

## ЭФФЕКТ РАЗДЕЛЕНИЯ МЮОНОВ ПО ЗНАКУ ЗАРЯДА ГЕОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В ГИГАНТСКОМ ЛИВНЕ

Е.Е.Антонов, А.В.Глушков<sup>+</sup>, Л.Г.Деденко, М.И.Правдин<sup>+</sup>, Ю.П.Пытьев,  
Т.М.Роганова\*, И.Е.Слепцов<sup>+</sup>, Г.Ф.Федорова\*

Физический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова  
119899 Москва, Россия

<sup>+</sup> Институт космической физики и аэронавтики Сибирского отделения РАН  
677891 Якутск, Россия

\* Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ им.М.В.Ломоносова  
119899 Москва, Россия

Поступила в редакцию 3 июля 1998 г.

Обнаружен эффект разделения мюонов по знаку заряда геомагнитным полем в гигантском ливне на очень высоком уровне значимости 0.03% в результате интерпретации показаний всех сработавших детекторных станций в этом ливне, зарегистрированном на Якутской установке, в рамках модели кварк-глюонных струн на основе расчетов откликов этих станций с учетом и без учета магнитного поля Земли.

PACS: 13.85.Tr, 96.40.Pq

**1. Введение.** Наблюдение гигантских атмосферных ливней (ГАЛ) с энергиями выше  $\sim 10^{20}$  эВ [1–3] представляет исключительный интерес для физики элементарных частиц и астрофизики. Эта область энергий находится за порогом "обрезания" энергетического спектра космических лучей, которое возникает из-за взаимодействий протонов (или ядер) с реликтовыми микроволновыми фотонами согласно предсказанию Грейзена – Зацепина – Кузьмина [4, 5].

Оценки энергии частиц первичного космического излучения (ПКИ), генерирующих ГАЛ, являются свидетельством возможного существования либо необычайно эффективных механизмов ускорения заряженных частиц вплоть до энергии  $\geq 3 \cdot 10^{20}$  эВ, либо новых неизвестных процессов генерации, например, распадов гипотетических сверхтяжелых частиц и топологических дефектов (сверхпроводящих космических струн и т.д.) или аннигиляции (магнитных монополей) [6]. Направления прихода ГАЛ указывают на возможные источники генерации частиц супервысоких энергий, поскольку отклонения от прямолинейного распространения в известных магнитных полях межгалактического пространства для таких частиц малы.

Чрезвычайно интересны исследования природы частиц с гигантскими энергиями. Возможными кандидатами являются протоны, ядра железа, космические нейтрино,  $\gamma$ -кванты (один первичный  $\gamma$ -квант расщепляется в геомагнитном поле за пределами атмосферы в целый спектр вторичных  $\gamma$ -квантов и электронов с энергиями  $\sim 10^{18}$  эВ). Эти первичные частицы генерируют в атмосфере каскады вторичных частиц с различными значениями положения максимума и ширины каскадной кривой, с разными угловыми распределениями осей ливней относительно вертикального направления и т.д.. Исследования взаимодействий частиц ПКИ с ядрами атомов воздуха в атмосфере в области таких экстремальных энергий могут дать уникальную информацию для физики элементарных частиц.

Интерпретация экспериментальных данных по широким атмосферным ливням возможна в рамках определенной модели взаимодействия адронов в области сверхвысоких энергий и различных предположений о внешних факторах, влияющих на динамику развития ливней. Во многих работах (см., например, [7]) было показано, что модель кварк-глюонных струн [8] позволяет хорошо описать экспериментальные данные. В частности, в работах [9, 10] продемонстрирована достаточность модели кварк-глюонных струн для согласования расчетных и экспериментальных данных по мюонной компоненте ливней, зарегистрированных на Якутской установке широких атмосферных ливней, в широкой области энергий частиц ПКИ.

Важным аспектом детализации модели развития ливня является расчет распределений времен прохождения частиц через детектор [11]. Среднее время запаздывания и ширина фронта ливня на различных расстояниях от оси зависят от положения максимума ливня и природы первичной частицы. Поэтому сопоставление расчетных и экспериментальных временных параметров ливня – дополнительный тест используемой в вычислениях модели адронных взаимодействий и предположения о природе первичной частицы. Кроме того, интерпретация экспериментальных данных по временному каналу на основе рассчитанной пространственно-временной структуры фронта ливня методами минимума  $\chi^2$  и минимакса [12, 13] позволяет в несколько раз уменьшить погрешность определения направления прихода ливня.

Вместе с тем, повышение уровня техники экспериментальных исследований и накопление статистики зарегистрированных ливней предъявляют все более высокие требования к точности расчетов их параметров, степени детализации динамики развития каскадов вторичных частиц и учету внешних факторов (например, магнитного и электрического поля Земли), влияющих на распределение регистрируемых заряженных частиц в плоскости установки. Из-за отклонений в магнитном поле нарушается азимутальная симметрия пространственного распределения заряженных частиц и изменяется зависимость их плотности от расстояния до оси ливня [9], что непосредственно сказывается на оценках энергии первичной частицы. Сопоставление улучшенной модели развития ливня с экспериментальными данными представляет несомненный практический интерес. Однако следует иметь в виду, что учет геомагнитного поля требует значительного увеличения времени расчета. Поэтому со времени первого упоминания о возможном влиянии геомагнитного поля на пространственное распределение мюонов [14] до практической реализации прошло много лет

В данной работе интерпретация данных для наиболее мощного ливня, зарегистрированного на Якутской установке [1], проведена с учетом рассчитанной в рамках модели кварк-глюонных струн пространственно-временной структуры фронта ливня от первичного протона и измеренного геомагнитного поля. Продемонстрирован эффект разделения мюонов по знаку заряда магнитным полем Земли в широких атмосферных ливнях.

**2. Методы расчета и интерпретации.** В рамках модели кварк-глюонных струн [8] гибридным методом [15] рассчитывалась матрица из  $80 \times 80$  элементов для мюонов, которые попадают в ячейки размерами  $50 \times 50$  м в плоскости установки. Таким образом, общая площадь, для ячеек которой были известны плотности мюонов, составляет  $4 \times 4$  км. Расчет проводился методом групп [9] на сетке направлений движения мюонов относительно оси ливня ( $80 \times 80$  элементов), энергий мюонов (30

элементов) и глубин (50 элементов). Средние значения для каждой группы – элемента четырехмерного массива – определяют энергию  $E_\mu$  мюона, высоту его генерации  $h$  и направление полета (зенитный угол  $\theta$  и азимутальный угол  $\phi$ ) относительно оси ливня. Число мюонов с такими параметрами в каждой группе определялось решением каскадных уравнений. Таким образом, все мюоны, рожденные в ливне, разбивались на группы в соответствии с определенными выше параметрами. Направление оси ГАЛ [1] было уточнено в результате интерпретации экспериментальных данных методами минимума  $\chi^2$  и минимакса [12, 13] на основе рассчитанной пространственно-временной структуры фронта этого ливня. Для каждой группы мюонов из четырехмерного массива решалось релятивистское уравнение Ньютона

$$m_0\gamma\frac{d\mathbf{V}}{dt} = e(\mathbf{V} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

где  $m_0$  – масса мюона,  $\gamma$  – фактор Лоренца,  $e$  – заряд,  $\mathbf{V}$  – скорость и  $\mathbf{B}$  – магнитное поле. Уравнение (1) решалось с учетом ионизационных потерь, то есть лоренцевский фактор  $\gamma$  и скорость  $\mathbf{V}$  уменьшались при распространении мюонов в атмосфере.

В районе расположения Якутской установки модуль магнитного поля  $|\mathbf{B}| = 0.6$  Гс и имеет склонение  $19^\circ$  к западу от направления на север и наклонение  $76^\circ$ . Были сделаны контрольные вычисления для случая пренебрежения геомагнитным полем ( $B = 0$ ). Интерпретация показаний детекторных станций проводилась методом минимума  $\chi^2$  в рамках двух моделей (с полем и без учета магнитного поля).

**3. Результаты расчетов и выводы.** Рис.1 иллюстрирует разделение мюонов по знаку заряда магнитным полем Земли в ГАЛ [1]: линии равной плотности для положительных мюонов показаны сплошными кривыми, а для отрицательных – штриховыми. Стрелками указаны проекции магнитного поля  $\mathbf{B}$  и оси ливня на плоскость установки. Эффект разделения мюонов по знаку заряда очевиден. Видно, во-первых, что центры распределений смещены друг относительно друга на 125 м, а во-вторых, что более важно, кривые на больших расстояниях от оси ливня, например для значения плотности  $\rho_\mu = 10 \text{ м}^{-2}$ , смещены влево и вверх для отрицательных мюонов и вправо и вниз для положительных на 600 – 700 м. Количественно разделение мюонов по знаку в разных точках плоскости установки можно характеризовать величиной  $k$ , которая определяется как отношение разности и суммы плотностей мюонов разных знаков в заданной точке:

$$k = (\rho_{\mu+} - \rho_{\mu-}) / (\rho_{\mu+} + \rho_{\mu-}). \quad (2)$$

Кривые одинаковых значений  $k = \text{const}$  показаны на рис.2. В случае  $|k| \geq 0.33$  плотность мюонов одного знака по крайней мере в 2 раза больше, чем другого, а для  $|k| \geq 0.82$  доля мюонов одного знака менее 10%. Из рис.2 видно, что на расстояниях  $r \geq 300$  м от проекции оси ливня на плоскость установки значения  $|k| \geq 0.3$ , то есть разделение мюонов по знаку заряда уже существенно. Этот эффект разделения мюонов был бы давно открыт, если бы проводились измерения знака заряда частиц. Однако на современных установках такие измерения не делаются. Поэтому обнаружить эффект разделения в настоящее время можно только по изменениям распределения плотности всех частиц в плоскости детектора по сравнению с симметричной картиной, которая ожидается в случае пренебрежения действием геомагнитного поля.

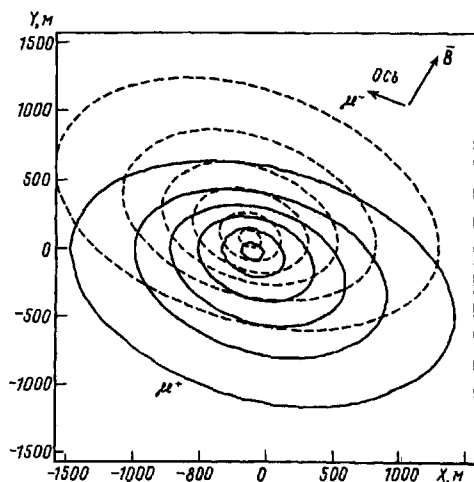


Рис.1. Линии равной плотности для положительных (сплошные кривые) и отрицательных (штриховые кривые) мюонов в ГАЛ

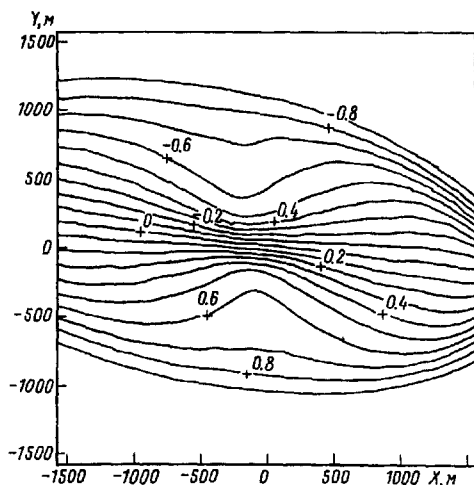


Рис.2. Линии постоянного значения  $k = \text{const}$  (см. формулу (2) текста) в ГАЛ

На рис.3 показаны уровни равной плотности мюонов, рассчитанные с учетом магнитного поля Земли (сплошные кривые) и в случае пренебрежения этим полем (штриховые кривые). Цифры у кривых – значения плотности мюонов. Видно, что вблизи оси ливня максимум плотности существенно “размывается” магнитным полем – сплошное кольцо самого малого размера (то есть максимальной плотности) находится внутри ближайшего пунктирного эллипса. На больших же расстояниях от оси эксцентриситет “сплошных” эллипсов заметно меньше, чем у “пунктирных” – пространственное распределение мюонов в направлении, перпендикулярном проекции оси на плоскость установки, становится более широким. Ясно, что на уровне наблюдения выбранный для сравнения ГАЛ должен состоять практически из одних мюонов и должно сработать много детекторов, чтобы имелась возможно более полная информация о пространственном распределении мюонов в плоскости установки. Кроме того, желательно, чтобы ось ливня была бы примерно перпендикулярна направлению магнитного поля. Всем этим условиям удовлетворяет наклонный ГАЛ, зарегистрированный на Якутской установке [1].

n	С полем			Без поля		
	$\chi^2$	X, м	Y, м	$\chi^2$	X, м	Y, м
42	48.9	1143	-452	86.5	1147	-417
39	33.6	1112	-452	73.1	1147	-417
24	26.1	1012	-417	22.9	1147	-417
24 (эксперимент [1])	41.7	1055	-406			

Результаты количественного сравнения двух распределений, представленных на рис.3, с экспериментальным [1] даны в таблице, в которой приведены числа сработавших детекторных станций (число степеней свободы на 3 меньше, так как определялось 3 параметра), значения минимума  $\chi^2$  и координаты X и Y оси ливня в плоскости установки. Из этой таблицы видно, что в случае рассмотрения показаний

всех сработавших детекторов ( $n = 42$ ) величина  $\chi^2_1$  на одну степень свободы равна 2.22, если магнитное поле не учитывается. Вероятность согласия такой модели с экспериментом менее  $10^{-4}$ . В случае учета поля  $\chi^2_1=1.25$ , что вполне приемлемо. Наш анализ выявил, что показания трех детекторов противоречат данным соседних станций. Если исключить из рассмотрения эти детекторы, то  $\chi^2_1=2.03$  в модели без поля. Вероятность согласия равна  $\sim 0.03\%$ . Для модели с учетом поля имеем  $\chi^2_1=0.93$  – прекрасное подтверждение эффекта разделения мюонов по знаку заряда геомагнитным полем. Заметим, что самая первая интерпретация проводилась на основе симметричного распределения мюонов в плоскости, перпендикулярной оси ливня. Согласно этому критерию, были отобраны 24 детекторные станции (то есть были отброшены показания 18 станций!) и получена величина  $\chi^2_1=2$  в модели без учета поля. Вероятность этого значения не более 0.5%. Интерпретация показаний этих станций в рамках наших расчетов не выявила преимуществ какой-либо модели ( $\chi^2_1=1.1$  без учета поля и  $\chi^2_1=1.24$  – с учетом), что естественно, так как специально отбирались станции, показания которых были бы симметричны в плоскости, перпендикулярной оси ливня.

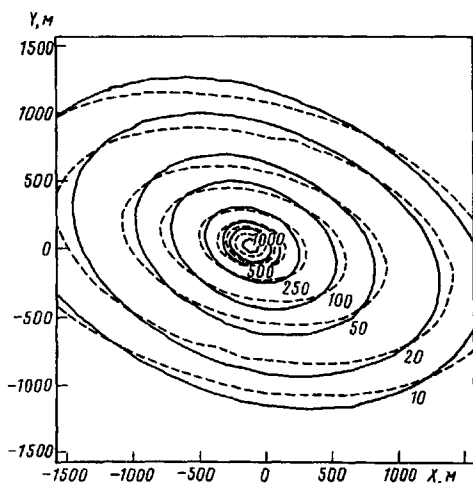


Рис.3. Линии равной плотности для мюонов, рассчитанные с учетом действия геомагнитного поля (сплошные кривые) и в пренебрежении этим полем (штриховые кривые) в ГАЛ

Таким образом, в результате интерпретации показаний всех сработавших детекторных станций в рамках модели кварк-глюонных струн на очень высоком уровне значимости 0.03% обнаружен эффект разделения мюонов по знаку заряда геомагнитным полем в самом гигантском ливне, зарегистрированном на Якутской установке.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Т.Зацепину за плодотворное обсуждение результатов, советы и поддержку.

1. N.N.Efimov, T.A.Egorov, A.V.Glushkov et al., *Proc. Int. Workshop on Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Rays*, Kofu 20, 1990.
2. N.Hayashida, K.Honda, M.Honda et al., *ICRR Report 324-94-19*, Tokyo, 1994.
3. D.J.Bird, S.C.Corbato, H.U.Dai et al., *Astroph. J.* **424**, 491 (1994).
4. K.Greisen, *Phys. Rev. Lett.* **2**, 748 (1966).
5. Г.Т.Зацепин, В.А.Кузьмин, *Письма в ЖЭТФ* **4**, 78 (1966).
6. C.T.Hill, D.N.Schramm, T.P.Walker et al., *Phys. Rev.* **D36**, 1007 (1987).

7. N.N.Kalmykov, G.V.Khristiansen, J. Phys. G**21**, 1279 (1995).
8. А.Б.Кайдалов, К.А.Тер-Мартirosян, Ю.М.Шабельский, ЯФ **43**, 1282 (1986).
9. А.М.Анохина, В.И.Галкин, Л.Г.Деденко и др., ЯФ **60**, 290 (1997).
10. B.N.Afanasiev, M.N.Dyakonov, V.P.Egorova et al., *Proc. 25th Int. Conf. on Cosm. Rays*, Durban **6**, 1997, p.229.
11. А.М.Анохина, В.И.Галкин, Л.Г.Деденко и др., ЯФ **61**, 1 (1998).
12. Ю.П.Пытьев, Математическое моделирование **4**, 76 (1992).
13. Ю.П.Пытьев, Математическое моделирование **3**, 65 (1991).
14. Ю.Н.Антонов, Ю.Н.Вавилов, Г.Т.Зацепин и др., ЖЭТФ **32**, 227 (1957).
15. L.G.Dedenko, *Can.J.Phys.* **46**, 178 (1968).