

# Космические лучи предельно высоких энергий и пульсары

А. А. Михайлов<sup>1)</sup>

Институт космофизических исследований и аэронавтики Якутского научного центра Сибирского отделения РАН,  
677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 31 декабря 2002 г.

Рассматриваются широкие атмосферные ливни (ШАЛ) с энергией выше  $4 \cdot 10^{19}$  эВ, зарегистрированные с 1974 г. по 2001 г. на Якутской установке ШАЛ. Обнаружена корреляция направлений прихода их с пульсарами, расположенными в сторону Местного рукава Галактики. Обсуждается проблема происхождения космических лучей.

PACS: 98.70.Sa

Проблема происхождения космических лучей является одной из основных в астрофизике высоких энергий. В настоящее время существует множество гипотез о происхождении космических лучей с энергией  $E > 4 \cdot 10^{19}$  эВ: от образования их в результате распада сверхтяжелых реликтовых частиц с массой  $> 10^{21}$  эВ и временем жизни больше возраста Вселенной, находящихся в составе невидимой материи гало Галактики [1] до их прихода из ядер активных галактик [2, 3], радиогалактик [4] и т.д. Эти гипотезы должны объяснить:

1) если частицы образуются в нашей Галактике или в близких галактиках, то каким образом они создают изотропное распределение на небесной сфере?

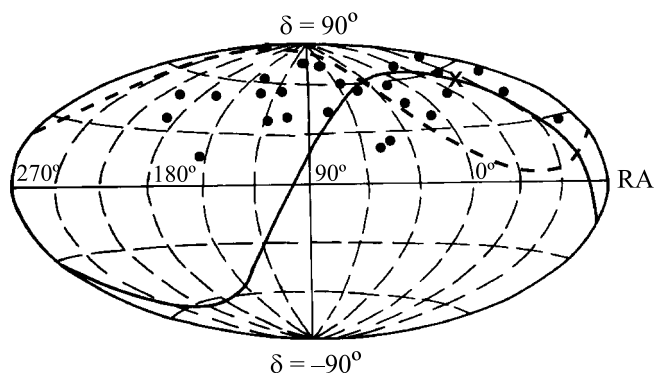
2) если частицы образуются в галактиках, расположенных далее 40 Мпк, то почему не наблюдается излом энергетического спектра выше  $6 \cdot 10^{19}$  эВ [5] (согласно расчетам Грейзена [6], Зацепина и Кузьмина [7], спектр частиц должен испытать излом при  $6 \cdot 10^{19}$  эВ в результате взаимодействия частиц с реликтовым микроволновым излучением с температурой 2.7 К)?

К сожалению, ни одна из этих гипотез не может убедительно объяснить эти требования.

В данной работе мы анализируем распределение ливней с энергией  $E > 4 \cdot 10^{19}$  эВ, зарегистрированных на Якутской установке широких атмосферных ливней (ШАЛ) с 1974 по 2001 г. За это время зарегистрировано 27 ливней, оси прихода которых находятся внутри периметра установки. Из них один ливень имеет энергию  $E > 10^{20}$  эВ ( $1.2 \cdot 10^{20}$  эВ). Точность определения энергии первичных частиц  $\sim 30\%$ , пространственных углов  $\leq 3^\circ$ .

На рисунке показано распределение ливней на карте небесной сферы во второй системе эквато-

риальных координат  $\delta$  (склонение) и  $RA$  (прямое восхождение). Как видно из рисунка, ливни распре-



Распределение 27 ливней с  $E > 4 \cdot 10^{19}$  эВ на карте небесной сферы.  $\delta$  и  $RA$  – склонение и прямое восхождение,  $X$  – ось силовых линий магнитного поля, штриховая кривая – условная граница Местного рукава

делены практически изотропно, только при координатах  $\delta \sim 27^\circ$  и  $RA \sim 48^\circ$  наблюдается кластер. Вероятность образования кластера случайно из 27 равномерно распределенных ливней равна  $P \sim 1$ .

Далее определялось, имеется ли корреляция между направлениями прихода ливней и пульсарами [8]. Для этого выбраны следующие направления: 1) по всей видимой установке области небесной сферы; 2) вдоль силовых линий крупномасштабного регулярного магнитного поля в сторону Местного рукава – внутри конуса с углом  $< 45^\circ$  (штрихи, см. рисунок) от оси силовых линий  $b = 0^\circ$ ,  $l = 90^\circ$  (отмечен на рисунке знаком  $X$ ,  $b$  и  $l$  – галактические координаты) или  $\delta = 48.1^\circ$ ,  $RA = 317.5^\circ$ . Выбор данного направления обусловлен тем, что угол отклонения магнитным полем частиц, движущихся вдоль силовых линий, будет минимальным и вероятность корреляции между

<sup>1)</sup>e-mail: mikhailov@ikfia.ysn.ru

направлениями прихода ливней и пульсарами повышается.

Для каждого ливня вычислялись угловые расстояния между направлением его прихода со всеми пульсарами и определялось наблюдаемое число ливней  $N(\vartheta)$  внутри угла  $\vartheta$  от пульсаров. При этом данный ливень рассматривался только один раз и до минимального значения угла  $\vartheta$ . Вероятность случайности  $P$  наблюдаемого числа ливней  $N(\vartheta)$  вычислялась методом Монте-Карло розыгрышем 27 событий, распределенных изотропно по небесной сфере с учетом экспозиции установки (см. подробнее [9]). Число розыгрышей определялось точностью определения вероятности случайности и в отдельных случаях достигало  $10^6$ .

Результаты анализа показывают, что только со стороны Местного рукава Галактики наблюдается корреляция направлений прихода частиц с пульсарами. Из 11 ливней, пришедших со стороны Местного рукава, 10 ливней находятся внутри угла  $\theta < 6^\circ$  от пульсаров. В таблице даны дата прихода ливней, его координаты, список пульсаров, расстояния до них и

**Список ливней с  $E > 4 \cdot 10^{19}$  эВ и пульсаров со стороны Местного рукава, которые коррелируют между собой**

$n$	Дата прихода ливня	$RA$ , градусы	$\delta$ , градусы	Пульсар, PSR	Расстояние, кпк	$\text{Log } T$ , лет
1	16.01.88	8.7	36.3	0045 + 33	3.6	6.91
2	26.01.96	21.3	45.7	0053 + 47	1.0	6.32
3	19.10.89	24.0	57.0	0136 + 57	2.8	5.61
4	1.12.91	235.4	79.8	1322 + 83	0.7	7.27
5	21.02.99	274.2	54.5	1839 + 56	1.6	7.24
6	15.12.89	283.5	29.3	1912 + 25	2.0	7.64
7	4.11.85	297.3	45.2	1953 + 50	1.7	6.78
8	13.01.95	314.8	57.8	2045 + 56	8.5	5.83
9	26.10.85	335.2	51.0	2217 + 47	2.4	6.49
10	8.02.83	342.9	65.8	2224 + 65	2.0	6.05

их возраст  $T$ . Вероятность случайности обнаружения 10 ливней внутри  $\theta < 6^\circ$  от пульсаров равна  $P = 0.05$ . За пределами Местного рукава из оставшихся 16 ливней только 6 находятся внутри  $\theta < 6^\circ$  от пульсаров. Вероятность случайности такого события равна  $P \sim 0.7$ . Отметим, что из этих 6 ливней 3 имеют максимально зарегистрированные энергии. Ливень 7 мая 1989 г. имеет энергию  $1.2 \cdot 10^{20}$  эВ и составляет угол  $\theta < 1^\circ$  от пульсара PSR 0458 + 46. Расстояние до этого пульсара равно 1.8 кпк. Два других ливня имеют энергии  $7.4 \cdot 10^{19}$  эВ и  $6.8 \cdot 10^{19}$  эВ и составляют углы менее  $6^\circ$  от пульсаров PSR 0940 + 10 и 0917 + 63, находящихся на 1.6 и 0.7 кпк, соответ-

ственно. По-видимому, корреляция данных ливней с пульсарами обусловлена тем, что частицы высоких энергий менее всего отклоняются магнитным полем.

В [10] ливень с максимально наблюдаемой энергией  $E = 3.2 \cdot 10^{20}$  эВ, зарегистрированный на установке ШАЛ Fly's Eye (США), был интерпретирован как образованный от ядра золота. На этой установке, в отличие от установок ШАЛ Якутск и AGASA (Япония), проводятся прямые измерения процесса развития ливня в атмосфере через регистрацию ионизирующего излучения атомов воздуха, возбуждаемых частицами ливня.

Среднее время жизни ядер золота в Галактике равно среднему времени жизни протонов с энергией  $E_p = E_{Au}/z$  ( $z$  – заряд Au). Как показывают расчеты [11], время жизни ядер золота с  $E_{Au} = 4 \cdot 10^{19}$  эВ больше в 10 раз, чем время жизни протонов с такой же энергией, и она равна  $\sim 10^5$  лет. Данное время жизни частиц достаточно для изотропизации направлений прихода их [11, 12], и оно намного меньше времени  $\sim 10^8$  лет [6, 7], необходимого для образования обрыва спектра из-за их взаимодействия с реликтовым излучением. Таким образом, требования, приведенные в начале статьи, удовлетворяются.

Согласно данным [13, 14], химический состав космических лучей меняется с энергией постепенно в сторону утяжеления: при энергии  $\sim 10^{10}$  эВ преобладают протоны (92.5%) [13], при  $\geq 3 \cdot 10^{15}$  эВ – тяжелые ядра [13], при  $\sim 10^{19}$  эВ – ядра железа [14], при  $\sim 10^{20}$  эВ – ядра золота. По-видимому, изменение спектра космических лучей [13] при  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ,  $6 \cdot 10^{17}$  эВ и  $10^{19}$  эВ обусловлено изменением химического состава частиц.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект # 00-02-16325). Якутская установка ШАЛ поддержана Российским Министерством Наук (проект # 01-30).

В заключение можно сказать, что источниками космических лучей предельно высоких энергий являются, скорее всего, пульсары.

1. V. S. Berezhinsky, M. Kachelriess, and A. Vilenkin. Phys. Rev. Lett. **79**, 4302 (1997).
2. P. Tinyakov and I. Tkachev, J. Phys. Cosm. Jpn. **70**, 58 (2001).
3. А. В. Урысон, Письма в ЖЭТФ **64**, 71 (1996).
4. J. Rachen, T. Stanev, and P. Biermann, A&A **273**, 377 (1993).
5. N. Sakaki, M. Chikawab, and M. Fukushima, Proc. 27th ICRC, Hamburg, **1**, 2001, p. 333.
6. K. Greisen, Phys. Rev. Lett. **16**, 748 (1996).

7. G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin, Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pis'ma Red. **4**, 144 (1966).
8. J. N. Taylor, R. N. Manchester, and A. G. Lyne, Astrophys. J. Suppl. **88**, 529 (1993).
9. N. N. Efimov, A. A. Mikhailov, and M. I. Pravdin, Proc. 18-th ICRC. Bangalore, **2**, 1983, p. 149.
10. L. A. Anchordoqui, M. T. Dova, T. P. McCauley et al., Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) **B97**, 203 (2001).
11. V. S. Berezinsky, S. I. Grigoryeva, A. A. Mikhailov et al., Proc. Int. Symp. Astroph. Aspects of the Most Energ. Cosm. Rays, World Scientific, Singapore, 1990, p. 134.
12. В. Н. Зиракашвили, Д. Н. Почепкин, В. С. Птускин, С. И. Роговая, Изв. АН, сер. физич. **59**, 153 (1995).
13. M. Nagano and A. A. Watson, Rev. of Mod. Phys. **72**, 689 (2000).
14. A. D. Erlykin, A. A. Mikhailov, and A. W. Wolfendale, J. Phys. G., Nucl. Part. Phys. **28**, 2225 (2002).