

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ $3 \cdot 10^{20}$ эВ*Л.Г.Деденко, Г.Т.Зацепин, Т.М.Роганова, Г.Ф.Федорова**Физический факультет и НИИЯФ МГУ им.М.В.Ломоносова**119899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 18 января 1995 г.

Расчеты, выполненные в рамках модели кварк-глюонных струн с учетом эффекта Ландау–Померанчука–Мигдала и взаимодействий нейтральных пионов в атмосфере, подтверждают оценки энергии $E_0 \geq 3 \cdot 10^{20}$ эВ первичных частиц, которые генерировали гигантские ливни, наблюдаемые в России, США и Японии. Расчетная доля мюонов как в наклонных, так и приблизительно вертикальных ливнях, согласуется с экспериментальной в предположении протонной природы первичных частиц. Поскольку направления прихода этих ливней не связаны с положением на небесной сфере каких-либо известных активных объектов на расстоянии до 30–50 Мпс, необходим поиск возможных источников таких частиц.

1. Введение. Из-за взаимодействий с реликтовыми микроволновыми фотонами протоны (или ядра) космических лучей испытывают большие энергетические потери, что должно приводить к "обрезанию" энергетического спектра при энергиях $(3 - 6) \cdot 10^{19}$ эВ, если предполагать равномерное распределение источников частиц с такими энергиями во Вселенной [1,2]. По этой причине в рамках внегалактической модели расстояния до источников частиц с энергиями $E > 10^{20}$ эВ должны быть ограничены величиной порядка 30–50 Мпс [3]. В качестве возможных источников космических лучей с такими энергиями были предложены, например, радиогалактики Фанароф–Рэлея класса II [4], радиогалактики в Местном сверхскоплении Девы [5] и др. Обзор возможных механизмов ускорения (например, на фронте ударной волны [6] или вследствие униполярной индукции) и источников представлен в [7].

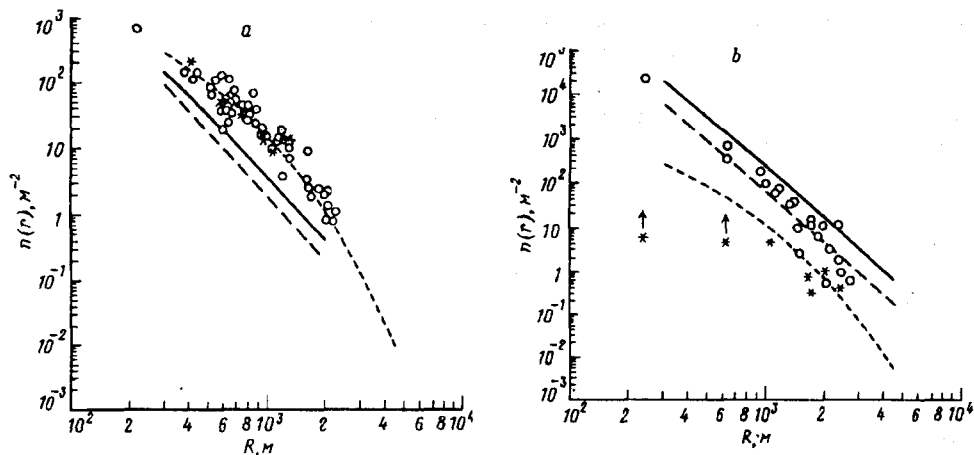
Недавно были наблюдаемы три гигантских атмосферных ливня, энергии которых оценивались около $(2-3) \cdot 10^{20}$ эВ [8–10]. Существенно отметить, что эти ливни были обнаружены на разных установках (Якутской в России, Fly's Eye в США и AGASA в Японии) и с использованием различных методов регистрации (детектирование заряженных частиц или сцинтилляционного излучения), причем наклонный якутский ливень состоит, в основном, из мюонов, а приблизительно вертикальный ливень, зарегистрированный на установке AGASA, – из электронов. Направления прихода этих ливней не указывают на Местное сверхскопление Девы или другие активные объекты как на возможные источники.

В нашей статье мы с помощью детальных расчетов подтверждаем высокие оценки энергий этих гигантских ливней [8–10] и представляем аргументы в пользу протонной природы первичных частиц.

2. Результаты расчетов и обсуждение. В рамках модели кварк-глюонных струн (КГС) [11] были рассчитаны функции пространственного распределения электронов и мюонов для двух гигантских ливней, зарегистрированных в Якутске [8] и Акено [10]. Учет эффекта Ландау–Померанчука с использованием сечений Мигдала [12] (эффект ЛПМ) приводит к увеличению плотности электронов в наклонных ливнях на $\sim 20\%$. При таких высоких энергиях

учитывались взаимодействия нейтральных пионов в атмосфере. Функция пространственного распределения электронов рассчитывалась как в приближении Нишимуры-Каматы-Грейзена (НКГ), так и с учетом модификации этой аппроксимации (НКГ_{mod}), когда параметр R_m заменялся на kR_m , где $k=0,5$ [13]. Следует отметить, что на расстояниях свыше ~ 1 км от оси ливня необходима дополнительная модификация приближения НКГ, чтобы учесть увеличение длины каскада из электронов и фотонов. В случае ливня [8] использовалось значение параметра $R_m = 80$ м, пороговая энергия мюонов была равна $E_{th} = 1 \cdot \text{cosec}\theta$ ГэВ, где зенитный угол $\theta = 58^\circ$. Для ливня [10] угол наклона $\theta = 23^\circ$, $R_m = 91,6$ м и $E_{th} = 0,5 \cdot \text{cosec}\theta$ ГэВ.

На рисунке приведены экспериментальные данные [8] (показания детекторов заряженных частиц и мюонных детекторов) и результаты расчета пространственных распределений электронов и мюонов в рамках модели КГС для энергии $E_0 = 5,5 \cdot 10^{20}$ эВ первичного протона. Эта энергия была выбрана из требования наилучшего фитирования экспериментальных данных. Из рисунка, а видно, что мюоны доминируют в этом наклонном ливне в соответствии с показаниями мюонных детекторов, а электроны составляют небольшую долю заряженных частиц (необходимо также учитывать электроны, возникающие от распада мюонов, и δ -электроны, что в целом составляет около 25% от плотности мюонов). Заметим, что наша оценка энергии примерно в 5 раз превышает величину из [8], что указывает на важность последовательного моделирования всех процессов в широком ливне.



Пространственные распределения электронов и мюонов в ШАЛ. Эксперимент (o - заряженные частицы, * - мюоны) (a) - [8]: энергия протона $E_0 = 5,5 \cdot 10^{20}$ эВ, $E_{th} = 1 \cdot \text{cosec}\theta$ ГэВ, $\theta = 58^\circ$; (b) - [10]: $E_0 = 2,7 \cdot 10^{20}$, $E_{th} = 0,5 \cdot \text{cosec}\theta$, $\theta = 23^\circ$, мюонные детекторы в пределах $R < 1000$ м в насыщении. Расчеты для первичного протона: сплошные кривые - электроны, НКГ; штриховые кривые - электроны, НКГ_{mod} ; штрих-пунктирные кривые - мюоны с пороговой энергией E_{th}

Для приближенно вертикального ливня, зарегистрированного в Акено [10], соотношение мюонов и электронов прямо противоположно рассмотренному выше случаю, причем мюонные детекторы в пределах 1000 м от оси ливня оказались в насыщении. Наши расчеты для первичного протона и в этом

случае хорошо фитируют экспериментальные данные как по электронной, так и по мюонной компоненте, что иллюстрирует рисунок, *b*, на котором приведены результаты расчета для энергии $E_0 = 2,7 \cdot 10^{20}$ эВ (верхней оценки из [10]). Однако если для фитирования использовать вариант расчета с НКГ_{mod}, который лучше объясняет некоторые экспериментальные данные [13], то оценку энергии следует увеличить в $\sim 1,5$ раза (до $\sim 4 \cdot 10^{20}$ эВ). В случае первичного ядра железа плотность мюонов возрастет в $\sim 2,5$ раза, а число электронов изменится незначительно (из-за близости максимума ливня к уровню наблюдения), что существенно изменит долю мюонов, которая будет противоречить показаниям мюонных детекторов (см. рисунок *b*). Таким образом, если не требовать существенного изменения модели адронных взаимодействий в области сверхвысоких энергий (в сторону более медленной диссипации энергии) по сравнению с моделью КГС [11], то первичные протоны, а не ядра железа, должны быть первичными частицами с энергиями $\geq 3 \cdot 10^{20}$ эВ, что ставит проблемы перед моделями, в которых предполагается ускорение в ударных волнах [6].

Таким образом, расчеты, выполненные в рамках модели КГС [11] с учетом эффекта ЛПМ [12] и взаимодействий нейтральных пионов в атмосфере, дают несколько большие оценки энергии $(4-5) \cdot 10^{20}$ эВ двух гигантских атмосферных ливней, чем приводят авторы экспериментальных работ [8, 10]. Сравнение в рамках проведенных расчетов доли мюонов в наклонном и приблизительно вертикальном ливнях служит свидетельством в пользу протонной природы первичных частиц. Так как на расстояниях 30–50 Мпс нет известных активных объектов на небесной сфере вблизи направлений прихода этих трех ливней [8–10], необходим поиск источников первичных частиц с энергиями $\geq 3 \cdot 10^{20}$ эВ. Следует также отметить, что на установке Хавера Парк уже давно было зарегистрировано 4 ливня с энергиями $> 10^{20}$ эВ, направления прихода которых также не указывают на какой-либо источник [14]. В качестве альтернативы можно искать магнитные поля большой протяженности [7].

-
1. K.Greisen, Phys. Rev. Lett. **16**, 748 (1966).
 2. Г.Т.Зацепин, В.А.Кузьмин, Письма в ЖЭТФ **4**, 78 (1966).
 3. V.S.Berezinsky and S.I.Grigoireva, Astron. Astrophys. **199**, 1 (1988); **210**, 462 (1988).
 4. P.L.Biermann and P.A.Strittmatter, Astrophys. J. **322**, 643 (1987).
 5. W.H.Sorrell, Astrophys. J. **323**, 647 (1987).
 6. W.I.Axford, Proc. 20-th ICRC, Moscow, **8**, 120 (1987).
 7. В.С.Березинский, С.В.Буланов, В.Г.Гинзбург и др., Астрофизика космических лучей, М.: Наука, 1984.
 8. 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).
 9. D.J.Bird, S.C.Corbato, H.U.Dai et al., Astrophys. J. **424**, 491 (1994).
 10. N.Hayashida, K.Honda, M.Honda et al., ICRR Report 324-94-19, Tokyo (1994).
 11. А.Б.Кайдалов, К.А.Тер-Мартirosян, Ю.М.Шабельский, ЯФ **43**, 1282 (1986).
 12. A.B.Migdal, Phys. Rev. **103**, 1811 (1956).
 13. L.G.Dedenko, N.M.Nesterova, S.I.Nikolsky et al., Proc. 14-th ICRC, Munich **8**, 2731 (1975).
 14. G.Brooke, G.Cunningham, P.I.V.Eames et al., Proc. 19-th ICRC, La Jolla **2**, 150 (1985).