

Обнаружение и исследование запаздывающих ШАЛ с $N_e > 5 \cdot 10^6$ частиц

В. И. Яковлев, М. И. Вильданова, Н. Г. Вильданов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 117924 Москва, Россия

Поступила в редакцию 27 октября 2006 г.

После переработки 11 декабря 2006 г.

Зарегистрированы запаздывающие ШАЛ с $N_e > 5 \cdot 10^6$ частиц. Регистрация таких событий демонстрирует наличие новых процессов в области энергий свыше 10^{16} эВ.

PACS: 13.85.Tr, 96.40.Pq

1. Введение. Исследование запаздывающих частиц в широких атмосферных ливнях было начато свыше 40 лет назад [1], и ему посвящено огромное количество работ (смотри библиографию в работе [2]).

Из недавних публикаций работа [3] посвящена исследованию запаздывающих нейтронов, электронов и фотонов в стволе широких атмосферных ливней (ШАЛ). Показано, что запаздывающие частицы сконцентрированы в круге с радиусом порядка 15–20 м от оси ливня. Расчеты, выполненные в работе [4] по модели QGSJET-II + Gheisha 2002d, показали, что большинство наблюдаемых запаздывающих нейтронов родилось непосредственно в нейтронном мониторе, а не пришло вместе с ливнем. Большая множественность рожденных нейтронов и их концентрация вблизи оси ливня обусловлены узким пространственным распределением адронов ШАЛ вокруг оси. Запаздывающие электроны и гамма кванты также имеют вторичное происхождение – они рождаются запаздывающими нейтронами в окружении монитора.

Большинство других работ, исследовавших запаздывающие частицы в ливне, были посвящены либо исследованию толщины ливневого диска на различных расстояниях от оси, либо попыткам зарегистрировать тяжелые частицы.

В работе [5], выполненной на уровне моря, для измерения запаздывающих частиц использовалось 4 сцинтиллятора, размещенных по углам квадрата с диагональю в 6.5 м. Кроме того, 70 детекторов, размещенных в квадрате со стороной 50 м, использовались для определения параметров ШАЛ. Из 6162 событий в 18 событиях один из детекторов зарегистрировал запаздывающий импульс, соответствующий плотности частиц от 10 до 20 м^{-2} . Из них в 4 событиях запаздывающие импульсы были зарегистрированы в 2 детекторах. Авторы пришли к заключению,

что эти события вызваны тяжелой частицей со временем жизни $5 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$ с.

В работе [6], выполненной на уровне моря, две группы сцинтилляторов площадью каждая по 4 м^2 были разнесены на расстояние 22.5 м. Сигналы в каждой группе суммировались. Отбирались события, когда запаздывающий импульс превосходил сигнал от одной релятивистской частицы и отстоял от основного сигнала больше, чем на 3σ , где σ – стандартное отклонение в распределении времени прихода основного импульса для данного расстояния от оси ШАЛ. В 760 событиях из 26000 зарегистрированных в одной из групп сцинтилляторов наблюдался запаздывающий импульс, а в 9 событиях запаздывающие импульсы наблюдались одновременно в 2-х группах. Плотность потока частиц в запаздывающей группе (в одном из приведенных в работе примеров) составила 1.25 м^{-2} , а полное число частиц в запаздывающем ливне (при интегрировании по кругу с диаметром 150 м) составило для приведенного события ≥ 88357 частиц. Авторы считают, что появление запаздывающих на одинаковое время импульсов в 2-х группах сцинтилляторов указывает на возможное существование “диска” запаздывающих частиц, генерированного тяжелой долгоживущей частицей.

Экспериментальный подход работ [5, 6] несколько напоминает использовавшийся нами.

2. Описание установки. В настоящей работе использовалась установка, расположенная на высоте 3340 м над уровнем моря (681 г/см^2) и состоящая из 16 детекторов, 10 из которых размещены по кругу с радиусом ~ 65 м, один в центре и 5 по кругу с радиусом ~ 130 м. Детектор представляет собой ФЭУ-49, на фотокатод которого помещается сцинтиллятор толщиной 5 см и диаметром 15 см. Управляющая система отбирает 6-кратные совпадения между центральным детектором и 5 детекторами, рас-

положенными по внутреннему кругу. Сигналы от 4-детекторов (центральный и 3 равномерно распределенные по внутреннему кругу) по кабелю длиной в 200 м подаются на входы 4-канального осциллографа ТЕКТРОНИХ TDS 2014. Получаемая информация записывается на ПК.

3. Результаты. За время ~ 5000 ч установка зарегистрировала 2117 событий с числом частиц свыше 10^7 , из них в 98 событиях был зарегистрирован запаздывающий на время от 40 до 600 нс импульс с числом частиц, прошедших через детектор, $n \geq 5$, то есть с плотностью потока частиц $\geq 283 \text{ м}^{-2}$. В 14 событиях запаздывающие импульсы были зарегистрированы в 2 и более детекторах, в 6 событиях запаздывающие импульсы были зарегистрированы в 3 и более детекторах, и в 3 событиях – во всех 4 детекторах. В последнем случае проинтегрированное по кругу с радиусом 62.5 м число частиц в таких запаздывающих ливнях превышает $5 \cdot 10^6$! В таблице 1 приведены некоторые параметры упомянутых 14 событий.

Сеанс-кадр	Число детекторов	Задержка $\Delta\tau_{\text{макс}}$, нс	Зенитный угол θ°	Азимут. угол φ°
53-32	2	90	26.1	205.5
53-69	2	130	20.1	217.5
54-130	2	60	53.7	46.5
55-35	3(4?)	115	5.1	149.3
55-85	3	80	30.9	171.0
58-130	4	140	34.5	200.0
58-148	3	75	42.3	125.2
59-24	4	70	23.7	102.0
76-5	4	95	28.5	264.8
83-10	2(3?)	125	32.1	279.8
91-36	2	125	29.4	57.8
170-161	2	190	6.90	297.8
172-257	2	180	33.6	288.8
172-309	2	150	33.3	36.8

Событие № 172-257 с запаздывающими импульсами в 2 детекторах показано на рис.1. Запаздывающие импульсы отстоят от основного на ~ 180 нс. Величина зенитного угла ливня $\theta = 33.6^\circ$. Событие № 58-130 с запаздывающими импульсами во всех 4 детекторах показано на рис.2. Величина задержки запаздывающего ливня составляет здесь ~ 140 нс. Величина зенитного угла ливня $\theta = 34.5^\circ$. Мы предполагаем, что события с запаздывающим импульсом в одном детекторе обусловлены геометрией прихода ливня, и эти события имеют примерно то же число частиц.

Средняя величина задержки между регистрируемыми импульсами, определенная по всем событиям,

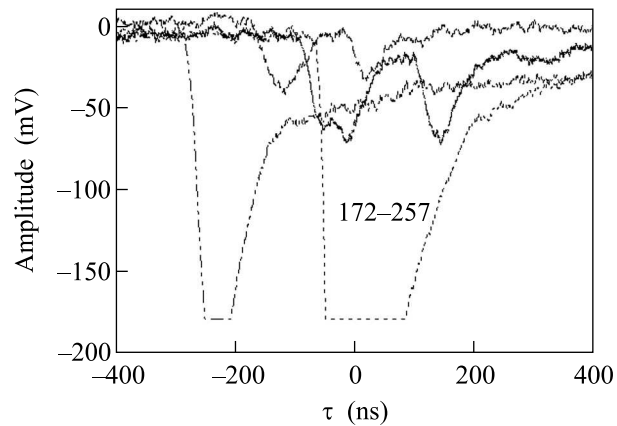


Рис.1. Событие 172-257

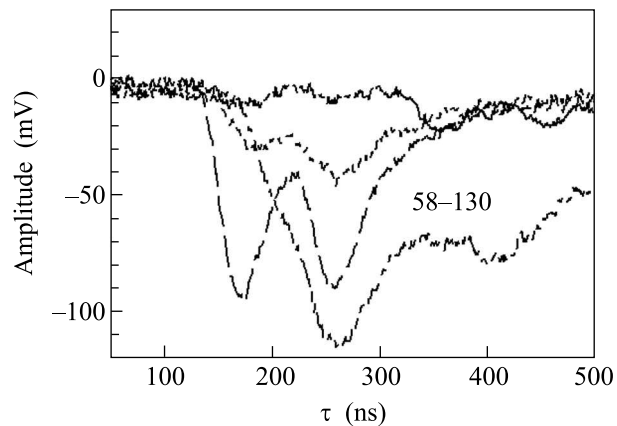


Рис.2. Событие 58-130

составляет 109 ± 6 нс при постоянной спада в распределении задержек, равной 79 нс.

Предположим, что задержанный ШАЛ – это небольшой локальный ливень. Вероятность регистрации таких ливней в одном детекторе определяется из наших данных как $98 : 2117 = 0.04629$. Тогда ожидаемое число одновременной регистрации таких ливней в двух детекторах равно $(0.04629)^2 \times 2117 = 4.537$ при 14 зарегистрированных событиях (4.4σ). Ожидаемое число одновременной регистрации событий тремя детекторами составляет 0.21 при 6 зарегистрированных, а ожидаемое число регистрации событий четырьмя детекторами составляет 0.009722 при 3 зарегистрированных (30σ).

Интенсивность ШАЛ с $N_e > 10^6$ частиц (энергия $E \sim 2 \cdot 10^{15}$ эВ) на Тянь-Шане составляет $3.5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. На площадь нашей установки (круг с $R = 65$ м) падает в секунду 0.00465 таких ШАЛ. Вероятность попасть на нашу установку второго такого ливня за время в 1 мкс (ширина ворот триггера) составляет $4.65 \cdot 10^{-9}$.

Таким образом, вероятность случайной регистрации наблюдаемых событий полностью исключается.

4. Обсуждение. Вероятно трудно объяснить появление гигантских запаздывающих ливней за счет нейтронов, рассеянных из ствола ШАЛ, поскольку совокупность основного и запаздывающего импульсов имеет практически одинаковую форму в разных детекторах, удаленных друг от друга на расстояние свыше 100 м. Расчеты [4], выполненные в предположении о практически стандартном акте взаимодействия, показывают, что полное число нейтронов вне ствола ШАЛ, образованного первичным протоном, невелико.

Чтобы обеспечить полученное в эксперименте запаздывание ливня на $\Delta t \sim 10^{-7}$ с при прохождении через атмосферу, величина $\gamma = E/mc^2$ должна лежать в интервале 10–30. Энергия запаздывающего ливня $E \cong (1-2) \cdot N_e$ ГэВ. Отсюда следует, что если запаздывающий ливень образуется частицей (или парой частиц), рожденной при взаимодействии первичной, масса такой частицы должна быть фантастически громадной: $mc^2 \cong E/\gamma = 5 \cdot 10^{15}/30$ эВ = $1.5 \cdot 10^5$ ГэВ!!

Такое предположение, скорее всего, должно быть отвергнуто.

Предположение о том, что запаздывающий ливень образован первичной тяжелой частицей, не может обеспечить возникновение опережающего ливня, и также должно быть отвергнуто.

В настоящее время мы можем высказать два предположения о природе гигантских запаздывающих ливней.

Согласно первому, они могут образовываться множеством малоэнергичных адронов, рожденных, скажем, при высвобождении кварк-глюонной плазмы.

Согласно второму предположению, “запаздывающий” ливень образован обычными адронами, движущимися со скоростью света, а “опережающий” ливень образован рожденным в первом взаимодействии тахионом, движущимся со скоростью, превышающей скорость света. Тахион ускоряется, теряя энергию, и образованный им ливень опережает ливень, образованный обычными адронами.

Оба предположения весьма нетривиальны, и мы будем благодарны за предложение других, более реалистичных объяснений.

В любом случае запаздывающие ШАЛ с $N_e > 5 \cdot 10^6$ частиц демонстрируют наличие новых процессов в области энергий свыше 10^{16} эВ, и мы продолжаем их исследование.

-
1. J. Linsley and L. Scarsi, Phys. Rev. **128**, 2384 (1962).
 2. О. В. Веденеев, Ю. А. Нечин, Ю. А. Фомин, Г. Б. Христиансен, ВАНТ, сер. техника физ. эксп. вып.3(29), 47 (1986).
 3. V. A. Antonova et al., J. Phys. G **28**, 251 (2002).
 4. A. D. Erlykin, *EAS and the physics of high energy interactions*, The talk at 20 ECRS, Lisbon, 2006.
 5. M. Yoshida, Y. Toyoda, and T. Maeda, J. Phys. Soc. Japan **53**, 1983 (1984).
 6. G. B. Khristiansen et al., XXI ICRC, Adelaide **9**, 150 (1990).