

## О ПРИМЕНИМОСТИ КВАЗИСКЕЙЛИНГОВЫХ МОДЕЛЕЙ МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ АДРОНОВ В ОБЛАСТИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В.В. Арабкин, С.И. Никольский, К.В. Чердынцева, С.Б. Шаулов

*Приводятся экспериментальные данные об энергетическом спектре электронов и фотонов в стволах широких атмосферных ливней, полученные на Тянь-Шаньской комплексной установке "Адрон". Обнаружено существенное различие спектров электромагнитной компоненты стволов ливней, образованных первичными частицами различной энергии, что означает резкое нарушение скейлинга в фрагментационной области вторичных адронов, генерированных в неупругих столкновениях с ядрами атомов воздуха в интервале энергий  $5 \times 10^{15} - 2 \cdot 10^{16}$  эВ.*

В исследованиях космических лучей свойство масштабной инвариантности (скейлинг) при неупругих столкновениях адронов обнаруживалось и использовалось значительно раньше, чем эти понятия вошли в физику высоких энергий. Причиной этому были как экспериментальные данные, например, о независимости коэффициента неупругости от энергии первичной частицы, так и постоянная необходимость экстраполяции характеристик адронного взаимодействия из области исследованных энергий в неисследованную область больших энергий. По мере накопления и уточнения экспериментальных данных выяснялось, что масштабная инвариантность в адронных взаимодействиях реализуется лишь приблизительно. Поэтому модельные описания характеристик множественной генерации в неупругих столкновениях пионов, нуклонов и ядер стали называть квазискейлинговыми. Проверка экстраполяций квазискейлинговых моделей на область сверхускорительных энергий в космических лучах производилась последнее десятилетие в экспериментах двух типов, весьма различающихся по своей методике. Исследования широких атмосферных ливней давали достаточно точные сведения о составе, развитии и поглощении низкоэнергетических компонент ливней, то есть каскадных лавин, образованных первичными частицами космических лучей вполне определенной энергии. Рентгеноэмульсионные камеры позволяли с хорошим разрешением исследовать пространственно-энергетические характеристики групп гамма-квантов и адронов при известной суммарной энергии, но оставляли неопределенными начальную энергию каскада и большую часть энергии, уносимой частицами и гамма-квантами с энергией ниже нескольких ТэВ. В работе /1/ на основании экспериментальных данных о широких атмосферных ливнях был сделан вывод о применимости для описания множественных процессов в неупругих нуклон-нуклонных и адрон-ядерных столкновениях вплоть до энергий  $\cong 10^{19}$  эВ модели кварк-глюонных струн /2/, представляющей собой хорошо развитую и проверенную на ускорительных данных модель квазискейлингового типа. Однако в экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами /3/ было получено указание на значительное отличие фрагментационной части энергетического спектра пионов от ожидаемого квазискейлингового спектра, в том числе и по модели кварк-глюонных струн /2/. В этих экспериментах исследовалась множественность гамма-квантов в семействах с заданной суммарной энергией гамма-квантов 100–200 ТэВ и 200–400 ТэВ. Энергия первичных частиц не измерялась.

В наших экспериментах на Тянь-Шаньской установке "Адрон" указанные выше методы исследования космических лучей с первичными энергиями выше достигнутых на ускорителях были объединены. Установка для регистрации широких атмосферных ливней с помощью сцинтилляционных детекторов и газоразрядных счетчиков позволяла в круге радиусом не менее 20 м от центра установки регистрировать все ливни от первичных протонов и ядер с энергией выше  $10^{15}$  эВ, определяя в них число электронов и положение оси ливня в пространстве на нашем уровне наблюдения 3330 м над уровнем моря. В центре установки расположена рентгеноэмульсионная камера общей площадью 160 м<sup>2</sup>, состоящая из свинцового

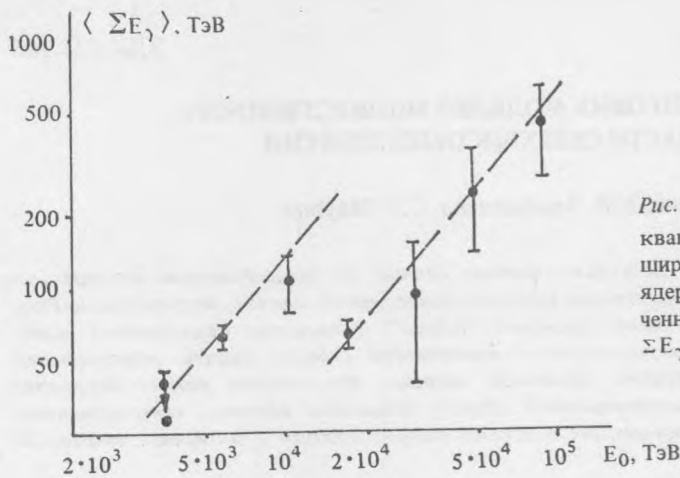


Рис. 1. Зависимость средней суммарной энергии  $\langle \Sigma E_{\gamma} \rangle$  гамма-квантов и электронов высокой энергии ( $\geq 1$  ТэВ) в стволах широких атмосферных ливней, первичных протонов и легких ядер – от энергий  $E_0$ . Поправка первой точки связана с увеличенной долей ливней без гамма-квантов с энергией  $\geq 1$  ТэВ и  $\Sigma E_{\gamma} \geq 10$  ТэВ.

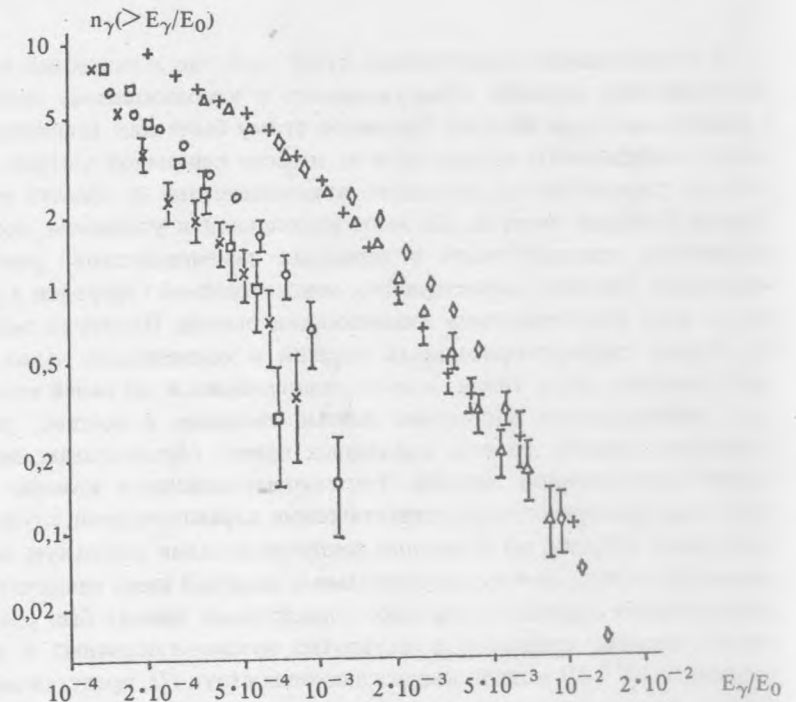


Рис. 2. Энергетические спектры гамма-квантов и электронов в стволах широких атмосферных ливней, образованных первичными частицами со средними энергиями (в электронвольтах):  $4,3 \cdot 10^{14}$  ( $\diamond$ ),  $2,1 \cdot 10^{15}$  ( $\triangle$ ),  $6,8 \times 10^{15}$  (+),  $1,8 \cdot 10^{16}$  ( $\square$ ),  $3,1 \cdot 10^{16}$  (x),  $8,6 \times 10^{16}$  (=).

блока с рентгеновскими пленками для регистрации гамма-квантов с энергией  $\geq 1$  ТэВ и углеродно-свинцового блока для регистрации адронов с энергией выше нескольких ТэВ. От стандартных рентгеномультиплонных камер сотрудничества "Памир" /3/ нашу камеру отличало наличие крест-накрест расположенных ионизационных камер под гамма-блоком и под адронным блоком. Это дало возможность измерять поток энергии, уносимой электронно-фотонной и адронной компонентами ливня, и определять место прохождения гамма-квантов, электронов и адронов наибольших энергий с точностью  $\pm 13$  см по двум координатам.

На рис. 1 приведены соотношения между первичной энергией ливня  $E_0$ , оцениваемой по числу электронов на уровне наблюдения и средней суммарной энергией гамма-квантов  $\langle \Sigma E_{\gamma} \rangle$  в ливне данной энергии при условии, что эта сумма превышает 10 ТэВ, а энергия гамма-квантов не менее 1 ТэВ. На рисунке видно, что приблизительная пропорциональность между потоком электронов и гамма-квантов высокой энергии, наиболее непосредственно связанным с фрагментационной частью энергетического спектра вторичных

адронов, рождающихся в первых актах образования ливня, и потоком электронов всех энергий, отражающих суммарное энерговыделение электронно-фотонного каскада в атмосфере резко нарушается при энергии первичных частиц  $E_0 \geq 10^{16}$  эВ. Следовательно, ни о каком квазискейлинге от ускорительных энергий до энергий  $\sim 10^{19}$  эВ не может быть и речи. Вновь возникает сомнение в обоснованности наших оценок энергии первичных частиц по широким атмосферным ливням без детальных исследований структуры их стволов для первичных энергий выше  $10^{16}$  эВ. Не утекает ли существенная часть энергии первичных частиц в неизвестные нам новые частицы? На рис. 2 представлены энергетические спектры гамма-квантов и электронов в ливнях с различной первичной энергией, определяемой по полному числу электронов на уровне наблюдения ( $E_0 = 4,7 \cdot 10^9 N^{0,926}$  эВ). По оси абсцисс отложена масштабно-инвариантная величина  $E_\gamma/E_0$ . Единый энергетический спектр гамма-квантов и электронов в стволах ливней от первичных частиц различной энергии в интервале  $2,6 \cdot 10^{15} - 1,4 \cdot 10^{16}$  эВ хорошо иллюстрирует приближительную масштабную инвариантность генерации нуклонов и пионов в неупругих столкновениях первичных протонов и легких ядер с ядрами атомов воздуха. Энергетические спектры гамма-квантов в ливнях от первичных частиц с энергией  $E_0 \geq 1,4 \cdot 10^{16}$  эВ резко выпадают из единого квазискейлингового спектра. Можно полагать, что при энергиях первичных частиц  $E_0 \geq 1,4 \cdot 10^{16}$  эВ вторичные адроны с энергиями, соответствующими фрагментационной области множественного рождения, отсутствуют. На рис. 2 видно, что при  $E_\gamma/E_0 \geq 10^{-3}$ , вблизи границы фрагментационной области, если учесть электронно-фотонный каскадный процесс, гамма-кванты и электроны практически не наблюдались, хотя ожидаемый поток составляет более двух на один ливень.

Таким образом, наши результаты подтверждают нарушение скейлинга, обнаруженное в рентгено-эмульсионных экспериментах /3/ при анализе множественности в семействах гамма-квантов с суммарной энергией 100–200 ТэВ. Однако это нарушение представляет собой не постепенное смягчение спектра в интервале энергий  $10^{15} - 10^{16}$  эВ, а имеет вполне определенный энергетический порог  $(1-2) \cdot 10^{16}$  эВ, что согласуется с введенным в докладе /4/ пространственно-временным масштабом адронизации кварков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Христиансен Г.Б. В сб. Проблемы физики космических лучей, М., Наука, 1987, с. 226.
2. Kaidalov A.B., Ter-Martirosyan K.A. Phys. Lett., B, 117, 247 (1982).
3. Байбурина С.Г. и др. Труды ФИАН, 54, 3 (1984).
4. Nikolsky S.I. Invited talks of the 11th European Cosmic Ray Symposium, Hungary, 1988, p. 35.

Поступила в редакцию 30 июля 1990 г.