. Commun. **135**, 238 (2001).
21. I. P. Lokhtin *et al.*, Comput. Phys. Commun. **180**, 779 (2009).

KINEMATIC DESCRIPTION OF ALIGNMENT EFFECT IN COSMIC RAYS

I. P. Lokhtin¹⁾, A. V. Nikolskii²⁾, A. M. Snigirev^{1),2)}

¹⁾*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, RU-119991, Moscow, Russia*

²⁾*Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR, RU-141980, Dubna, Russia*

The important role of kinematic constraints for the origin of the alignment of hadron and photon families observed by the Pamir collaboration in emulsion experiments with cosmic rays is discussed. Within the framework of the suggested approach it is shown that the high degree of alignment of the interaction products of the target nuclei and cosmic rays can be a consequence of the selection procedure of the most energetic clusters of particles together with the law of conservation of transverse momentum. The obtained results correctly describe the experimental data for three energetic centers and are also close enough to the measurements in the case of four and five clusters, which indicates encouraging prospects for the proposed method of explaining the alignment phenomenon.