

УДК 539.171

## ИЗУЧЕНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ В ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В. И. Галкин, А. К. Манагадзе, В. И. Оседло, Т. М. Роганова, Г. Шозиёев

(кафедра космических лучей и физики космоса, НИИЯФ)

E-mail: mng@decl.sinp.msu.ru

В работе рассмотрено поведение различных параметров анизотропии применительно к пространственному распределению в гамма-адронных семействах частиц космических лучей (КЛ). Установлена чувствительность избранных параметров к типу первичной частицы, породившей семейство. Исследуются пространственная анизотропия и эффект выстроенности во взаимодействиях КЛ при  $E_0 = 10^{13} - 10^{14}$  эВ по данным эксперимента RUNJOB.

### Введение

Падающие на атмосферу Земли высокоэнергичные частицы космического излучения, взаимодействуя с ядрами атомов вещества, являются замечательным источником сведений о механизме адрон-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. В составе первичных космических лучей (ПКЛ) содержатся ядра разной массы от протона до ядер группы железа. При взаимодействии частиц ПКЛ в атмосфере рождаются гамма-кванты (через распад нейтральных мезонов) и адроны (в основном  $\pi$ -мезоны и нуклоны, а также фрагменты ядер), порождающие ядерно-электромагнитный каскад (ЯЭК) частиц в воздухе. Частицы, генеалогически связанные одним ЯЭК, называются семейством. Они приходят на регистрирующие установки практически с одинаковыми зенитными и азимутальными углами. Изучение таких ансамблей частиц позволяет судить о характеристиках адрон-ядерных взаимодействий ПКЛ.

При использовании в качестве детектора рентгеноэмульсионных камер значительной площади, устанавливаемых на большой высоте в горах, можно регистрировать семейства, произошедшие от первичных частиц с энергиями  $E_0$  в диапазоне  $5 \times 10^{14} - 10^{17}$  эВ.

При размещении эмульсионной камеры на борту баллона-аэростата экспозиция уменьшается во много раз по сравнению с экспериментами на горах, но появляется возможность изучить непосредственно взаимодействия частиц ПКЛ, неискаженные ЯЭК в атмосфере. Конструкции камер, несомых аэростатами, позволяют изучать ядерные взаимодействия, произошедшие как в атмосфере над камерой, так и внутри камер. При этом диапазон исследуемых энергий в целом ниже, чем для больших эмульсионных камер на горах.

### Явление выстроенности

В высокогорном эмульсионном эксперименте «Памир» при изучении гамма-адронных семейств высоких энергий было обнаружено явление «выстро-

енности» наиболее высокоэнергичных объектов в семействе вдоль прямой линии на пленке в плоскости наблюдения [1–5]. Такая конфигурация соответствует компланарному разлету вторичных частиц в акте ядерного взаимодействия, ответственного за образование данного события. Этот эффект, значительно превышающий вероятность случайных событий такого рода, по данным сотрудничества «Памир», возникает при  $E_0 > 10^{16}$  эВ. Существование эффекта выстроенности при таких энергиях было подтверждено позднее и в других экспериментах [6–8].

Открытие явления компланарного разлета (до сих пор не нашедшее адекватного теоретического объяснения) обуславливает особый интерес к исследованию пространственной анизотропии в гамма-адронных семействах.

### Критерии выстроенности и анизотропии пространственного распределения частиц

Для исследования пространственной анизотропии в гамма-адронных семействах важно найти чувствительные к ней количественные критерии. В настоящей работе анализ данных проводится с использованием традиционного для работ сотрудничества «Памир» критерия  $\lambda$  и двух не столь апробированных до сих пор критериев  $r$  и  $Z$ .

Параметром, замечательно отражающим свойство расположения частиц вдоль прямой линии, является параметр  $\lambda$  [9]:

$$\lambda_m = \frac{\sum_{i \neq j \neq k}^m \cos(2\varphi_{i,j,k})}{m(m-1)(m-2)},$$

где  $\varphi_{i,j,k}$  — угол между векторами, проведенными из точки  $k$  в точку  $i$  и из точки  $k$  в точку  $j$ ,  $m$  — количество точек. Параметр изменяется от единицы (для  $m$  точек на прямой линии) до  $-1/(m-1)$  (в случае изотропии). Этот критерий отражает именно расположение точек вдоль прямой линии, в то время как многие другие известные параметры характеризуют эллиптичность или общую анизотропию в располо-

жении ансамбля точек. Наиболее часто используется критерий выстроенности  $\lambda_4 > 0.8$ .

Параметры  $r$  и  $Z$  были введены в практику эмульсионных исследований в работах [1, 10]. Коэффициент линейной корреляции  $r$  имеет вид

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[ \sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}},$$

где  $x_i, y_i, \bar{x}, \bar{y}$  — координаты частиц и средние этих величин. При значении  $r = 0$  частицы расположены изотропно, при  $r = 1$  частицы расположены вдоль прямой линии.

Иногда более предпочтительна величина

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r},$$

которая изменяется от  $+\infty$  (для  $m$  точек на прямой) до  $\approx 0$  (в почти изотропных случаях). Для выделения случаев выстроенности используется критерий  $Z > 3$ .

### Расчеты фоновой выстроенности

Для оценки величины фоновой (т.е. случайной) выстроенности необходимо провести анализ искусственных модельных событий. При проведении таких расчетов использовалась известная современная модель ядерного взаимодействия QGSJET [11, 12]. Квазидинамическая модель QGSJET основывается на теории кварк-глюонных струн и включает в себя генерацию полужестких струй и учитывает столкновения ядро-ядро. Эта модель хорошо работает в области излома первичного спектра и дает достаточно надежные предсказания при энергиях до  $10^{20}$  эВ.

По модели QGSJET были наиграны искусственные события для различных типов первичной частицы с энергией 1 ТэВ/нуклон (по 1000 событий для  $p$  и  $\alpha$ , по 500 событий для C, Mg, Fe) и 20 ПэВ/ядро (по 10000 событий для пяти типов налетающих частиц —  $p, \alpha, C, Mg, Fe$ ).

Параметры анизотропии  $\lambda, r, Z$  определялись для трех, четырех и пяти наиболее высокоэнергичных частиц в каждом взаимодействии (отдельно для адронной компоненты и для электромагнитной компоненты, называемой далее гамма-компонентой). Следует помнить, что выстроенность в эксперименте наблюдалась именно для самых высокоэнергичных объектов.

Далее на рисунках представлены данные только для четырех частиц, так как именно такие критерии являются наиболее употребительными. Уровень фоновой случайной выстроенности в этом случае невелик, а эффект (в эксперименте) достаточно заметен. Чтобы наблюдать заметный эффект на большем количестве частиц, нужна высокая экспериментальная статистика.

На рис. 1, а показаны распределения по параметру  $\lambda_4$  для адронной компоненты вторичных частиц

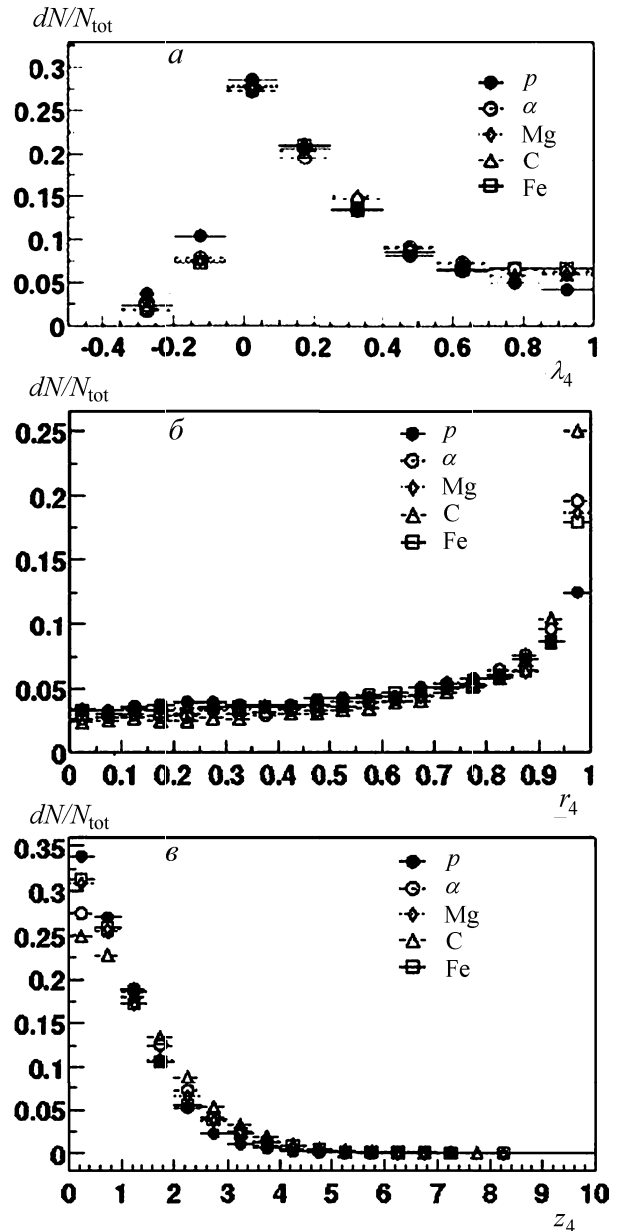


Рис. 1. Распределение по параметрам анизотропии  $\lambda_4$  (а),  $r_4$  (б) и  $Z_4$  (в) для четырех наиболее энергичных вторичных частиц адронной компоненты от взаимодействий ядер различного типа. Расчеты выполнены по модели QGSJET, по 10000 событий для ядра каждого типа, первичная энергия  $E_0 = 20$  ПэВ

в ядерном взаимодействии, рассчитанные по искусственным событиям от разных первичных ядер. В диапазоне  $\lambda_4 = 0.8-1.0$  можно видеть, что частота анизотропных событий для всех ядер выше, чем для протона. На рис. 1, б, в представлены аналогичные распределения по параметрам  $r_4$  и  $Z_4$  для адронной компоненты вторичных частиц. Здесь также видны отличия в распределениях для протона и для ядер в областях, характерных для эффекта выстроенности, особенно отличаются события от углерода C.

Следует отметить, что аналогичный анализ анизотропии для гамма-компоненты (опущенный из-за ограниченного объема статьи) не выявляет отличий в частоте появления анизотропии для разных

первичных ядер. Это неудивительно, если учесть, что при распаде  $\pi^0$ -мезонов на два гамма-кванта исходная компланарность разлета вторичных может быть нарушена; таким образом, уровень вероятности фоновой выстроенности для событий от всех типов ядер совпадает с наименьшим случайным значением для протона, если мы анализируем только гамма-компоненту событий.

Следовательно, в событиях от протонов вероятность возникновения анизотропии не отличается для адронной и гамма-компоненты, а в событиях от ядер вероятность наблюдения анизотропии в адронной компоненте выше, чем в гамма-компоненте, что особенно ярко проявляется в событиях от ядер группы С.

Представляется также важным проверить, не меняется ли поведение случайного фона при существенном изменении энергии взаимодействия. На рис. 2 показано сравнение распределений по  $\lambda_4$  для  $\gamma$ -компоненты и адронной компоненты для двух разных энергий взаимодействия протона:  $E_0 = 1$  ТэВ и  $E_0 = 20$  ПэВ. Не наблюдается разницы в доле выстроенных событий в этом широком диапазоне энергий.

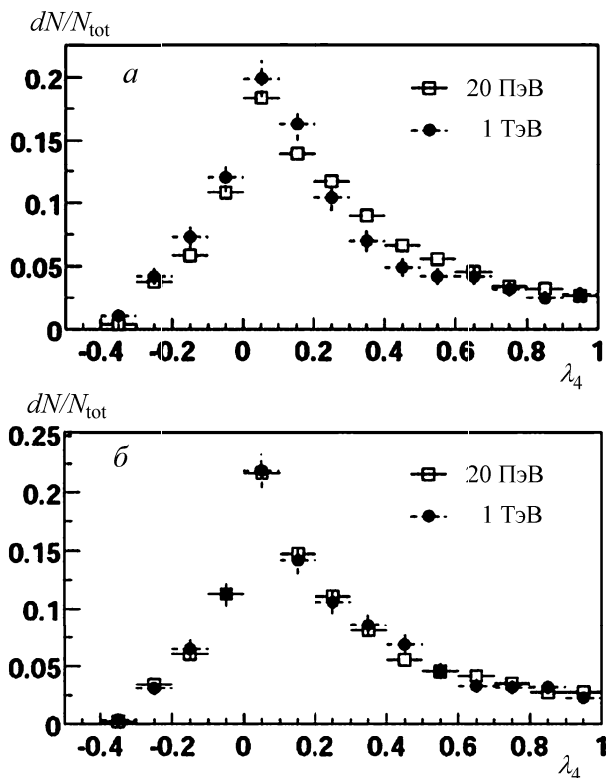


Рис. 2. Сравнение распределений по параметру  $\lambda_4$  (для четырех частиц) для гамма-компоненты (а) и для адронной компоненты (б) в событиях от первичного протона с исходной энергией  $E_0 = 20$  ПэВ и  $E_0 = 1$  ТэВ

Тот же вывод можно сделать и из сравнения распределений по  $r_4$  и  $Z_4$  при тех же разных энергиях  $E_0$ . Это справедливо для событий и от первичного протона, и от ядра железа, и от других типов ядер. Из-за ограниченного объема статьи эти распределения здесь не показаны.

В частности, отсюда следует, что «включение» генерации полужестких струй при  $E_0 = 20$  ПэВ не меняет частоту событий с выстроенностью по сравнению с практическим отсутствием струй при  $E_0 = 1$  ТэВ. Таким образом, струйный механизм вряд ли может служить объяснением выстроенности, что достаточно естественно, если помнить, что наиболее энергичные частицы связаны с фрагментационной областью спектра их рождения.

### Анализ данных эксперимента RUNJOB

В 1995-99 гг. были проведены успешные длительные полеты (6–7 суток) стратосферных баллонов с эмульсионными камерами [13] российско-японского сотрудничества RUNJOB на борту по трассе Камчатка–Поволжье на высоте 32 км, что соответствует глубине атмосферы около  $10 \text{ г/см}^2$ . Падающие на камеру частицы ПКЛ взаимодействовали внутри камеры, адронная и гамма-компоненты вторичных частиц от этих взаимодействий регистрировались в разных блоках камер, методика позволяла также установить тип первичного ядра ПКЛ, породившего конкретное событие.

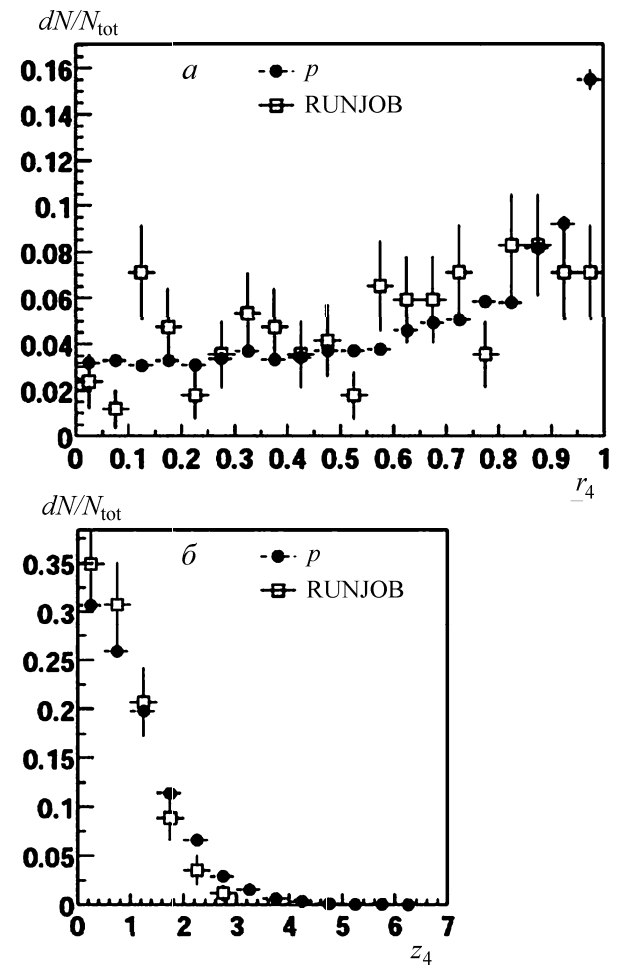


Рис. 3. Сравнение распределений по параметру анизотропии  $r_4$  (а) и  $Z_4$  (б) для четырех частиц гамма-компоненты в эксперименте RUNJOB и в расчете для первичного протона по модели QGSJET

Таблица 1

Доля (в %) выстроенных событий по модельным расчетам и по экспериментальным данным RUNJOB 1995–1996 гг.

Критерий	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
	Гамма-компонента от первичного протона (10 000 событий)	Гамма-компонента в камерах RUNJOB-95 и -96 с $\sum E_\gamma > 3$ ТэВ (168 событий)	Адронная компонента от первичного ядра железа (10 000 событий)	Адронная компонента от всех первичных ядер с зарядом $Z \geq 12$ в RUNJOB-95 (14 событий)
$\lambda_3 > 0.8$	$22.3 \pm 0.5$	$23 \pm 4$	$27.0 \pm 0.5$	$29 \pm 14$
$\lambda_4 > 0.8$	$5.9 \pm 0.2$	$1.2 \pm 0.8$	$8.8 \pm 0.3$	$7 \pm 7$
$\lambda_5 > 0.8$	$1.8 \pm 0.1$	0	$2.9 \pm 0.2$	0

Для анализа отбирались события с суммарной энергией гамма-компоненты  $\sum E_\gamma \geq 3$  ТэВ. Оказалось возможным отобрать из измеренного материала 168 событий по гамма-компоненте и 14 событий по адронной компоненте. Для данных по гамма-квантам  $\sum E_\gamma = 3-80$  ТэВ множественность  $n_\gamma = 5-40$  (средняя  $\langle n_\gamma \rangle = 12$ ). Для данных по адронам  $\sum E_h = 1-6$  ТэВ множественность  $n_h = 6-40$  (средняя  $\langle n_h \rangle = 13$ ).

На рис. 3 представлены распределения по параметрам  $r_4$  (а) и  $Z_4$  (б) для гамма-компоненты искусственных событий от протона и гамма-компоненты в экспериментальных семействах. Как было отмечено выше, фоновые расчетные распределения по параметрам  $r, Z, \lambda$  для гамма-компоненты не зависят от типа первичного ядра, поэтому экспериментальные семейства от разных ядер рассматриваются совместно для улучшения статистической точности. Из рис. 3 можно видеть, что при  $r_4$ , близких к единице, и в области  $Z_4 > 3$  превышения экспериментальных распределений над расчетными нет.

Для параметра  $\lambda$  был фиксирован критерий отбора  $\lambda > 0.8$ , при котором вычислена доля выстроенных событий (табл. 1). Анализ таблицы и рис. 3 позволяет сделать вывод о том, что ни по одному из исследуемых параметров пространственной анизотропии эффект выстроенности или избыточной анизотропии в области энергий  $E_0 = 10^{13}-10^{14}$  эВ, которую отражают данные эксперимента RUNJOB, не наблюдается.

### Выводы

Анализ параметров анизотропии  $\lambda, r$  и  $Z$  выявил их чувствительность к типу первичного ядра.

Модельные расчеты для этих параметров не показывают наличие зависимости фоновой (случайной) анизотропии или выстроенности от энергии в диапазоне  $E_0 = 10^{12}-2 \cdot 10^{16}$  эВ для искусственных событий.

Анализ данных эксперимента RUNJOB при  $E_0 = 10^{13}-10^{14}$  эВ, проведенный с использованием различных параметров анизотропии, не выявляет избыточной анизотропии и эффекта выстроенности при этих энергиях взаимодействия.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 03-02-16272).

### Литература

1. *Сотрудничество «Памир»* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1991. **55**, № 4. С. 650.
2. *Иваненко И.П., Копенкин В.В., Манагадзе А.К., Ракобольская И.В.* // Письма в ЖЭТФ. 1992. **56**. № 4. С. 192.
3. *Kopenkin V.V., Managadze A.K., Rakobolskaya I.V., Roganova T.M.* // Phys. Rev. 1995. **D52**, No. 5. P. 2766.
4. *Борисов А.С., Денисова В.Г., Жданов Г.Б. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1996. **58**, № 12. С. 8.
5. *Borisov A.S., Denisova V.G., Puchkov V.S. et al.* // Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) 1997. **52B**. P. 218.
6. *Xue L., Dai Z.Q., Li J.Y. et al.* // Proc. 26 ICRC. Salt Lake City, 1999. HE 1.2.24.
7. *Capdevielle J.N.* // Proc. 25 ICRC. Durban, 1997. **6**. P. 57.
8. *Манагадзе А.К., Оседло В.И., Галкин В.И. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2002. **112**, № 3. С. 19.
9. *Сотрудничество «Памир»* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1986. **50**, № 11. С. 2125.
10. *Borisov A.S., Denisova V.G., Puchkov V.S. et al.* // Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) 1997. **52B**. P. 218.
11. *Калмыков Н.Н., Остапченко С.С.* // Ядерная физика. 1993. **56**. С. 105.
12. *Калмыков Н.Н., Остапченко С.С., Павлов А.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1994. **58**, № 12. С. 21.
13. *RUNJOB Collaboration* // Proc. 25 ICRC. Durban, 1997. **4**. P. 133.

Поступила в редакцию  
23.04.03