

НАБЛЮДЕНИЕ ДВОЙНЫХ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

В. И. Яковлев

Двойные широкие атмосферные ливни исследовались на Тянь-Шанской высокогорной научной станции ФИАН с помощью двух различных установок. Одна установка регистрировала электронно-фотонную компоненту ливня, другая – излучение Вавилова–Черенкова. На обеих установках были зарегистрированы двойные ливни, разделенные временным промежутком ~ 100 нс. В настоящей работе проанализирована частота появления таких ливней в каждой из установок, и показано, что при наблюдении вертикальных ливней (зенитный угол $\vartheta < 60^\circ$) эти частоты совпадают.

Ключевые слова: двойные атмосферные ливни.

Двойные широкие атмосферные ливни (Д-ШАЛ) были впервые зарегистрированы в 1984 году японскими физиками М. Yoshida, Y. Toyoda, T. Maeda [1]. В этой работе ливни, задержанные на время порядка 100 нс относительно основного ливня, были зарегистрированы одновременно в нескольких разнесенных сцинтилляционных детекторах. Позднее Д-ШАЛ были зарегистрированы и другими авторами [2–3], однако только авторы [1] пришли к заключению, что задержанные ливни образуются тяжелыми частицами с массой в несколько десятков ГэВ и временем жизни $\sim (5 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6})$ с. Другие авторы воздерживались от таких оценок.

В 2005 г. с помощью четырехканального цифрового осциллографа TDS-2014 на Тянь-Шанской станции ФИАН также были начаты исследования Д-ШАЛ [4–5]. Детектор представлял собой ФЭУ-49, на фотокатод которого помещался сцинтиллятор, толщиной 5 см и диаметром 15 см. Управляющая система отбирала шестикратные совпадения между центральным и пятью периферийными детекторами, расположенными по окружности радиусом ~ 65 м. За время ~ 5000 часов установка зарегистрировала 2117 событий с числом частиц свыше 10^7 , из них в 98 событиях был зарегистрирован ливень, “запаздывающий” на время от 40 до 600 нс с плотностью потока частиц $\rho \geq 283$ м $^{-2}$. В 14 случаях “запаздывающие” сигналы были зарегистрированы в двух и более детек-

торах, в шести случаях – в трех и более детекторах, и в трех случаях – в четырех детекторах. Пример регистрации запаздывающего ливня в 4-х детекторах приведен на рис. 1.

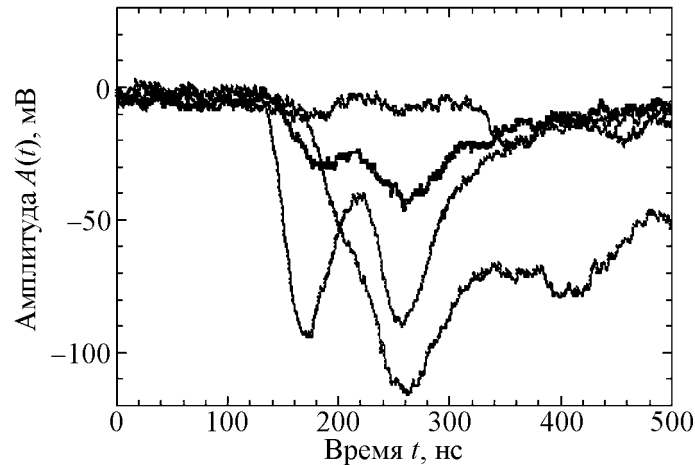


Рис. 1: Д-ШАЛ в 4-х сцинтилляционных детекторах.

Если предположить, что запаздывающий ливень является результатом случайного совпадения с небольшим локальным ливнем, или с любым другим случайным совпадением, то вероятность регистрации такого “Д-ШАЛ” одним детектором равна: $98 : 2117 = 0.0469 (\pm 0.00568)$. Ожидаемое число таких случайных “Д-ШАЛ”, регистрируемых одновременно двумя детекторами, составит $(0.046)^2 \times 2117 = 4.36$, в сравнении с 14 зарегистрированными (4.4σ). Ожидаемое число событий, регистрируемых тремя детекторами одновременно, составляет 0.21 по сравнению с 6 наблюдаемыми. Наконец, ожидаемое число событий, зарегистрированных одновременно четырьмя детекторами, равно 0.0097 в сравнении с 3 зарегистрированными (30σ). В работах [4–5] показано, что масса тяжелой частицы, образующей запаздывающий ливень, должна быть $\sim 10^5$ ГэВ. Такая оценка была получена на основе двух надежно измеряемых параметров: (1) скорости запаздывающего ливня (используя экспериментально измеренное среднее время задержки между двумя ливнями, равное 109 ± 6 нс, и длину пути ливня в атмосфере), а отсюда и лоренцфактор $\gamma \sim 15$, и (2) энергии E запаздывающего ливня (по числу частиц $N \sim 10^7$ в запаздывающем ливне). Оцененная масса частицы оказалась слишком большой, в связи с чем было высказано 2 гипотезы о природе таких запаздывающих ливней. Согласно первой, такие ливни могут образовываться множеством малоэнергичных адронов, рожденных, например, при высвобождении кварк-глюонной плазмы. Вторая гипотеза предполагает, что запаздывающий ливень образуется обычными адронами,

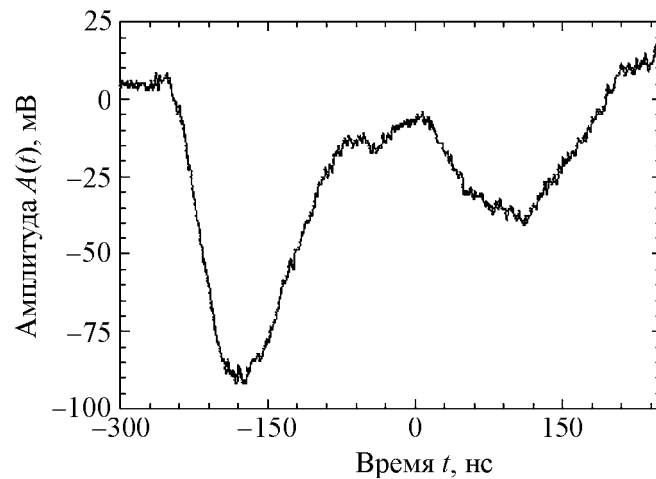
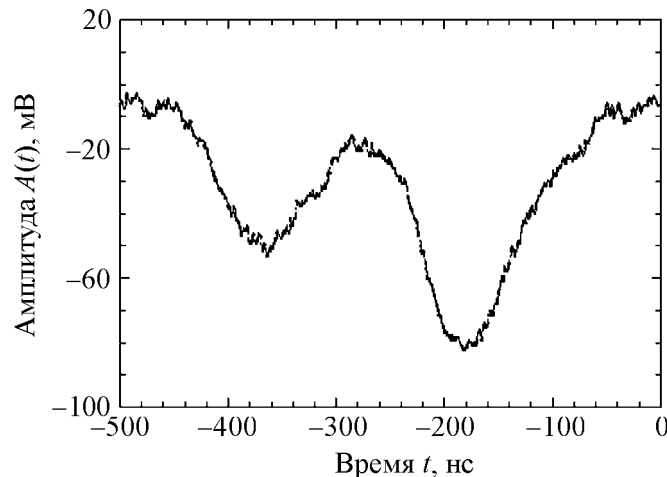
движущимися со скоростью света, а опережающий ливень образуется тахионом, рожденным во взаимодействии первичной частицы, и имеющим скорость, превышающую скорость света. Теряя энергию, тахион испытывает ускорение, и ливень, образованный им, опережает ливень, образованный обычными адронами. В соответствии с работой Т. Альвагера [6] заряженный тахион быстро теряет практически всю свою энергию на излучение Вавилова–Черенкова. Из классической работы Тамма и Франка [7] следует, что потери на это излучение на единицу пути составляют

$$dE/ds = -4\pi^2 Z^2 e^2 \left(\int (1 - c^2/v^2 n^2) v dv \right) / c^2.$$

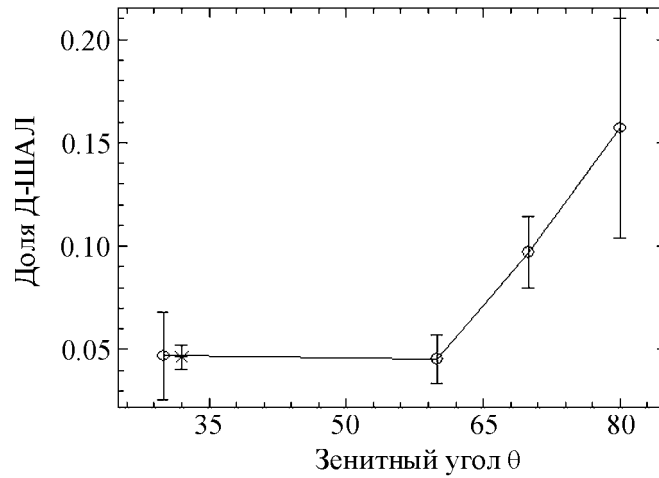
Отсюда видно, что с ростом скорости тахиона темп потерь его энергии возрастает, и это приводит к появлению опережающего ливня. В этом случае естественно предположить, что ливень, образованный заряженным тахионом, не будет содержать мюонов. Обнаружение таких безмюонных опережающих ливней было бы убедительным свидетельством тахионного происхождения опережающих ливней.

В другом эксперименте, в котором изучались двойные ливни на Тянь-Шане, ливни регистрировались с помощью фотоумножителя, помещенного в фокусе параболического зеркала диаметром 150 см [8]. Под различными зенитными углами регистрировались вспышки излучения Вавилова–Черенкова. Было проведено несколько сеансов таких наблюдений (вплоть до углов 80°), в которых и были зарегистрированы двойные ливни (и даже один тройной), с задержкой между ливнями в 100 и более нс. Примеры таких ливней показаны на рис. 2–3. Анализ частоты появления Д-ШАЛ в обеих установках показал, что при регистрации вертикальных ливней ($\vartheta < 60^\circ$) эти частоты совпадают (см. рис. 4, где кружками показаны данные по излучению Вавилова–Черенкова, а звездочкой – по сцинтилляционной установке). При увеличении зенитного угла доля двойных ливней достаточно быстро растет, что может быть связано с увеличением этой доли с ростом энергии взаимодействия. Однако статистика таких событий пока мала.

Первоначально в этом эксперименте отсутствовали детекторы, регистрирующие ливневое сопровождение. В 2008 году по предложению автора статьи установка, регистрирующая излучение Вавилова–Черенкова, была дополнена двумя сцинтилляционными детекторами площадью 1 м^2 каждый. Сцинтилляторы помещались на расстоянии 10 м от зеркала и были наклонены под углом 40° к горизонту. Начаты совместные измерения. В части событий, при регистрации под углами свыше 70° зарегистрированы одновременно излучение Вавилова–Черенкова и заряженные частицы. Из-за большой глубины наблюдения ($\geq 1991 \text{ г/см}^2$) можно с высокой степенью вероятности считать, что эти заряженные частицы являются мюонами.

Рис. 2: Д-ШАЛ в черенковском свете $\vartheta = 70^\circ$.Рис. 3: Д-ШАЛ в черенковском свете $\vartheta = 80^\circ$.

В настоящее время теорией, претендующей на исчерпывающее объяснение всех явлений в физике элементарных частиц, является теория струн [9–10]. В частности, тахион вполне вписывается в бозонную теорию струн. Эта теория предполагает, что бозонные струны имеют пространственно-временную размерность, равную 26. Однако, этот вариант теории не описывает фермионы. Теории, описывающие одновременно, как бозоны, так и фермионы, называются теориями суперструн. Таких теорий в настоящее время насчитывается пять. Применение принципа дуальности позволяет установить, что эти теории можно согласовать друг с другом. Они являются различными предельными случаями единой фундаментальной теории, получившей название M -теории. Все пять

Рис. 4: Доля Д-ШАЛ в зависимости от зенитного угла θ .

теорий имеют размерности, равные 10, и исключают существование тахиона вне вакуума¹. По этой причине мы попытались объяснить природу Д-ШАЛ с других позиций.

Когда мы “выбиваем” один кварк или глюон, он пытается вылететь, но не может этого сделать, поскольку тянет за собой “струну”, которая содержит мешок виртуальных частиц. Эта “струна” натягивается между наблюдаемым вылетевшим объектом и остатком протона. После разрыва струны обе ее части получают одинаковый, но противоположный по знаку импульс. При этом возникает также эффект пращи. Вероятно, это и является причиной того, почему оба ливня из пары Д-ШАЛ летят со слегка различными скоростями². Необходимо подчеркнуть, что Д-ШАЛ не наблюдались при энергиях $E < 10^{16}$ эВ. При таких энергиях не наблюдалось также явление выстроенности наиболее энергичных частиц, образуемых при взаимодействии первичных частиц космического излучения. Это явление было обнаружено в большом эксперименте с рентгеноэмульсионными камерами, выполненном коллаборацией “ПАМИР” [11], а также в некоторых других экспериментах [12–13].

Можно с высокой степенью надёжности предположить, что два явления, обнаруживаемые при одинаковых энергиях, имеют общую природу [14]. Изучение их природы является одной из первоочередных задач исследования роли адронной компоненты в формировании и развитии Д-ШАЛ и выстроенных событий при ультравысоких энергиях.

¹Физический вакуум – это море виртуальных частиц.

²При запаздывании на 100 нс скорость запаздывающего ливня составляет 0.997 с [14].

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. Yoshida, Y. Toyoda, and T. Maeda, J. Phys. Soc. Jpn. **53**, 1983 (1984).
- [2] О. В. Веденеев, Ю. А. Нечин, Ю. А. Фомин, Г. Б. Христиансен, ВАНИТ. Сер: Техника физического эксперимента, вып. 3(29), 47, (1986).
- [3] M. Ambrosio, C. Aramo, L. Colesanti and A. D. Erlykin, Nuclear Phys. B Proc. Suppl. **52B**, 234 (1997).
- [4] В. И. Яковлев, М. И. Вильданова, Н. Г. Вильданов, Письма в ЖЭТФ **85**, 111 (2007).
- [5] В. И. Яковлев, М. И. Вильданова, Н. Г. Вильданов, А. В. Степанов, ЯФ **73**, 816 (2010).
- [6] T. Alvåger, and M. N. Kreisler, Phys. Rev. **171**, 1357 (1968).
- [7] I. E. Tamm and I. M. Frank, Dokl. Akad. Nauk SSSR **14**, 109 (1937).
- [8] Р. У. Бейсембаев, Ю. Н. Вавилов, М. И. Вильданова, и др., Изв. РАН, сер. Физ., **75**(3), 383 (2011).
- [9] M. Kaku, *Introduction to Superstrings*, (Springer-Verlag, Berlin, 1990).
- [10] B. Greene, *The elegant Universe*, (Vintage Books, New York, 1999).
- [11] Pamir collaboration, Proc. of IV-th ISVHECRI, Beijin (1986).
- [12] L. Xue et al., Proc. of 26th ICRC, Salt Lake City, **1**, 127 (1999).
- [13] A. V. Aranasenko et al., Proc. of 17th ICRC, Plovdiv **7**, 220 (1977).
- [14] В. И. Яковлев, ЯФ **75**, 1 (2012).

Поступила в редакцию 7 февраля 2012 г.