

Оценка массового состава космических лучей с энергией выше $4 \cdot 10^{19}$ эВ

А. А. Михайлов¹⁾

Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю. Г. Шафера, 677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 28 сентября 2003 г.

После переработки 3 декабря 2003 г.

Рассмотрены направления прихода широких атмосферных ливней по мировым данным. Обнаружено, что распределение ливней по зенитному углу при энергиях $E > 10^{19}$ эВ и $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ отличаются друг от друга. По нашим оценкам, установка “Sugar” не зарегистрировала ни одного ливня с энергией выше 10^{20} эВ. Оценен массовый состав космических лучей сверхвысоких энергий. Предположено, что космические лучи при $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ являются, скорее всего, сверхтяжелыми ядрами.

PACS: 98.70.Sa

Состав космических лучей является важной характеристикой для решения проблемы их происхождения. В выяснении этого вопроса существенную роль может играть мюонная компонента ливня как наиболее чувствительная к изменению состава первичного излучения. Анализ мюонной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ) по данным установки AGASA (Япония) показывает, что в космических лучах при энергиях $E > 10^{19}$ эВ доминируют легкие ядра [1]. Результаты, полученные установкой HiRes (США) по скорости смещения максимума развития ливней с энергией, показывают, что космические лучи при $E \sim 2.5 \cdot 10^{19}$ эВ состоят в основном из легких ядер [2]. Оценка состава космических лучей на Якутской установке ШАЛ по черенковскому излучению указывает на то, что космические лучи при $E \sim 3 \cdot 10^{19}$ эВ также состоят в основном из протонов [3]. К сожалению, в этих работах для интерпретации экспериментальных данных используются модельные расчеты, учитывающие NN и πN -взаимодействия частиц сверхвысоких энергий, сечения которых экстраполируются из ускорительной области. В этой экстраполяции могут быть неточности. Также сами эксперименты являются трудными, и возможность ошибок не исключается.

В данной работе мы предлагаем новый метод оценки состава космических лучей на основе четко установленных экспериментальных данных.

На рис.1 показано распределение ливней с $E > 10^{19}$ эВ по зенитному углу θ : рис.1a – Якутск, рис.1b – Haverah Park [4]. Число ливней равно соответственно 458 и 144. Штриховой линией показано ожидаемое число событий в случае изотропного распределения первичного излучения согласно [5].

Сравнение распределений наблюдаемого и ожидаемого числа ливней по χ^2 -критерию Пирсона показывает, что между ними на уровне значимости 0.9 нет ника-

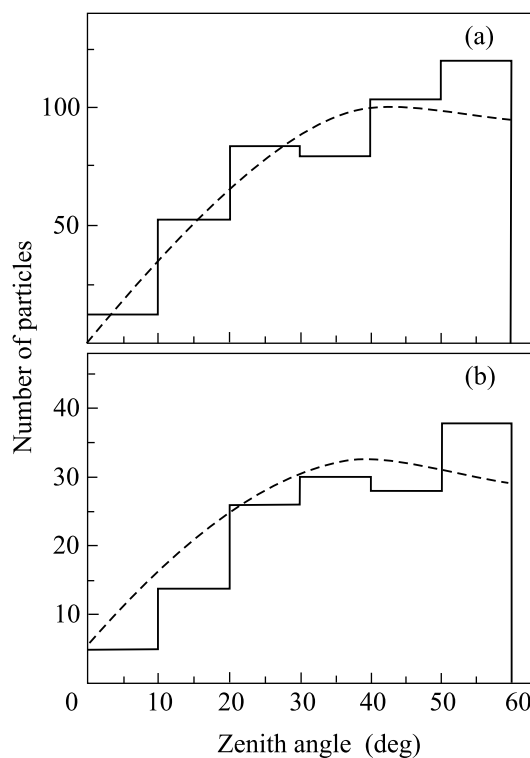


Рис.1. Распределение ливней с $E > 10^{19}$ эВ по зенитному углу θ : (a) – Якутск, (b) – Haverah Park. Штриховая линия – ожидаемое число ливней в случае изотропии

кого противоречия. Как видно из рис.1, в распределении ливней с $E > 10^{19}$ эВ преобладают наклонные ливни, как это ожидается в случае изотропии.

¹⁾e-mail: mikhailov@ikfia.ysn.ru

На рис.2 показано распределение ливней с $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ: рис.2a – Якутск, рис.2b – AGASA [6]. Число ливней равно соответственно 29 и 47. Штри-

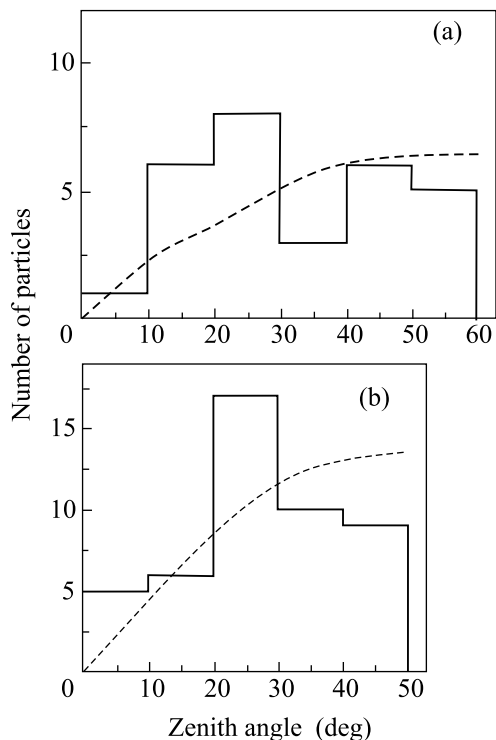


Рис.2. Распределение ливней с $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ: (a) – Якутск, б – AGASA. Штриховая линия – ожидаемое число ливней в случае изотропии

ховая линия – ожидаемое число событий в случае изотропии. Как видно из рис.2, максимум распределения числа ливней приходится на интервал углов 20° – 30° и соответственно число наклонных ливней меньше, чем ожидаемое в случае изотропии (см. также [7]). Наблюдаемое число ливней на установке Якутск (рис.2a) согласно χ^2 -критерию Пирсона при уровне значимости 0.15 не противоречит ожидаемому числу ливней. То же наблюдается и по данным установки AGASA (рис.2b), но при уровне значимости 0.1. Если объединить эти два распределения ливней, то χ^2 -критерий показывает, что при уровне значимости 0.03 распределение наблюдаемого числа ливней противоречит ожидаемому числу событий в случае изотропии. При этом в интервале углов 20° – 30° наблюдаемое число ливней превышает ожидаемую величину на 2.3σ , где σ – стандартное отклонение от ожидаемого числа событий.

Таким образом, в распределении ливней с $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ максимум прихода ливней преобладает в диапазоне средних углов. Далее рассмотрим распределение ливней по зенитному углу по данным установки Sugar. В работе [8] приводятся два вари-

анта оценки энергии ливней: по модели “Сидней” и по модели “Хиллас-Е”. На рис.3 приведены распределения ливней: по модели “Сидней” ливни с $E > 10^{19}$ эВ – (a); ливни с $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ – (b). Данные распределения подобны результатам, получен-

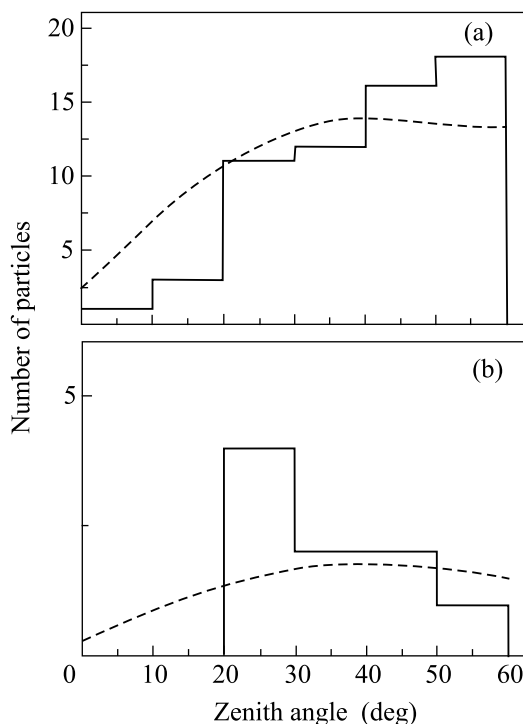


Рис.3. Распределение ливней по данным установки Sugar. Модель “Сидней”: (a) – $E > 10^{19}$ эВ, (b) – $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ, модель “Хиллас-Е”: (a) – $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ. Штриховая линия – ожидаемое число ливней в случае изотропии

ным на установках Якутск, Naverah Park и AGASA (рис.1 и 2) при соответствующих энергиях. По модели “Хиллас-Е” ливни на рис.3a будут иметь энергии выше $4 \cdot 10^{19}$ эВ. В этом случае распределение ливней противоречит данным вышеприведенных установок (рис.2). Исходя из этого, можно сделать заключение, что оценка энергии ливней по модели “Сидней” более правильна, то есть согласно этой модели на установке Sugar не зарегистрировано ни одного ливня с $E > 10^{20}$ эВ [8].

Чтобы выяснить, почему при $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ число наклонных ливней мало по сравнению с ожидаемой величиной (рис.2), мы анализируем эти ливни. На рис.4 в качестве примера из всего массива данных показаны электронно-фотонная и мюонная компоненты двух наклонных ливней: с углами $\theta_1 = 58.7^\circ$, $\theta_2 = 54.5^\circ$ и с энергиями $E_1 = 1.2 \cdot 10^{20}$ эВ, $E_2 = 2 \cdot 10^{19}$ эВ. Данные ливни зарегистрированы соответственно 7.05.1989 г. и 2.12.1996 г. на Якутской установке ШАЛ. Оси обоих ливней находятся внут-

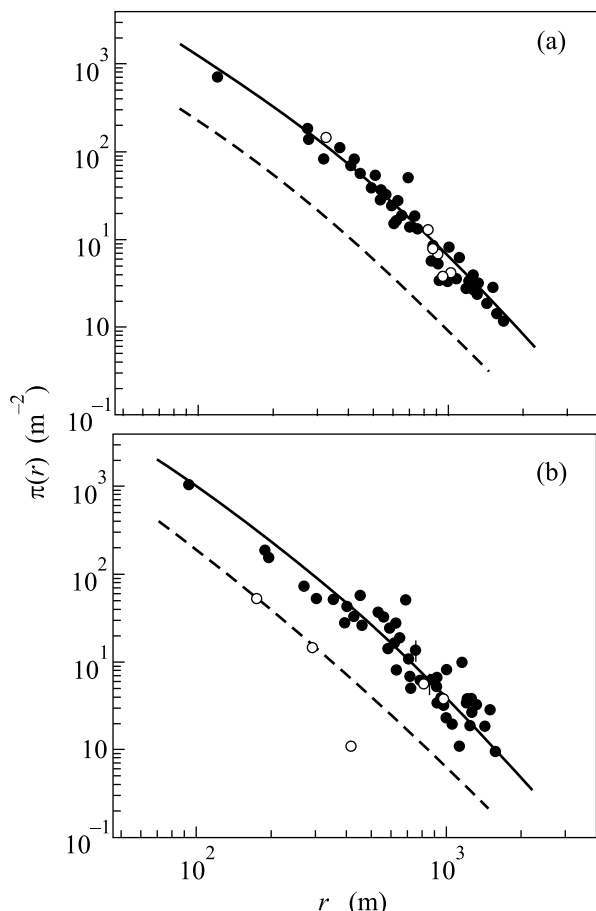


Рис.4. Плотность частиц в зависимости от расстояния r до оси ливня: (а) – $E_1 = 1.2 \cdot 10^{20}$ эВ; (б) – $E_2 = 2 \cdot 10^{19}$ эВ, ● – электроны и фотоны, ○ – мюоны; сплошные и штриховые линии – ожидаемые плотности для электронно-фотонной компоненты и мюонов

ри периметра установки. Как видно из рис.4а, плотности частиц в сцинтилляционных детекторах (порог регистрации электронов и фотонов 3 МэВ) и мюонных детекторах (порог регистрации 1 ГэВ) сравнялись, то есть ливень с $E_2 = 1.2 \cdot 10^{20}$ эВ представлен одними мюонами. Ливень с меньшей энергией, $E_1 = 2 \cdot 10^{19}$ эВ, при том же зенитном угле θ имеет электронно-фотонную компоненту (рис.4б). Факт увеличения доли мюонов у наклонных ливней с ростом энергии был установлен по всему массиву данных в [9].

Итак, при $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ установлены 2 факта: 1) наблюдается относительно малое число наклонных ливней, 2) в наклонных ливнях начинает преобладать мюонная компонента и при $E \sim 10^{20}$ эВ доминирует над остальными компонентами.

Ранее нами был сделан вывод, что космические лучи с $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ являются, скорее всего, галактическими [10]. Приведенные выше факты можно интерпретировать как изменение массового состава

галактических космических лучей в сторону утяжеления.

Качественно картина развития ливня такова: тяжелое ядро взаимодействует с атомами воздуха в относительно высоких слоях атмосферы по сравнению с более легкими ядрами и разваливается на отдельные нуклоны. От этих нуклонов образуются ливни меньших энергий и, по-видимому, наклонные ливни относительно меньших энергий сильнее поглощаются атмосферой. Поэтому наблюдается дефицит наклонных ливней (рис.2). А у наклонных ливней относительно больших энергий, видимо, мюонная компонента начинает доминировать над электронно-фотонной. Исходя из этого, можно сделать вывод, что массовый состав космических лучей с $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ более тяжелый, чем при $E \sim 10^{19}$ эВ.

В [11] было показано, что космические лучи с 10^{19} эВ, скорее всего, представлены ядрами железа. Таким образом, по-видимому, космические лучи при $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ являются более тяжелыми, чем ядра железа. Из-за изменения массового состава первичного излучения функция пространственного распределения вторичных частиц в ливнях может измениться, соответственно изменится оценка энергии ливня (на Якутской установке энергия ливня оценивается через плотность частиц электронно-фотонной компоненты на расстоянии 600 м от оси ливня). Поэтому трудно сказать, насколько состав космических лучей при $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ тяжелее ядра железа.

Якутская установка ШАЛ поддержана Российским министерством наук (проект # 01-30).

1. K. Shinozaki, M. Chikawa, M. Fukushima et al., *Proc. 28-th ICRC*, **1**, Tsukuba, (2003), p. 401.
2. G. Archbold, P. V. Sokolsky et al., *Proc. 28-th ICRC*, **1**, Tsukuba, 2003, p. 405.
3. S. Knurenko, V. A. Kolosov, Z. E. Petrov, and I. Ye. Sleptsov, *Proc. 27-th ICRC*, **1**, Hamburg, 2001, p. 145.
4. J. Linsley, R. J. O. Reid, A. A. Watson, and M. Wada, *Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays*, **1**, Tokyo, 1980, p. 97.
5. N. N. Efimov, M. I. Pravdin, and A. A. Mikhailov, *Proc. 18-th ICRC*, **2**, Bangalore, 1983, p. 149.
6. M. Takeda, N. Hayashida, K. Honda et al., *Astroph/9902239*.
7. A. A. Mikhailov, *Proc. 28-th ICRC*, **1**, Tsukuba, 2003, p. 441.
8. M. M. Winn, J. Ulrichs, L. S. Peak et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **12**, 653 (1986).
9. A. V. Glushkov, I. T. Makarov, E. S. Nikiforova et al., *Astropart. Phys.* **4**, 15 (1995).
10. А. А. Михайлов, Письма в ЖЭТФ **77**, 181 (2003).
11. А. А. Михайлов, Письма в ЖЭТФ **72**, 233 (2000).