

УДК 539.121.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ВЫСТРОЕННОСТИ В ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ИОНИЗАЦИОННОГО КАЛОРИМЕТРА

В. П. Павлюченко

*На основе экспериментальных данных с большого ионизационного калориметра Тянь-Шаньского комплекса по исследованию космических лучей проведено исследование явления выстроенности, ранее обнаруженного в экспериментах с космическими лучами рентген-эмульсионной методикой. Предварительные результаты показывают наличие эффекта для крупномасштабных адронных структур в стволах ШАЛ высокой энергии на уровне шести стандартных отклонений от фона. Доля таких событий растет с ростом энергии и составляет в среднем около 25% в области энергий 0,1 – 10 ПэВ.*

В работе [1] описано явление, получившее название "выстроенности" или "компланарности", обнаруженное в высокогорном эксперименте ПАМИР, проводимом в космических лучах с помощью рентген-эмульсионных камер (РЭК). В эксперименте изучались свойства гамма-квантов и адронов с энергией выше нескольких  $TэВ$ , зарегистрированных рентгеновской эмульсией в виде пятен почернения при экспонировании на высоте 4370 м над уровнем моря. Часто такие пятна удается объединить в генетически связанные семейства их происхождением от одной и той же первичной частицы.

Было обнаружено, что в некоторых семействах пятна почернения с наибольшей энергией расположены ("выстроены") с относительно небольшим разбросом вдоль прямой линии, проведенной в мишенной плоскости перпендикулярно траектории первичной частицы. Эффект в настоящее время [2] выходит за пределы двух стандартных ошибок для случайных совпадений.

Это явление наблюдается для пятен как гамма-квантов, так и от адронов высокой энергии. Расстояния между пятнами обычно лежат в пределах 1 – 5 сантиметров,

что при высокой пространственной разрешающей способности рентгеновской эмульсии (сотни микрон) позволяет их уверенно разделять. Эффект до настоящего времени не имеет теоретического объяснения и надежного статистически обеспеченного подтверждения в других экспериментах.

Характерными особенностями рентген-эмульсионной методики являются отсутствие информации об энергии первичной частицы и высокий порог регистрации для отдельных электронно-фотонных каскадов, что существенно ограничивает возможности исследования характеристик обнаруженного явления.

*Постановка задачи.* Если во взаимодействиях адронов и ядер с ядрами существует какой-то механизм, приводящий к выстроенности вторичных частиц, то этот эффект может быть зарегистрирован и с помощью других детекторов, не имеющих столь высокого, как рентгенографические эмульсии, пространственного разрешения. В этом случае потребуются, чтобы взаимодействие произошло при прочих равных условиях соответственно на более далеком расстоянии от детектора или (при одинаковом расстоянии) энергия рассматриваемых частиц была соответственно меньше.

На Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН в течение многих лет в составе комплексной установки по исследованию ШАЛ работал большой ионизационный калориметр (БИК) площадью  $6 \times 6 \text{ м}^2$ . За время эксплуатации накоплен значительный банк данных [3] с информацией об электронно-фотонной, адронной и мюонной компонентах зарегистрированных ливней, что позволяет, в отличие от РЭК, оценивать первичную энергию и другие пространственно-энергетические характеристики каждого ШАЛ.

Ствол ШАЛ в основном состоит из потока адронов, генерированных в серии последовательных взаимодействий первичной частицы в атмосфере. Вторичные частицы, если их энергия достаточно велика, в свою очередь тоже генерируют частицы следующих поколений и свои "подстволы", из которых и формируется ствол ШАЛ. Адроны в подстолах концентрируются вокруг траектории породившей их частицы в достаточно узком конусе, так как поперечные импульсы вторичных частиц при высоких энергиях на несколько порядков ниже предельных.

Если рассмотреть адронную структуру ствола ШАЛ в мишенной плоскости на уровне наблюдения, то при высоком пространственном разрешении это будет поток адронов в основном не очень высоких энергий, которые не превысят порога регистрации РЭК. При ухудшении разрешения становится невозможным выделение отдельных адронов, но можно выделять отдельные подстволы (струи), часто перекрывающиеся друг с другом и относящиеся к адронам более ранних поколений и более высоких энергий. Чем

более крупные структуры рассматриваются, тем более высокие энергии и более ранние поколения частиц могут быть выявлены, если имеется возможность регистрировать интегральные потоки энергии в пределах таких струй и если площадь установки достаточна для этого. В пределе ствол ШАЛ без учета его структуры несет информацию о первичной частице. Необходимо также учитывать, что при прохождении через атмосферу любые подстволы необратимо теряют энергию, в основном, на генерацию электронно-фотонной и мюонной компонент.

Тянь-Шаньский ионизационный калориметр в составе комплексной установки ШАЛ хорошо подходит для исследования эффекта выстроенности адронов в ядерных взаимодействиях высокой энергии. Он регистрирует выделившуюся в нем суммарную энергию после прохождения ствола ШАЛ независимо от энергии отдельных адронов. Суммирование ведется в пределах каждого канала регистрации (ионизационной камеры) размерами  $0,25 \times 6 \text{ м}^2$ . При ширине канала 25 см пространственное разрешение БИК для адронных каскадов составляет 50 – 75 см, что не позволяет выделять отдельные адроны, но не препятствует исследованию крупномасштабной структуры ствола.

*Обработка экспериментальных данных.* Для анализа отбирались события с энергией первичной частицы  $E_0 > 100 \text{ ТэВ}$  ( $N_e > 1,3 \cdot 10^5$ ) и энерговыделением в калориметре  $E_c > 10 \text{ ТэВ}$ . Это с большой вероятностью гарантировало попадание ствола ШАЛ в калориметр. Выделение струй в калориметре проводилось с помощью алгоритма, описанного в [4]. БИК имел 19 рядов ионизационных камер, прослоенных свинцом общей толщиной около 5 ядерных пробегов, над ним располагалась углеродная мишень толщиной еще один пробег. Оси камер в соседних рядах направлены перпендикулярно друг другу, поэтому трехмерная картина расположения струй в калориметре представляется в виде двух проекций на его боковые грани.

В [4] показано, что с ростом глубины в калориметре более рельефно проявляются подструктуры ствола: струи становятся более узкими, их число уменьшается, и до больших глубин доходят наиболее высокоэнергичные. Поэтому при выделении струй рассматривалась только ионизация, зарегистрированная под слоем поглотителя суммарной толщиной не менее пяти ядерных пробегов.

Для дальнейшей обработки отбирались события, которые в каждой проекции имели не менее трех струй. Струи сортировались в порядке убывания энергий в каждой проекции независимо, и первым трем присваивались номера 11, 12, 13 и 21, 22, 23, соответственно для первой и второй проекций. Проекция струй затем объединялись так, что 11 и 21 составляли первую струю, 12 и 22 составляли вторую струю, 13 и 23 со-

ставляли третью. Объединение более высоких номеров не проводилось, и для анализа в каждом событии отбирались по 3 наиболее высокоэнергичных струи, скомбинированных описанным образом.

Положение центра тяжести поперечного распределения ионизации струи в каждой проекции считается координатой ее оси в системе, связанной с номерами каналов в ряду. Она пересчитывается в мишенную плоскость, перпендикулярную оси ШАЛ, с учетом зависимости ширины канала от проекции тангенса зенитного угла на соответствующую боковую грань калориметра  $\text{tg}_i\theta$  [4]. Положение оси в двух проекциях определяет координаты струи  $X, Y$  в мишенной плоскости на уровне верхнего ряда калориметра.

В итоге для каждого отобранного события получают координаты пересечения трех главных струй ствола с мишенной плоскостью  $X_1Y_1, X_2Y_2, X_3Y_3$ , по которым вычисляется косинус угла между лучами, направленными из точки 1 в точки 2 и 3:

$$\cos \varphi = \frac{(X_2 - X_1)(X_3 - X_1) + (Y_2 - Y_1)(Y_3 - Y_1)}{R_{12}R_{13}}$$

Здесь  $R_{12}$  и  $R_{13}$  – расстояния соответственно между точками 1 – 2 и 1 – 3.

Вычислив  $\varphi = \text{Arccos} |\cos \varphi|$ , получим острый угол между направлениями 1 – 2 и 1 – 3 (без учета знака угла), который удобно использовать для анализа выстроенности: компланарные события должны концентрироваться вблизи  $\varphi = 0$ .

*Результаты.* На рис. 1 приведено распределение по углам  $\varphi$  для экспериментальных событий. При малых углах видно заметное превышение экспериментальных точек над средним значением (фоном), вычисленным по всем интервалам.

Из-за сложности выделения струй в калориметре, имеющем длину канала 6 м, фон не обязательно должен иметь форму равномерного распределения. Даже далеко отстоящие друг от друга струи могут казаться слившимися в любой из проекций, если разность их координат в этой проекции меньше разрешения калориметра. Алгоритм в этом случае выделит следующую по энергии струю и найдет ей ложную пару из другой проекции, что случайным образом может исказить угол  $\varphi$ . Доля таких случаев может быть достаточно велика, но фон из-за них приблизительно должен иметь симметрию относительно  $45^\circ$ .

Это обстоятельство является основой для простейшего безмодельного способа определения формы фона в области малых углов: можно считать, что он такой же, как и вблизи  $90^\circ$ . Если без всяких нормировок из числа событий в первом интервале (рис. 1) вычесть число событий в последнем, то превышение составит  $148 \pm 32$  событий, что

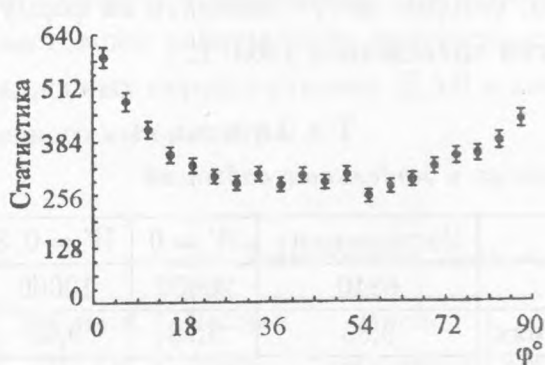


Рис. 1. Экспериментальное распределение по острому углу  $\varphi$  между тремя главными струями в стволе ШАЛ. 6840 событий.

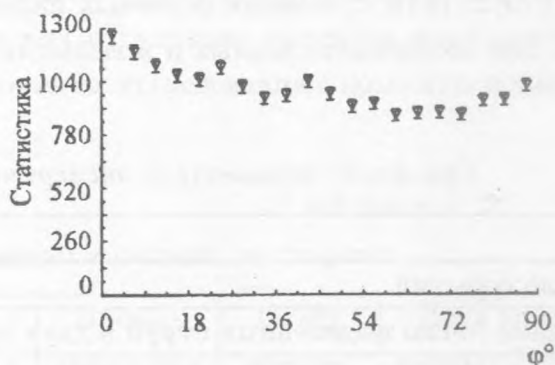


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для модельных событий при полностью случайном попадании всех струй в калориметр (расчет фона для 20000 событий).

означает наличие эффекта компланарности на уровне  $4,6\sigma$ . Если проделать аналогичную процедуру для сумм в первых двух, трех, четырех, пяти интервалах, то получим соответственно  $250 \pm 43$  ( $5,8\sigma$ ),  $310 \pm 51$  ( $6,0\sigma$ ),  $316 \pm 58$  ( $5,7\sigma$ ),  $321 \pm 63$  ( $5,1\sigma$ ). Максимум статистической обеспеченности приходится на эффект в первых трех интервалах. Если существует выстроенность, то так и должно быть, поскольку ширина интервала составляет  $4,5^\circ$ ; примерно такова же среднеквадратичная ошибка при вычислении  $\varphi$ , поэтому эффект и должен содержаться в основном в первых трех интервалах.

Для более точного определения формы фона было проведено моделирование методом Монте-Карло распределения ионизации в калориметре под слоем поглотителя толщиной 5 ядерных пробегов при попадании в него ствола ШАЛ. Разыгрывались: число струй (от трех до 20), их энергии (по экспоненциальному закону) и координаты их попадания в калориметр. При расчете три главные струи с заданной вероятностью  $W$  могли быть расположены компланарно, а остальные – всегда случайно. В случае компланарности координаты двух первых струй разыгрывались случайно; координата третьей в одной из проекций разыгрывалась случайно, а в другой вычислялась так, чтобы строго выполнялось условие компланарности. Вариант  $W = 0$  соответствует расчету фона, в нем все струи расположены случайно.

Модельные события были обработаны той же программой, что и эксперименталь-

ные. Результаты сравнения основных параметров, которые могут повлиять на форму фона, для экспериментальных и модельных событий приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1  
Сравнение параметров экспериментальных и модельных событий

	Эксперимент	$W = 0$	$W = 0,3$
Число событий	6840	20000	10000
Среднее число выделенных струй в двух проекциях	9,85	9,78	9,65
Средняя ширина струи (число каналов)	3,17	3,25	3,24
Отношение энергии первой струи к полной	0,56	0,57	0,57
Отношение энергии второй струи к полной	0,18	0,20	0,20
Отношение энергии третьей струи к полной	0,079	0,080	0,080

На рис. 2 приведено распределение по углу  $\varphi$  для варианта  $W = 0$  (фон). Распределение близко к равномерному, можно заметить некоторую выделенность области вблизи  $45^\circ$ , но симметрия искажена общим спадом к  $90^\circ$ .

Из сравнения вариантов моделирования  $W = 0$  и  $W = 0,1 - 0,9$  была вычислена эффективность регистрации компланарных событий. Она слабо зависит от заложенной в расчет величины  $W$  и равна в среднем  $0,19 \pm 0,01$ . Остальные события перешли в почти равномерный фон из-за наложения струй в одной или обеих проекциях и искажения их энергии или координат.

Для учета фона в эксперименте модельное распределение при  $W = 0$  (20000 событий) нормировалось к экспериментальному (6840 событий) по всем интервалам, кроме первых трех, в которых предполагается наличие эффекта. После нормировки число фоновых событий в первых трех интервалах равно  $1164 \pm 19$ , а превышение экспериментального распределения над фоновым составляет  $311 \pm 43$ . Совпадение с предыдущей безмодельной оценкой, скорее всего, случайно. Здесь величина эффекта составляет 7,2 стандартного статистического отклонения, а его отношение к полному числу событий равно  $0,045 \pm 0,006$ . Если учесть ранее вычисленную эффективность регистрации компланарных событий ( $0,19 \pm 0,01$ ), то их доля составит  $0,24 \pm 0,05$ . Везде указаны только статистические ошибки.

Следует отметить, что увеличение числа модельных событий приведет в асимптотике к превышению эффекта над фоном не более чем до  $8\sigma$  при тех же экспериментальных данных и нормировке. Но сама точность моделирования в данном варианте невелика, так как не рассматривалось прохождение каскадов через атмосферу, поэтому

нет смысла в увеличении статистики. Это задача дальнейшего исследования. Целью настоящей работы было выяснить наличие или отсутствие эффектов выстроенности адронных струй в стволах ШАЛ и возможность их исследования с помощью ионизационного калориметра.

Т а б л и ц а 2

*Зависимость доли выстроенных событий от энергии*

Энергия, $10^{15}$ эВ	Полное число событий	Число событий с $\varphi < 13,5^\circ$	Число событий с $\varphi > 13,5^\circ$	Превы- шение над фоном	Стат. обеспе- ченность	Доля компла- нарных событий без учета эф- фективности регистрации
< 0,3	2774	573	2201	$96 \pm 24$	$4,0\sigma$	$0,034 \pm 0,009$
0,3 – 0,6	2059	439	1620	$88 \pm 22$	$3,7\sigma$	$0,043 \pm 0,011$
0,6 – 1,2	1228	270	958	$62 \pm 17$	$3,7\sigma$	$0,051 \pm 0,014$
1,2 – 2,4	538	130	408	$42 \pm 12$	$3,6\sigma$	$0,077 \pm 0,022$
> 2,4	241	63	178	$25 \pm 8$	$3,6\sigma$	$0,102 \pm 0,034$

В связи со сказанным представляет интерес некоторое превышение экспериментальных точек над фоном вблизи  $90^\circ$  – "ортогональные" события. Если при нормировке для учета фона дополнительно не учитывать и последние 3 интервала, то изменится оценка эффекта компланарности: он вырастет до уровня  $8,6\sigma$ , а превышение "ортогональных" событий над фоном составит  $264 \pm 38$  ( $6,9\sigma$ ). Но в настоящее время из-за неопределенности фона можно говорить только об указании на существование эффекта ортогональности.

Приведенные данные по выстроенности относятся ко всем отобраным событиям с первичной энергией более  $100$  ТэВ. В табл. 2 показана зависимость этого эффекта от энергии.

Резюмируя, отметим, что эффект выстроенности для трех адронных струй с наиболее высокой энергией в стволах ШАЛ по данным калориметра большой площади наблюдается на уровне, превышающем 6 стандартных отклонений. Анализ проведен для событий с первичной энергией  $> 100$  ТэВ и энерговыделением в калориметре  $> 10$  ТэВ. Предварительно средняя доля событий с выстроенностью для исследованных энергий оценивается в 25% и растет с ростом энергии первичной частицы. Получено указание на эффект ортогональности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 98-02-16942).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Borisov A. S. et al., 5th ISVHECRI, Lodz, 1, 9 (1988).
- [2] Puchkov V. S., Nuovo Cimento, 19C, N 6, 1011 (1996).
- [3] Никольская Н. М., Тукиш Е. И. Препринт ФИАН N 91, М., 1980.
- [4] Павлюченко В. П. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 4, 13 (1998).

Поступила в редакцию 16 марта 1998 г.