

ВЫСТРОЕННОСТЬ В ГАММА-АДРОННЫХ СЕМЕЙСТВАХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ $E_0 \sim 10^{16}$ эВ

И.П.Иваненко, В.В.Копенкин, А.К.Манагадзе, И.В.Ракобольская

НИИ ядерной физики Московского государственного университета

119899, Москва

Поступила в редакцию 21 июля 1992 г.

Обнаружена выстроенность вдоль прямой линии основных энергетических потоков в семействах частиц космических лучей. Наличие этого эффекта зависит от энергии взаимодействия и свидетельствует о компланарности разлета вторичных частиц невысоко над установкой в акте ядерного взаимодействия при сверхвысоких энергиях ($E_0 \geq 10^{16}$ эВ).

Введение. В работах сотрудничества "Памир" ¹ при анализе семейств частиц космических лучей, зарегистрированных в рентгенэмульсионных камерах, ^{2,3} было отмечено несколько событий, обладающих 3 или 4 гало, причем в большинстве семейств (в 5 из 6) такие множественные гало были выстроены вдоль прямой линии.

Нами был предложен ⁴ другой, более общий подход к рассмотрению выстроенности – анализ энергетически выделенных центров (ЭВЦ). Такие центры отражают наиболее энергичные потоки частиц в семействе, упавшем на камеру, и включают в себя следующие объекты: а) гало электромагнитного или адронного происхождения (или отдельный центр гало); б) гамма-кластер (то есть тесная группа гамма-квантов, объединенная по соответствующим критериям ⁵); в) отдельный высокоэнергичный гамма-квант; г) высокоэнергичный адрон (с учетом поправки на k_γ при регистрации в камере).

Такой подход дает возможность анализировать на выстроенность гамма-адронные семейства любых энергий, что позволило резко (в 10 раз) увеличить статистику рассматриваемых событий и проследить энергетическую зависимость эффекта. Включение в совместное рассмотрение адронной и электромагнитной компонент сделало анализ физически более адекватным. При этом выстроенность в событиях со множественными гало можно считать частным случаем выстроенности энергетически выделенных центров (ЭВЦ).

В качестве критерия выстроенности использовался параметр асимметрии λ ⁶. Событие считается выстроенным при приближении λ к 1. Наиболее эффективным оказалось отбирать события по 4 наиболее энергичным центрам с критерием $\lambda_4 \geq 0,8$, так как это обеспечивает наибольшее превышение эффекта над расчетным фоном.

Результаты. Для анализа эффекта выстроенности были использованы 74 гамма-адронных семейства из глубоких (60 см) свинцовых РЭК с энергиями в диапазоне $\sum E_\gamma = 100 - 5000$ ТэВ. Для сравнения с расчетным флуктуационным фоном использовались результаты розыгрыша случайного падения точек, а также искусственные семейства, разыгранные по модели взаимодействия квазискейлингового типа MSF ⁷.

Пример экспериментального события с выстроенностью можно видеть на рис.1. Зависимость доли выстроенных событий от $\sum E_\gamma$ представлена на рис.2. Видно, что выстроенность практически отсутствует при $\sum E_\gamma \approx 100$ ТэВ, эффект

растет с энергией и при $\Sigma E_\gamma \approx 1000$ ТэВ, существенно отличается от расчетного фона ($43 \pm 17\%$ и 8%).

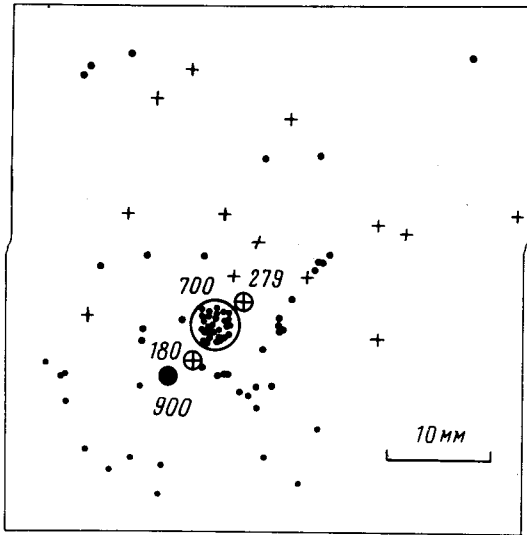


Рис.1. Пример мишневой диаграммы с энергетически выделенными центрами (ЭВЦ) для события с выстроенностью ($\lambda_4 = 0,95$). Цифры отражают энергию ЭВЦ в ТэВ. ЭВЦ: ⊕ – электромагнитное гало, ⊗ – адронное гало, ⊕ – адрон. Частицы семейства: • – γ -кванты, + – адроны

Статистический анализ с применением коэффициента ранговой корреляции Спирмэна⁸ показал, что действительно с достоверностью 95% рост с ΣE_γ доли событий с выстроенностью имеет место. Применение критерия Колмогорова-Смирнова⁹ к функции распределения событий по λ подтвердило на том же уровне значимости отличие экспериментальных данных от расчетного фона.

Столь высокая доля выстроенных событий наблюдается в глубоких свинцовых камерах. В свинцово-углеродных РЭК (С-камерах), имеющих другую конструкцию^{2,3}, доля зарегистрированных выстроенных событий была существенно ниже, хотя и отличалась от расчетного фона (рис.2). Это связано с особенностями регистрации адронов в С-камерах. Проведенный монтекарловский розыгрыш показал, что из-за влияния распределения по k_γ в энерговыделении адрона при взаимодействии в камере, доля событий с выстроенностью даже в глубокой свинцовой камере может снизиться со 100% над РЭК до 40% после регистрации, а из-за методических искажений С-камеры происходит дальнейшее снижение с 40 до 13% (см. рис.2).

Связь выстроенности и других характеристик семейств. 14 экспериментальных семейств с $\Sigma E_\gamma \geq 500$ ТэВ были разделены на имеющие и не имеющие выстроенность. Для этих двух групп анализировались такие характеристики, как множественность, спектры гамма-квантов и адронов в пределах каждого семейства, доля энергии адронов в полной энергии семейства, средние радиусы и средние ER обеих компонент семейств. В пределах статистических ошибок существенных отличий в характеристиках двух классов семейств не обнаружено.

Импульсы энергетически выделенных центров. Проанализируем поперечные импульсы ЭВЦ как внутри струи из четырех ЭВЦ, так и всей струи относительно оси семейства. В РЭК измеряется не сам p_t частицы, а его при-

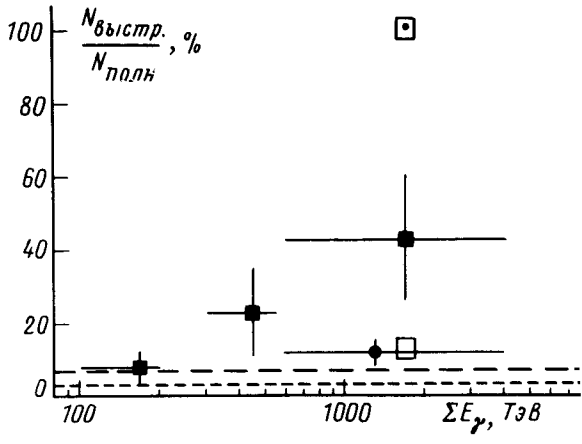


Рис.2

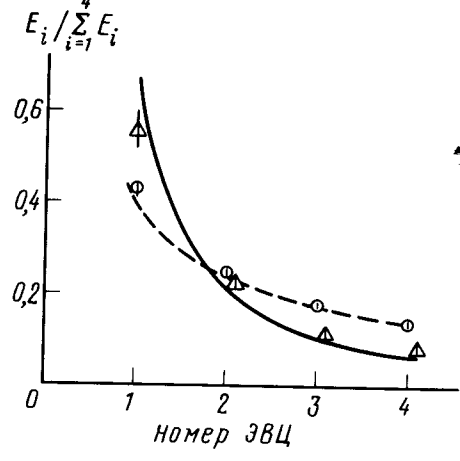


Рис.3

Рис.2. Зависимость доли событий с выстроенностью от энергии семейства. Эксперимент: ■ - глубокие свинцовые РЭК, ● - С-камеры. □ - 100% событий с выстроенностью на границе камеры; □ - оценка изменения доли событий с выстроенностью вследствие искажений, вносимых С-камерами; - - - - - доля событий с выстроенностью среди искусственных семейств (модель MSF); - доля выстроенных событий для случайно упавших 4-х точек

Рис.3. Распределение по долям энергии среди четырех ЭВЦ в семействе. Эксперимент (глубокие свинцовые РЭК): ○ - $\Sigma E_\gamma = 100 - 500$ ТэВ; Δ - $\Sigma E_\gamma \geq 500$ ТэВ. MSF-модель: — - непосредственно во взаимодействии при $E_0 = 10$ ПэВ; - искусственные семейства при любой ΣE_γ .

близительный аналог - величина ER . В предположении, что частицы образованы в одном взаимодействии на некоторой высоте H над камерой, $p_t H = ER$, где R - расстояние от оси взаимодействия.

Для семейств с $\Sigma E_\gamma \geq 500$ ТэВ $\langle ER \rangle$ внутри группы из четырех ЭВЦ для событий с выстроенностью $(2,1 \pm 0,8)$ ГэВ·км, а без выстроенности $(1,8 \pm 0,5)$ ГэВ·км. $\langle ER \rangle$ для всей струи из четырех ЭВЦ относительно оси ливня в событиях с выстроенностью $(9,2 \pm 3,2)$ ГэВ·км, без выстроенности $(10,1 \pm 3,5)$ ГэВ·км. Таким образом события двух типов не отличаются по величинам $\langle ER \rangle$.

Среднее отношение продольной и поперечной (относительно направления выстроенности в плоскости наблюдения) составляющих p_t равно 11 (события с выстроенностью) и 4 (без выстроенности). Здесь резкое отличие естественно, так как является следствием самого разделения событий на 2 класса. Видно, что выстроенные частицы выходят из плоскости компланарности с $\langle p_t^\perp \rangle \approx 0,1 \langle p_t \rangle$.

Если предположить наиболее вероятную высоту взаимодействия $H = 2$ км, следующую из анализа гало суперсемейств ¹⁰, то $\langle p_t \rangle$ внутри струи из четырех ЭВЦ оценивается в ~ 1 ГэВ/с.

Дополнительный анализ показал, что $\langle ER \rangle$ ЭВЦ для обоих классов событий хорошо согласуется с расчетом по MSF-модели ⁷ для малых семейств ($\Sigma E_\gamma = 100 - 500$ ТэВ), растет с энергией и существенно превышает расчет при $\Sigma E_\gamma \geq 500$ ТэВ.

Распределение энергии среди 4-х наиболее энергичных структур семейства.

На рис.3 представлены распределения по долям энергии $E_i / \sum_{i=1}^4 E_i$ для модельных семейств (MSF) в диапазонах энергий $\Sigma E_\gamma = 100-500$ ТэВ и $\Sigma E_\gamma \geq 500$ ТэВ и для экспериментальных гамма-адронных семейств в тех же интервалах. Вид такого распределения не меняется с энергией ΣE_γ в искусственных семействах, а в экспериментальных семействах при малых энергиях он совпадает с расчетом, в то время как для суперсемейств вид этой зависимости заметно отличается и от кривой для искусственных семейств, и от точек, соответствующих эксперименту при меньших энергиях.

В таком представлении более круто падающая функция соответствует более жесткому энергетическому спектру рождения частиц в акте взаимодействия. Сплошной кривой приведено распределение по долям энергии для 4-х наиболее энергичных частиц, рождающихся непосредственно во взаимодействии в модели MSF при $E_0 = 10$ ПэВ. Точки для суперсемейства близки к расчетному неискаженному каскадом распределению в ядерном взаимодействии в квазискейлинговой модели.

Таким образом на эксперименте, выделяя ЭВЦ, мы практически наблюдаем фрагментационную часть спектра рождения частиц в акте, слабо искаженную каскадом и регистрирующей установкой. Отсюда следует, что наиболее энергичные объекты большинства суперсемейств рождены в одном взаимодействии на относительно небольшой высоте над установкой. (При большой высоте частицы испытывают сильное воздействие каскада).

Обсуждение и выводы. Наличие эффекта выстроенности потоков энергии (или частиц) в семействах на уровне наблюдения связано с асимметрией разлета частиц в ядерном взаимодействии. Существование такой асимметрии не укладывается в рамки представлений о модели взаимодействия. Как показано в ¹¹, причиной заметной асимметрии не может быть магнитное поле Земли.

Е.Л.Фейнберг ¹² сделал попытку объяснить наличие выстроенных гало в рамках модели образования и разрыва глюонного жгута при рассеянии кварка на антикварке. Ф.Халзен и Д.Моррис в ¹³ выдвигают объяснение существования выстроенных гало в рамках квантовой хромодинамики на основе модели полужестких струй (с $p_t > 3$ ГэВ/с). Но обе интерпретации не проходят по энергетическим соображениям.

Из общих представлений о развитии ЯЭК, подтвержденных расчетом ¹¹, следует, что выстроенность в семействе должна быть связана с одним взаимодействием, которое характеризуется высокой степенью компланарности вторичных частиц, так как развитие ЯЭК "замазывает" эффект выстроенности в случае нескольких взаимодействий. Необходимо предположить, что первичная частица имеет пробег взаимодействия в несколько раз больше, чем протон ¹¹ (то есть взаимодействует глубоко в атмосфере и недалеко от установки).

Наши оценки по квазискейлинговой модели MSF ^{14,15} показывают, что семейства с $\Sigma E_\gamma \geq 500$ ТэВ рождаются ПКЛ с энергией $E_0 > 2$ ПэВ с вероятностью 1-2%. Оценки по моделям с ростом полного коэффициента неупругости ¹⁶ приведут к еще меньшей вероятности рождения гамма-семейства и к заметному увеличению $E_0^{\text{порог}}$. Таким образом несмотря на то, что в настоящее время не известны многие существенные свойства "экзотических" взаимодействий с выстроенностью, даже до проведения детальных расчетов можно утверждать, что их наличие практически не изменит характеристики ШАЛ и других высокоэнергичных компонент космических лучей. Отметим близость $E_0^{\text{порог}}$ к энергии излома спектра ПКЛ и наличие работ ¹⁷, пытаю-

щихся объяснить его резким изменением характеристик hA -взаимодействий.

Учитывая возможное искажение доли выстроенных событий из-за особенностей методики регистрации адронов камерой, можно считать весьма вероятным, что при $\sum E_\gamma \geq 1000$ ТэВ ($E_0 \geq 10^{16}$ эВ) на камеру падает 100% событий с выстроенными ЭВЦ, а наблюдаем выстроенность мы лишь в части этих событий. Это дает объяснение и тому факту, что практически все другие средние характеристики семейств с выстроенностью и без нее совпадают для этих двух классов событий. То есть мы наблюдаем в этом энергетическом диапазоне не два типа взаимодействий, а один (с выстроенностью).

Таким образом экспериментальные события в области суперсемейств могут быть интерпретированы, как произошедшие на небольшой высоте над камерой и всегда во взаимодействиях с компланарным разлетом, по крайней мере, наиболее высокоэнергичных четырех частиц. При этом спектр вторичных частиц во фрагментационной области достаточно жесткий и близок к скейлинговому. Этот вывод согласуется с исследованиями по анализу гало суперсемейств ¹⁰, где средняя эффективная высота образования гало над камерой оценивалась как ≈ 4 к.е. (то есть 2 км). В предположении такой высоты средний поперечный импульс вторичных частиц в струе из четырех ЭВЦ оказывается $\langle p_t \rangle \approx 1$ ГэВ/с, а отклонение от компланарности может составлять $\langle p_t^\perp \rangle \approx 0,1$ ГэВ/с.

-
1. Сотрудничество "Памир", Изв. АН СССР, физ. **49**, 1285 (1985).
 2. Сотрудничество "Памир", Труды ФИАН СССР. **154**, (1984).
 3. Chacaltaya and Pamir Collaboration, Nucl. Phys. В **370**, 365 (1992).
 4. Сотрудничество "Памир", Изв. АН СССР, физ. **55**, 650 (1991).
 5. Л.Т.Барадзей и др., Препринт ФИАН СССР N103 (1974).
 6. Сотрудничество "Памир", Изв. АН СССР, физ. **50**, 2125 (1986).
 7. И.П.Иваненко и др., Препринт НИИЯФ МГУ N90-21/167, ч.1, (1990).
 8. G.J.Glasser and R.F.Winter, Biometrika **48**, 444 (1961).
 9. F.J.Massey, J.Amer. Stat. Assoc. **46**, 68 (1951).
 10. Pamir Collaboration, Proc. 22 ICRC **4**, 125 (1991).
 11. R.A.Muhamedshin, and S.A.Slavatinsky, Proc. 22 ICRC, **4**, 225 (1991).
 12. Е.Л.Фейнберг, Сб.: Проблемы физики космических лучей, М.: Наука, 1987. с.138.
 13. F.Halzen and D.Morris, Proc. 21 ICRC **8**, 18 (1990).
 14. Chacaltaya and Pamir Collaboration, Proc. 22 ICRC **4**, 93 (1991).
 15. И.П.Иваненко и др. Препринт НИИЯФ МГУ N91-18/222, ч.II (1991).
 16. R.A.Muhamedshin and A.Krys, Preprint Lodz Univ., Poland, N13.42/90 (1990).
 17. S.I.Nikolsky et al. Proc 22 ICRC **4**, 269 (1991).