

Классификация широких атмосферных ливней по мюонам в области сверхвысоких энергий

А. А. Михайлов, Н. Н. Ефремов, Е. С. Никифорова

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отд. РАН
677980 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 22 августа 2005 г.

После переработки 16 января 2006 г.

Рассмотрены широкие атмосферные ливни (ШАЛ) сверхвысоких энергий, зарегистрированные на Якутской установке. Обнаружены ливни, различающиеся по содержанию мюонной компоненты. Показано существование 4-х классов ливней.

PACS: 26.40.+r, 96.40.-z

Мы проанализировали содержание мюонов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) по данным Якутской установки. Рассмотрены ливни с энергией $E > 5 \cdot 10^{18}$ эВ, с зенитными углами $< 60^\circ$ и осями, лежащими внутри периметра установки. Точность определения угла прихода ливней $5-7^\circ$, энергии $\sim 30\%$. Наблюдаемое время регистрации ШАЛ на Якутской установке было разбито на отдельные периоды времени по 6 час. Периоды времени, когда мюонные детекторы не работали, из анализа исключались. Сначала отбирались ливни без мюонной компоненты. Ливнями без мюонной компоненты считались те ливни, у которых отсутствовали показания мюонных детекторов (равны нулю) в пределах порога регистрации. Порог регистрации мюонов детекторами равен 1 ГэВ. При нулевом показании мюонных детекторов была оценена вероятность того, что данный мюонный детектор не сработает от ожидаемого числа частиц N по формуле $P = \prod (P_{1i} + P_{2i})$, где P_{1i} – вероятность того, что ни один мюон не попадет в i -й детектор, P_{2i} – вероятность того, что одна частица попадет в детектор, и он не сработает. Если вероятность $P > 10^{-3}$, то данный ливень из рассмотрения исключался.

На рис.1а показана наблюдаемая плотность частиц в ливне по данным сцинтилляционных и мюонных детекторов (электронно-фотонная компонента – черные квадратики, мюонная – белые кружочки) в зависимости от расстояния r до оси ливня. Показан ливень, который зарегистрирован 8.12.1994г., его энергия $E = 2 \cdot 10^{19}$ эВ и зенитный угол $\theta = 18^\circ$. Плотность мюонов (частиц/м²) во всех пяти мюонных пунктах равна нулю (белые кружочки). Вероятность того, что ни одна из частиц не попадет в мюонные детекторы общей площадью 100 м², равна $P \sim 10^{-20}$. Ожидаемые плотности электронно-

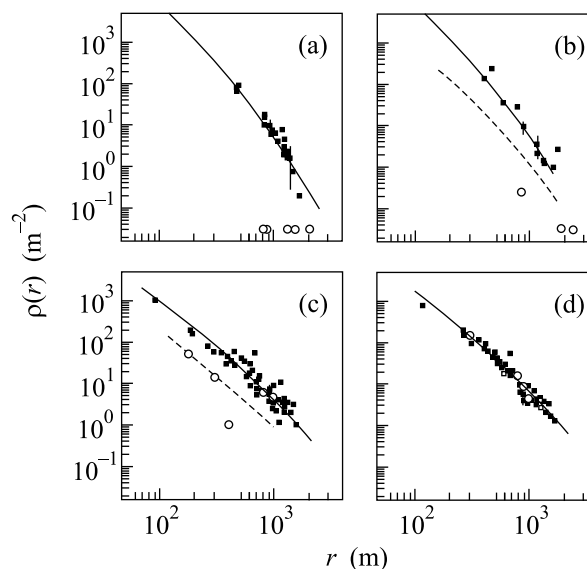


Рис.1. (а) ШАЛ без мюонов (в 5 детекторах плотность мюонов равна 0), (б) ШАЛ бедные мюонами, (с) обычные ШАЛ, (д) ШАЛ с высоким содержанием мюонов. ■ – сцинтилляционные детекторы, о – мюонные детекторы. Ожидаемые плотности электронно-фотонных (сплошная кривая) и мюонных (пунктиры) компонент ливня в зависимости от расстояния r до оси ливня

фотонной компоненты от обычных ливней показаны сплошной линией, мюонной компоненты – пунктиром согласно экспериментальным данным [1]. Каждый случай регистрации ливня без мюонов тщательно проверялся. Ливень без мюонов отбирался в том случае, если в течение 30 мин до и после данного события детекторы мюонов, которые имели нулевое показание, срабатывали и регистрировали частицы другого ливня.

Мы обнаружили 19 ливней без мюонной компоненты. Также обнаружили 6 ливней, у которых плот-

Дата прихода, энергия и координаты ливней (без мюонной компоненты), составляющие кластеры и пульсары, которые коррелируют с ними. Даны расстояние и время жизни пульсаров

Номер кластера	Дата	Энергия E эВ	Прямое восхождение и склонение ливней, град	Пульсары, PSR	Расстояние, кпк	LgT, лет
1	27.01.1992	13.3	148.3 70.0	0809+74	0.3	8.1
1	18.03.1994	47.4	92.5 74.0			
1	8.12.1994	21.3	123.1 76.5			
1	10.05.2001	7.1	136.2 70.0			
2	25.04.1996	8.6	81.7 60.2	0450+55	0.7	6.3
2	26.03.1998	8.3	85.4 57.6			
3	17.11.2000	5.7	322.4 51.4	2217+47	2.4	6.5
3	13.01.2002	7.7	326.7 44.3			
4	13.03.1992	8.7	334.7 69.8	2241+69	2.3	6.7
4	30.05.1996	5.0	322.9 65.8			
5	25.04.1996	8.6	81.7 60.2	Нет	-	
5	29.12.1998	6.4	172.2 66.4	пульсара $< 9^\circ$	-	

Примечание: дублет 5 состоит из ливней, без мюонов и ливней бедных мюонами.

ность мюонов на расстоянии > 100 м меньше, чем ожидается в среднем, более чем на 3σ . Например, ливень 24.04.1991 г. (рис.1b) имеет плотность мюонов 0.22 частиц/ m^2 на расстоянии 851 м от оси ливня, что меньше на 4.4σ ожидаемой величины от обычного ливня (1.4 частиц/ m^2). Доля ливней без мюонов к общему числу ШАЛ составляла $\sim 1\%$, доля ливней, бедных мюонами, $\sim 1\%$. Ливни с обычным содержанием мюонов, где плотности частиц лежат в пределах 3σ от ожидаемого среднего значения, показаны на рис.1с. Таких ливней оказалось большинство, $\sim 97\%$. Ливень с максимально наблюдаемой энергией $E = 1.2 \cdot 10^{20}$ эВ на Якутской установке, зарегистрированный 7.05.1989 г., который содержит одни мюоны [2], показан на рис.1d. Доля ливней, в которых плотность мюонов больше, чем ожидается в среднем, на 3σ (ливни с высоким содержанием мюонов), составляла $\sim 1\%$.

На рис.2 показано распределение 19 ливней с $E > 5 \cdot 10^{18}$ эВ без мюонов (черные кружочки) в системе экваториальных координат (δ – склонение, RA – прямое восхождение). В распределении ШАЛ наблюдается один кластер с 4 ливнями и 4 дублета (см. таблицу и рис.1). Последний дублет с номером 5 состоит из ливней без мюонов и с малым содержанием мюонов (бедных мюонами). Направления прихода всех 4 ливней первого кластера (таблица, рис.1) находятся в пределах углового интервала 9° от пульсара PSR 0809+74 [3], который расположен на расстоянии 0.3 кпк от Земли. Направления прихода дублетов 2–4 находятся внутри углового интервала 9° от пульсаров PSR 0450+55, 2217+47, 2241+65, соответственно,

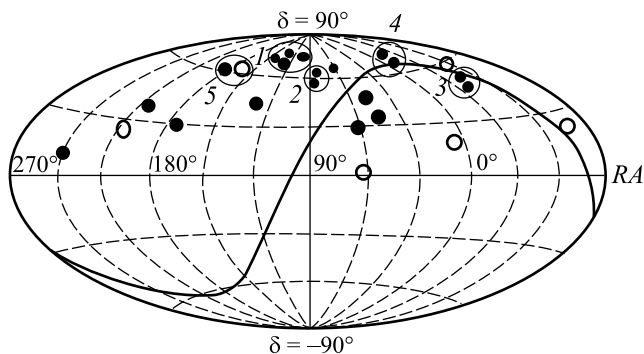


Рис.2. Распределение ШАЛ без мюонов (●) и бедные мюонами (○) в экваториальной системе координат δ и RA . δ – склонение, RA – прямое восхождение. Большие окружности обозначают кластеры 1–5

которые расположены менее чем в 2.4 кпк от Земли (см. таблицу). Внутри углового интервала 9° от дублета с номером 5 пульсар не обнаружен. Как видно из таблицы, пульсары расположены на угловом расстоянии меньше $\sim 1.5\sigma$ от направления прихода ливней, составляющих кластеры (σ – от точности определения угла прихода ливней). Не исключается, что источниками космических лучей являются пульсары [4]. В ливнях с энергией $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ не найдено ни одного события без мюонов.

Как видно из рис.2, распределение 19 ливней без мюонов и 6 ливней, бедных мюонами (белые кружочки), на небесной сфере является изотропным.

Таким образом, в области сверхвысоких энергий по содержанию мюонов ливни можно условно разбить на 4 класса:

- 1) ливни без мюонов (рис.1а) – $\sim 1\%$,

- 2) ливни, бедные мюонами (рис.1b) – $\sim 1\%$,
- 3) ливни с обычным содержанием мюонов (рис.1c) – $\sim 97\%$,
- 4) ливни с высоким содержанием мюонов (рис.1d) – $< 1\%$.

Причем ливни с высоким содержанием мюонов наблюдаются только при самых высоких энергиях. Этот факт может иметь большое значение для выяснения состава и происхождения космических энергий предельно высоких энергий.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект # 04-02-16287).

Якутская установка ШАЛ поддержана Российским Министерством Наук (проект N 01-30).

-
1. V. P. Egorova, A. V. Glushkov, A. A. Ivanov et al., Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) **136**, 3 (2004).
 2. N. N. Efimov, T. A. Egorov, A. V. Glushkov et al., Proc. ICRR Intern. Symposium: Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Rays, Kofu, 1990, p. 20.
 3. J. N. Taylor, R. N. Manchester, and A. G. Lyne, Astrophys. J. Suppl. **88**, 529 (1993).
 4. С. И. Сыроватский, Препринт № 151, ФИАН, 1969, с. 6.