

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННОЙ И МЮОННОЙ КОМПОНЕНТ ШАЛ НА Г. АРАГАЦ В ОБЛАСТИ ИЗЛОМА СПЕКТРА ПО ЧИСЛУ ЧАСТИЦ

© 2005 г. В. С. Еганов¹, В. А. Иванов¹, Э. А. Мамиджанян^{1,2}, Н. М. Никольская²,
С. И. Никольский², В. А. Ромахин², А. А. Чилингарян¹

Приведены результаты анализа электронно-фотонной и мюонной компонент широких атмосферных ливней, полученных на установке "Гамма" (г. Арагац, 3250 м над уровнем моря). Найдены критерии выделения ливней, генерированных частицами с разным атомным номером. Расчеты выполнены по схеме, которая приводит к росту среднего атомного номера частиц с ростом их энергии. Показано, что для объяснения некоторых характеристик широких атмосферных ливней космических лучей такого утверждения недостаточно и необходимо предположение об изменении характера сильного взаимодействия элементарных частиц при энергии 3–5 ПэВ.

В настоящей работе приведены результаты анализа данных по электронно-фотонной и мюонной компонентам широких атмосферных ливней (ШАЛ), полученных на установке "Гамма" за время около 8200 ч в период с 1999 по 2001 гг. В анализ вошло около 10^8 событий с полным числом частиц больше $2.5 \cdot 10^5$. Установка расположена на высоте 3250 м над уровнем моря на горе Арагац (Армения). Для регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ используются 25 пунктов, в каждом из которых имеется по три сцинтилляционных детектора. Площадь каждого детектора 1 м^2 . Пункты расположены концентрическими кольцами с радиусами 17, 28, 50 и 70 м. Для исследования мюонной компоненты подземной лаборатории используются 45 сцинтилляционных детекторов под слоем грунта 20 м.в.з. и 45 под слоем 10 м.в.з. Показания последних пересчитываются к толщине грунта 20 м.в.з. Площадь каждого детектора 1 м^2 . Подробно установка описана в [1].

Для анализа были отобраны ливни с полным числом частиц N_e больше $2.5 \cdot 10^5$, оси которых расположены от центра установки не далее 40 м. Зенитный угол оси ливней меньше 30° . Расчеты, выполненные методом Монте-Карло с учетом аппаратных ошибок, показали, что эффективность регистрации таких ливней близка к 100%. Анализ экспериментального материала подтвердил это. Положение оси, возраст и полное число частиц в ливне находились по показаниям амплитудных детекторов при помощи программы SPACE [2]. Угловые координаты оси находились методом наименьших квадратов из измерения времени прихода частиц в предположении, что фронт лив-

ня плоский. Найденные погрешности измерения: положения оси ливня – 1.5° , зенитного угла оси ливня $0^\circ - 1.5^\circ$, азимута $\phi - 5^\circ$, значения параметра возраста $S - 0.09$, полного числа частиц $N_e - 10\%$ и числа мюонов $N_\mu - 40\%$. С увеличением полного числа частиц в ливне ошибки измерения уменьшаются.

Были проведены по "программе быстрой генерации" ливней [3] трехмерные расчеты методом Монте-Карло развития ШАЛ в атмосфере. Атомный состав первичного излучения при малых энергиях, принятый в расчетах, имеет вид:

A	1	4	14	31	51
%	36	25	14	15	10

Интегральный энергетический спектр частиц имеет показателя 1.65 до места его перегиба и 3.0 после независимо от атомного номера частиц. Перегиб спектра протонов происходит при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ. Положение излома спектров других ядер пропорционально их заряду. Эта схема близка к результатам точных расчетов по диффузионной модели распространения космических лучей в Галактике. При этом суммарный спектр всех частиц имеет излом при $3 \cdot 10^{15}$ эВ. Показатель спектра до излома 1.65, после излома – 2.07.

Ливни разыгрывались в интервале зенитных углов $0^\circ - 30^\circ$. Положение осей ливней разыгрывалось равномерно в круге радиусом 50 м вокруг центра установки. Для каждого детектора установки находилось число частиц, прошедших через него. Затем учитывались искажения, вносимые аппаратурой: дискретность измерения амплитуды, аппаратные флуктуации и т.д. Потом проверялись условия регистрации ливней и, если они выполнялись, то разыгранный ливень обрабатывал-

¹ Ереванский физический институт.

² Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва.

ся той же программой, что и зарегистрированные в эксперименте. Таким образом, в расчетах учитывались искажения, вносимые аппаратурой и методикой обработки данных. Это позволяет адекватно сравнивать экспериментальные данные с расчетами.

Заложенные в расчет предположения приводят к увеличению среднего атомного номера с ростом энергии первичных частиц и соответственно с увеличением N_e . При энергии $5 \cdot 10^{10}$ эВ в первичном излучении остаются только ядра железа.

Следует заметить, что здесь не рассматривается вклад метагалактического излучения, который должен приводить к уменьшению среднего атомного номера первичных частиц при высоких энергиях, т.е. в расчетах рассматривается предельный случай изменения состава. Полученная в расчетах зависимость среднего атомного номера частиц, генерировавших ливни, от числа частиц в ливне, имеет вид:

$$N_e/10^5 \quad 2.32 \quad 4.12 \quad 7.31 \quad 13.0 \quad 22.9 \quad 40.1 \quad 72.3 \quad 128 \quad 229$$

$$\ln\langle A \rangle \quad 2.18 \quad 2.15 \quad 2.22 \quad 2.29 \quad 2.49 \quad 2.52 \quad 2.86 \quad 3.07 \quad 3.35$$

Эта зависимость достаточно близка к данным работ [4–6].

Расчеты показали, что, отбирая ливни в интервале значений возраста $S = 0.4\text{--}0.6$, мы отбираем ливни, генерированные протонами. Ливни с $S = 0.6\text{--}0.8$ генерированы смесью протонов и α -частиц. Ливни с большим возрастом генерированы как протонами и α -частицами, так и тяжелыми ядрами. Таким образом, разбраковывая ливни по параметру возраста, мы можем выбирать ливни, вызванные частицами разного атомного номера.

На рис. 1 приведены интегральные спектры по числу частиц для различных интервалов по S . Точки с ошибками – данные, полученные в эксперименте. Линии – аппроксимация результатов расчета. Расчетные и экспериментальные спектры нормированы только на полное число событий.

Из рис. 1 видно достаточно хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных за исключением интервала $S = 1.0\text{--}1.2$, где они противоречат друг другу. Спектр, полученный в расчетах, укручивается при $N_e = 2 \cdot 10^6$. Экспериментальный же спектр уполячивается при $N_e = 4 \cdot 10^6$. Ранее подобное расположение спектров при больших значениях параметра возраста наблюдалось в [7, 8]. Уложение спектра при больших S говорит о том, что увеличивается количество ливней, максимум развития которых находится высоко над уровнем наблюдения. Это может быть связано с увеличением доли тяжелых ядер в первичном излучении, но утяжеление состава, заложенное в расчетах, не дает наблюдаемого эффекта. Для объяснения наблюдаемого эффекта необходимо существенно более резкое изменение. Но,

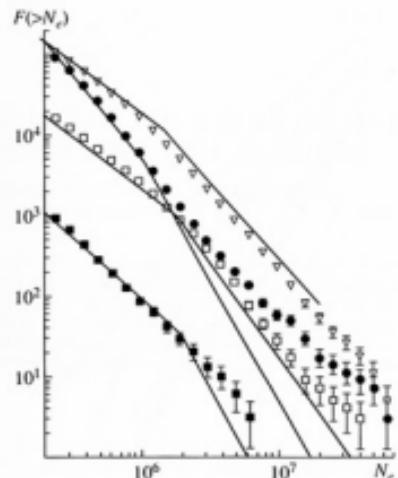


Рис. 1. Интегральные спектры ШАЛ по числу частиц для различных интервалов по параметру возраста. ■ – 0.4–0.6; □ – 0.6–0.8; ▽ – 0.8–1.0; ● – 1.0–1.2. Линии – аппроксимации спектров, полученных в расчетах, для тех же интервалов возраста.

как отмечено выше, в наши расчеты и так уже заложено слишком сильное утяжеление состава. Следовательно, необходимо рассмотреть иные причины такого поведения спектров.

В расчетах была исследована другая возможность разбраковки ливней по типу частиц, генерировавших их, – разбраковка по относительному потоку мюонов. Оказалось, что ливни с величиной $N_\mu/N_e^{0.8} < 0.05$ генерированы протонами и α -частицами, ливни со значением >0.3 – тяжелыми частицами. Промежуточные значения параметра соответствуют ливням, генерированным смесью всех ядер.

На рис. 2 приведены интегральные спектры по числу частиц для ливней с различным значением величины $N_\mu/N_e^{0.8}$, полученные в эксперименте, а на рис. 3 – в расчетах. При средних значениях этой величины расчетные и экспериментальные спектры близки. Спектры ливней, генерированных тяжелыми ядрами – $N_\mu/N_e^{0.8} = 0.2\text{--}0.4$ – имеют обратный перегиб. В расчетах обратный перегиб наблюдается, но он много меньше, чем в эксперименте. В эксперименте при высоких энергиях мы наблюдаем избыток (относительно расчетов) ливней с большим относительным потоком мюонов. Это связано с большим количеством вторичных частиц, рождающихся в первых актах силь-

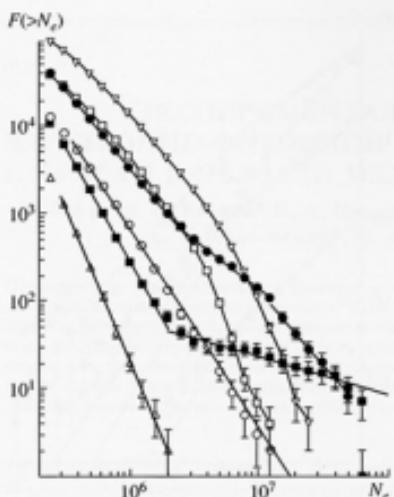


Рис. 2. Спектры ШАЛ по числу частиц, полученные в эксперименте, для значений параметра $N_\mu/N_c^{0.8}$: $\circ - <0.05$; $\square - 0.05-0.1$; $\nabla - 0.1-0.2$; $\bullet - 0.2-0.3$; $\blacksquare - 0.3-0.4$; $\triangle - >0.4$.

ного взаимодействия. Сильное обогащение первичного состава тяжелыми ядрами при этих энергиях, заложенное в наших расчетах, не обеспечивает достаточного количества частиц в первых актах.

Из приведенных выше данных видно, что при числе частиц в ливне примерно $3 \cdot 10^6$, что для уровня гор соответствует энергии первичной частицы около 6 ПэВ, появляется избыток ливней с большим относительным числом мюонов и относительно большой высотой максимума каскадной кривой над уровнем наблюдения. Это может быть следствием увеличения числа частиц, родившихся в первых актах сильного взаимодействия. Сравнение с расчетами показывает, что увеличение среднего атомного номера первичных частиц с ростом их энергии, которое происходит при диффузионном распространении частиц в Галактике, недостаточно для объяснения этого избытка. Более вероятным объяснением представляется измене-

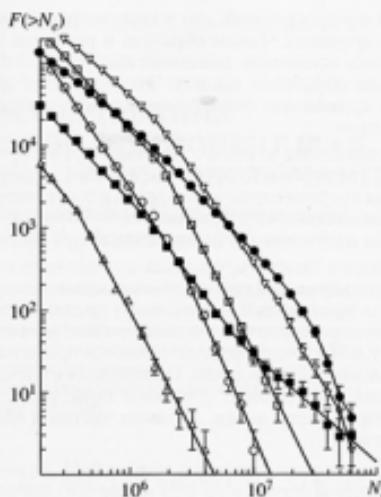


Рис. 3. Спектры ШАЛ по числу частиц, полученные в расчетах, для значений параметра $N_\mu/N_c^{0.8}$: $\circ - <0.05$; $\square - 0.05-0.1$; $\nabla - 0.1-0.2$; $\bullet - 0.2-0.3$; $\blacksquare - 0.3-0.4$; $\triangle - >0.4$.

ние элементарного акта сильного взаимодействия, при котором резко увеличивается множественность вторичных частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agakishian S.A. et al. // Proc. 24th ICRC. Rome, 1995. V. I. P. 482.
2. Асейкин В.С. и др. Препринт ФИАН № 37. М., 1987.
3. Павлюченко В.П. Препринт ФИАН № 71. М., 2000.
4. Roth M. et al. // Proc. 27th ICRC. Hamburg, 2001. V. I. P. 85.
5. Ulrich H. et al. // Ibid. P. 97.
6. Alessandro B. et al. // Ibid. P. 124.
7. Никольский С.И. и др. // ЯФ. 2000. Т. 63. № 10. С. 1888.
8. Вишневская Е.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65. № 8. С. 1215.