

УДК 539.171.017

## КОМПЛАНАРНЫЙ РАЗЛЕТ ЧАСТИЦ В ЯДЕРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПРИ $E_0 > 10^{16}$ эВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННОМ В СТРАТОСФЕРЕ

*А. К. Манагадзе<sup>a,1</sup>, В. И. Оседло<sup>a</sup>, В. И. Галкин<sup>b</sup>, Л. А. Гончарова<sup>c</sup>,  
В. В. Копенкин<sup>a</sup>, К. А. Котельников<sup>c</sup>, Н. Г. Полухина<sup>c</sup>, И. В. Ракобольская<sup>b</sup>,  
Т. М. Роганова<sup>a</sup>, Л. Г. Свешникова<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>b</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

<sup>c</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Гамма-адронное семейство космических лучей с полной энергией  $> 10^{16}$  эВ, зарегистрированное эмульсионной камерой на борту стратосферного баллона-аэростата, является уникальным случаем ядерного взаимодействия столь высокой энергии в мировой экспериментальной статистике. С применением опыта анализа, накопленного в сотрудничестве «Памир» (горный эмульсионный эксперимент), в этом суперсемействе был обнаружен феномен компланарного разлета наиболее энергичных вторичных частиц и существенная пространственная асимметрия остальных частиц в центральной области этого события, принадлежащего к диапазону энергий, недоступному для современных ускорителей.

A gamma-hadron superfamily of cosmic rays with total energy  $> 10^{16}$  eV was detected by an emulsion chamber aboard a stratospheric balloon, the event being the unique example of so high energy nuclear interaction in the world statistics. Applying the experience accumulated in Pamir Collaboration (a mountain emulsion experiment) for superfamily analysis, in this family there were found the phenomenon of coplanar emission of most energetic particles and significant lateral asymmetry of other particles in the central area of the event. The superfamily belongs to the energy range unattainable for modern accelerators.

### ВВЕДЕНИЕ

В 1975 г. в эмульсионном баллонном эксперименте на высоте 30 км было зарегистрировано уникальное гамма-адронное семейство частиц космических лучей «Страна» с энергией свыше  $10^{16}$  эВ [1]. Это событие является результатом практически «чистого» ядерного взаимодействия частицы первичного космического излучения, т. к. по условиям наблюдения в стратосфере отсутствуют возможности для каскадного размножения вторичных частиц, рожденных в акте, что резко отличает это семейство от событий, регистрируемых в экспериментах по космическим лучам, проводимых ниже в атмосфере.

---

<sup>1</sup>mng@dec1.sinp.msu.ru

Хотя по энергии оно сопоставимо с наиболее энергичными событиями, зарегистрированными рентгеноэмульсионными камерами с большой площадью и экспозицией в горных экспериментах [2].

В свою очередь, в горных рентгеноэмульсионных экспериментах при энергиях  $> 10^{16}$  эВ были найдены такие физические феномены, как гало (диффузное пятно потемнения большой площади в центре семейства) [3] и выстроенность вдоль прямой линии энергетически выделенных центров (т.е. наиболее энергичных объектов) в суперсемействах<sup>1</sup> [4,5]. Целью данного исследования было заново проанализировать стратосферное высокоэнергичное событие «Страна» с учетом появившихся в последнее время новых модельных расчетов и накопленного за 25 лет работы сотрудничества «Памир» опыта анализа новых явлений.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Полеты баллонов-аэростатов с эмульсионной камерой на борту проходили на высоте около 30 км по маршруту полуостров Камчатка — Поволжье. Длительность одного полета была около 160 ч. Высота полета соответствует давлению воздуха около  $10 \text{ г/см}^2$ .

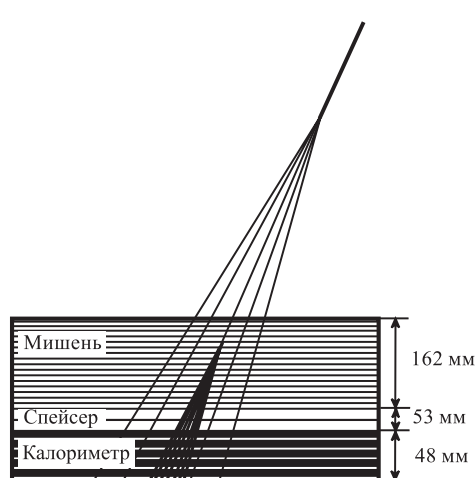


Рис. 1. Конструкция эмульсионной камеры, несомой аэростатом, и схема регистрации семейства

протона. Калориметр был сложен из 9 слоев свинца по 0,5 мм, переслоенного двумя типами эмульсий: ядерной (P-2T-50) и рентгеновской (PT-6M). Суммарная толщина калориметра соответствует 9 к. е. или 0,26 пробега ядерного взаимодействия. В свинцовых пластинах калориметра развиваются электронно-фотонные каскады от адронов и  $\gamma$ -квантов, регистрируемые на рентгеновской пленке в виде пятен потемнения, по которым определяется энергия упавшей на камеру частицы.

Многослойная эмульсионная камера (рис. 1) площадью  $40 \times 50$  см состояла из трех основных блоков: мишенного блока, спейсера и калориметра. Установка была предназначена прежде всего для регистрации первичных частиц космических лучей. Мишенный блок состоял из 90 слоев пластика толщиной по 1,5 мм, переслоенного пластинами толщиной 200 мкм с ядерной эмульсией P-2T-50, нанесенной слоем 50 мкм. Мишенный блок необходим для регистрации первичной частицы и определения ее заряда по треку в ядерной эмульсии. Спейсер, предназначенный для расхождения вторичных частиц после взаимодействия, состоял из 10 слоев пластика по 5 мм и был также переслоен пластинами с ядерной эмульсией. Суммарная толщина мишенного блока и спейсера эквивалентна 0,5 к. е., или 0,3 пробега ядерного взаимодействия для

<sup>1</sup>Суперсемействами называются события с суммарной энергией гамма-компонента  $E_\gamma > 1000 \text{ ТэВ}$ .

В данной работе для анализа в основном используются данные, полученные по рентгеновским пленкам calorиметра.

## 2. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Данное  $\gamma$ -адронное семейство состоит из 107 частиц, упавших на камеру и зарегистрированных calorиметром: 76 электромагнитных частиц (называемых далее  $\gamma$ -квантами) с суммарной энергией  $\Sigma E_\gamma = 1400$  ТэВ и 30 адронов с суммарной наблюдаемой (т. е. выделенной в  $\gamma$ -компонент при взаимодействии в свинце) энергией  $\Sigma E_h^{(\gamma)} = 800$  ТэВ (без учета лидирующей частицы). Зенитный угол падения семейства на камеру  $\Theta = 30^\circ$ , что делает глубину регистрации равной  $11,5$  г/см<sup>2</sup>.

Учтем, что эффективный  $\langle k_\gamma \rangle$  (доля энергии, передаваемой адроном в  $\gamma$ -компонент при взаимодействии с веществом) в свинце составляет около  $1/3$ . Тогда полная энергия зарегистрированных адронов  $\Sigma E_h^0 = \Sigma E_h^{(\gamma)} / \langle k_\gamma \rangle \approx 2500$  ТэВ. Учтем также, что из-за ограниченной глубины камеры эффективность регистрации адронов данной установкой составляет  $\approx 40\%$ . И около  $30\%$  частиц потеряно из-за того, что данное событие упало недалеко от края камеры. После введения всех поправок энергия воздушного семейства (без учета лидирующей частицы) будет составлять около  $0,9 \cdot 10^{16}$  эВ.

Высокоэнергичная лидирующая частица испытала второе взаимодействие в 12-м слое верхнего мишенного блока (см. рис. 1). Результатом этого взаимодействия явился узкий пучок вторичных частиц (наблюдаемый в виде треков в ядерных эмульсиях), быстро развивающийся в углеродном веществе мишени и образующий большое пятно потемнения (гало) в центре семейства на рентгеновских пленках в calorиметре. С использованием результатов измерений треков в ядерной эмульсии построено распределение по псевдобыстроте  $\eta = -\ln(\operatorname{tg}(\theta/2))$  для вторичных частиц внутри этой струи. Сравнение этого распределения с расчетом, выполненным по моделям QGS и VENUS [6], дало оценку энергии лидирующей струи  $\approx 10^{16}$  эВ. Для всех остальных частиц воздушного семейства по псевдобыстротному распределению также была получена суммарная оценка  $\approx 10^{16}$  эВ, что хорошо согласуется с приведенной выше энергией семейства.

Таким образом, полная энергия первичной частицы оценивается как  $2 \cdot 10^{16}$  эВ.

## 3. ВЫСТРОЕННОСТЬ ЧАСТИЦ

Сотрудничеством «Памир» было открыто и исследовано явление выстроенности (т. е. расположения вдоль прямой линии в нормальной плоскости) наиболее высокоэнергичных объектов («энергетически выделенных центров» или ЭВЦ) в  $\gamma$ -адронных семействах [7, 8]. Выстроенность ЭВЦ на пленке вдоль прямой линии соответствует компланарному разлету вторичных частиц в акте ядерного взаимодействия над камерой. Механизм этого явления до сих пор точно не установлен. Одной из наиболее вероятных гипотез является рождение вторичных частиц вследствие разрыва кварк-глюонной струны, задающей плоскость разлета этих частиц [9]. По данным памирского сотрудничества сам феномен возникает при энергиях взаимодействия  $\sim 10^{16}$  эВ.

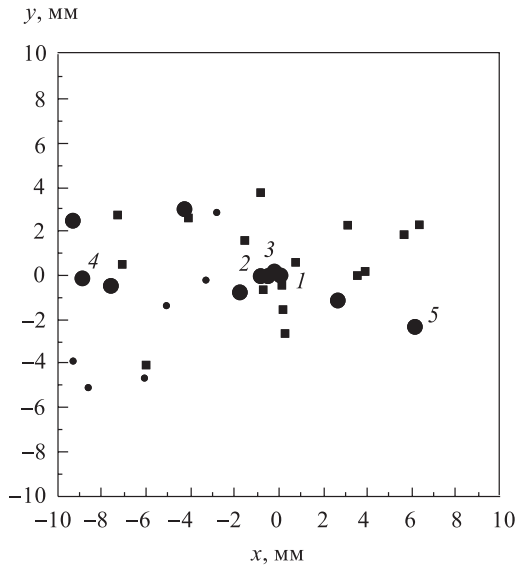


Рис. 2. Мишенная диаграмма центральной части суперсемейства «Страна»: ● — частицы с  $E_0 > 100$  ТэВ; ■ — частицы с  $E_0 = 20-100$  ТэВ; ● — частицы с  $E_0 = 3-20$  ТэВ; 1-5 — пять наиболее энергичных объектов в суперсемействе

мишенную диаграмму). Наблюдаемая картина в плоскости, перпендикулярной оси падения первичной частицы, представлена на рис. 2.

Критерием выстроенности является геометрический параметр  $\lambda_m$  [10]:

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

где  $m$  — число рассматриваемых точек;  $\varphi_{ijk}$  — угол между векторам  $\overline{ki}$  и  $\overline{kj}$ .

Значение  $\lambda$  стремится к 1 при расположении  $m$  точек вдоль прямой линии. Событие считается выстроенным, если  $\lambda_m > 0,8$ .

В данном семействе для трех самых энергичных объектов  $\lambda_3 = 0,98$ , для четырех —  $\lambda_4 = 0,99$ , для пяти —  $\lambda_5 = 0,90$ . Это можно считать высокой степенью выстроенности, что не удивительно в «чистом» событии. Следует отметить, что шесть наиболее энергичных частиц в семействе являются адронами. Таким образом, здесь наблюдается выстроенность не  $\gamma$ -квантов или электромагнитных гало, как в большинстве первых исследований сотрудничества «Памир», а адронов, при этом самый высокоэнергичный адрон в данном семействе образует небольшое гало в рентгеновских пленках. Особая роль адронов отмечалась нами ранее в [11]. Кроме того, следует отметить, что на рис. 2 видна выраженная асимметрия в расположении не только наиболее энергичных, но и всех частиц в центральной области семейства. Это не связано с обрезанием края пленки, т. к. этот край находится далее, чем в 10 мм от центра события, а здесь рассматрива-

В горных экспериментах с рентгеноэмulsionными камерами прямое наблюдение явления затруднено влиянием ядерно-электромагнитного каскада, развивающегося в атмосфере над камерой. В стратосферном суперсемействе «Страна» такие трудности отсутствуют. И ожидаемый при  $E_0 > 10^{16}$  эВ эффект выстроенности ЭВЦ наблюдается в данном семействе, что является важнейшим фактом наблюдения эффекта выстроенности в «чистом» взаимодействии, подтверждающим существование феномена компланарного разлета вторичных частиц при взаимодействиях сверхвысоких энергий.

Для правильного выделения наиболее энергичных частиц необходимо учесть, что для равноправного рассмотрения адронного и  $\gamma$ -компонента в семействе необходимо перейти от выделенной в камере энергии каждого адрона к его полной энергии путем введения поправки  $E_h^0 = E_h^{(\gamma)} / \langle k_\gamma \rangle$ . После чего все регистрируемые в камере частицы надо спроектировать на единую плоскость (построить ми-

ется только центральная область семейства, содержащая все наиболее энергичные его частицы. Если рассмотреть все семейство, то 15 из 107 частиц семейства расположены вблизи линии выстроенности. Эти 15 частиц несут более половины энергии первичной частицы космических лучей.

Для оценки фона случайных событий с выстроенностью были выполнены расчеты с использованием современной модели ядерного взаимодействия QGSJET [12], где не заложено какого-либо специального механизма компланарного разлета частиц. На рис. 3 приведены доли событий с выстроенностью трех, четырех и т. д. наиболее энергичных частиц во взаимодействии с воздухом первичного протона и первичного ядра железа. Вероятность случайной выстроенности резко падает с ростом числа частиц, включенных в рассмотрение. Сравнение данных от взаимодействий с разными  $E_0$  показывает независимость случайной выстроенности от энергии события. Качественно такое же поведение было продемонстрировано и в более ранних расчетах, как наших, так и других авторов, но здесь впервые была использована наиболее современная модель взаимодействия QGSJET, описывающая область самых высоких энергий и рекомендуемая к использованию международными коллаборациями (например, KASCADE). Впервые с очень большой статистикой (по 10000 событий) были наиграны взаимодействия для столь высокой энергии, как  $E_0 = 2 \cdot 10^{16}$  эВ/ядро. Также проанализирована зависимость фоновой случайной выстроенности от типа ядра, что является весьма актуальным в связи с предполагаемым в некоторых работах ростом доли тяжелых ядер в первичном космическом излучении при  $E_0 > 10^{15}$  эВ. Из рис. 3 видно, что вероятность выстроенности в семействах от ядер железа выше, чем в семействах от протона, особенно это касается более «сильных» критериев выстроенности (т. е. для пяти и более объектов). При этом абсолютное значение вероятности случайной выстроенности остается достаточно низким, гораздо ниже зарегистрированных сотрудничеством «Памир» экспериментальных значений [4].

Для оценки вероятности одиночного события с приведенными выше значениями параметра  $\lambda$  для трех, четырех и пяти наиболее энергичных частиц был использован тот же банк искусственных событий. Такая совместная вероятность обнаружить событие с  $\lambda_3 = 0,98$ ,  $\lambda_4 = 0,99$ ,  $\lambda_5 = 0,90$  для семейств от первичного протона составляет 0,01 %, а для первичного ядра железа — 0,03 %. Учет возможных ошибок при определении координат частиц в эксперименте практически не изменяет эти вероятности. Очевидно,

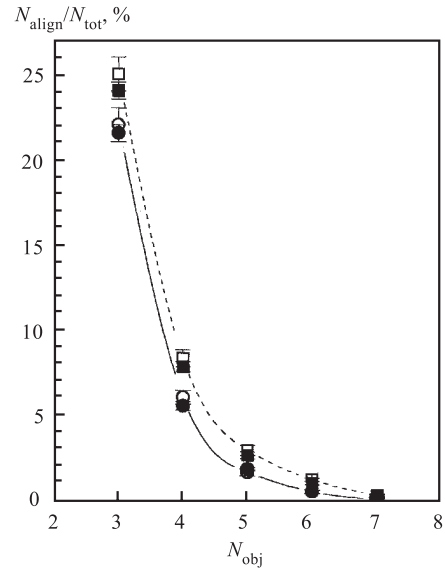


Рис. 3. Зависимость доли событий с выстроенностью от числа принятых к рассмотрению наиболее энергичных объектов в семействе  $N_{obj}$ . Расчет выполнен по модели QGSJET, по 10000 искусственных событий для каждого типа первичной частицы и ее энергии. Кружки — события от первичного протона с энергией  $10^{14}$  эВ (○) и  $2 \cdot 10^{16}$  эВ (●); квадраты — семейства от ядра железа с энергией  $10^{14}$  эВ (□) и  $2 \cdot 10^{16}$  эВ (■)

что вероятность случайного появления для такой выстроенной конфигурации чрезвычайно низка.

Стоит также отметить, что, если отобрать пяти наиболее энергичных частиц в искусственных  $\gamma$ -адронных семействах, то для первичных протонов 75 % этих объектов являются адронами, а для первичных ядер железа — 99 % имеют адронную природу (из них 10 % — фрагменты ядра). Это и согласуется с экспериментом, и еще раз подтверждает особую роль адронов при изучении компланарного разлета наиболее энергичных вторичных частиц в ядерном взаимодействии при очень высоких энергиях.

## ВЫВОДЫ

При анализе уникального стратосферного  $\gamma$ -адронного семейства с  $E_0 > 10^{16}$  эВ выявлены характеристики, ненаблюдаемые при более низких энергиях. Это прежде всего выраженная асимметрия и выстроенность вдоль прямой линии наиболее энергичных частиц в центральной части семейства.

Впервые при столь высоких энергиях явление компланарного разлета адронного компонента наблюдается в чистом ядерном взаимодействии практически без искажений каскадным процессом в атмосфере.

Данная работа поддержана грантами РФФИ 00-15-96632 и 00-02-17250.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Apanasenko A. V. et al.* // Proc. of 15th ICRC. Plovdiv, 1977. V. 7. P. 220–223.
2. *Сотрудничество «Памир»* // Изв. АН СССР, сер. физ. 1986. Т. 50. С. 2125–2127.
3. *Lattes G. M. G., Fujimoto H., Hasegawa S.* // Phys. Rev. D. 1980. V. 65. P. 159.
4. *Kopenkin V. V. et al.* // Phys. Rev. D. 1995. V. 52. P. 2766.
5. *Сотрудничество «Памир»* // Изв. АН СССР, сер. физ. 1985. Т. 49. С. 1295.
6. *Osedlo V. I. et al.* // Proc. of 27th ICRC. Hamburg, 2001. V. 4. P. 1426.
7. *Иваненко И. П. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 56. С. 192.
8. *Borisov A. S. et al.* // Nucl. Phys. B (Proc. Supl.). 1997. V. 52. P. 218.
9. *Roizen I. I.* // Mod. Phys. Lett. A. 1994. V. 9, No. 38. P. 3517.
10. *Pamir Collaboration* // Proc. of 5th Intern. Symp. on Very High Energy Cosmic Ray Interactions. Lodz, 1988. P. 9.
11. *Копенкин В. В. и др.* // Изв. РАН, сер. физ. 1994. Т. 58. С. 13.
12. *Калмыков Н. Н., Остапченко С. С., Павлов А. И.* // Там же. С. 21.

Получено 18 апреля 2002 г.