

## НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

А.А.Михайлов<sup>1)</sup>

Институт космофизических исследований и астрономии  
677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 4 июля 2000 г.

Оценен химический состав космических лучей в сверхвысоких энергиях через надежно определяемое как экспериментально так и теоретически распределение ливней по галактической широте. Экспериментальные данные при энергии  $\sim 10^{19}$  эВ согласуются с теоретическими расчетами, если космические лучи состоят в основном из тяжелых ядер. При энергии  $\sim 10^{19}$  эВ обнаружен повышенный поток космических лучей со стороны плоскости Галактики.

PACS: 98.70.Sa

Оценка химического состава (химсостава) по глубине максимума развития ливней по данным Якутской установки широких атмосферных ливней (ШАЛ) с использованием модельных расчетов  $NN$ - и  $\pi N$ -взаимодействий частиц при сверхвысоких энергиях показала [1], что при  $10^{18} - 10^{19}$  эВ в первичном излучении преобладают протоны. Аналогичная оценка химсостава была сделана по данным установки ШАЛ Fly's Eye [2] при энергии  $\sim 10^{19}$  эВ; согласно этим оценкам, доля протонов составляет 90%. Авторы работы [3], применяя более новую модель взаимодействия частиц для анализа максимума развития ливней установки Fly's Eye, пришли к выводу, что космические лучи с энергией до  $3 \cdot 10^{18}$  эВ являются тяжелыми ядрами, а выше  $3 \cdot 10^{18}$  эВ доля тяжелых ядер составляет не менее 50%. Как видно из этих работ, имеются разногласия в оценке химсостава космических лучей сверхвысоких энергий по максимуму развития ливней, которая требует экстраполяции некоторых характеристик  $NN$ - и  $\pi N$ -взаимодействий частиц от низких энергий до сверхвысоких. В данной работе мы применили другой подход – оценили химсостав космических лучей через наблюдаемое и ожидаемое число ливней по галактической широте.

В работе [4] было показано, что космические лучи с энергией до  $4 \cdot 10^{19}$  эВ скорее всего являются галактическими. Поэтому в представленной нами здесь работе рассмотрены направления прихода ШАЛ в интервале энергий  $(0.8 - 4) \cdot 10^{19}$  эВ, зарегистрированных на Якутской установке за 1974–1995 гг. Данные представлены направлениями прихода 576 ливней с зенитными углами  $< 60^\circ$  и осями, лежащими внутри периметра установки. Средняя энергия ливней равна  $1.3 \cdot 10^{19}$  эВ.

Ожидаемое число ливней по галактической широте определялось модельными расчетами – вычислением траекторий частиц в предполагаемом магнитном поле Галактики.

Нами рассмотрена модель магнитного поля диска, предложенная в [5], построенная на основе определения меры фарадеевского вращения радиоизлучений от пульсаров. Основной составляющей магнитного поля является азимутальная компонента. Ее величина равна  $\sim 2$  мкГс, радиальная и перпендикулярная  $z$ -компоненты поля –

<sup>1)</sup> e-mail: mikhailov@sci.yakutia.ru

на порядок меньше. Наряду с регулярной составляющей поля существует нерегулярная составляющая с величиной от 0 до 5 мкГс и характерным размером 100 пк. Направление нерегулярной составляющей распределено случайным образом. Размеры диска, радиус 15 кпк, полувысота 0.4 кпк.

Как и в работе [6], предположим наличие обширного магнитного поля вне диска – в гало Галактики. Данное поле имеет как регулярные, так и нерегулярные составляющие. Величина основной азимутальной регулярной компоненты магнитного поля в гало Галактики равна  $\sim 1 \cdot \exp(|z| - 0.4)/5$  кпк) мкГс. Величина нерегулярной составляющей имеет от 0 до 1.5 мкГс с характерным размером 500 пк. Ее направление также распределено случайным образом. Размеры гало, радиус 15 кпк, полувысота 5 кпк.

Мы рассмотрели два случая распределения источников космических лучей: 1) источники распределены равномерно по всему диску; 2) источниками являются пульсары в диске (в [7] и в других работах мы показали, что источниками космических лучей сверхвысоких энергий скорее всего являются пульсары). Распределение пульсаров по радиусу  $r$  и по высоте  $z$  галактического диска описана функцией

$$f(r, z) = f_1(r) \cdot f_2(z),$$

где  $f_1(r) = (1 - \exp(r^2/8)) \cdot \exp(-r^2/100)$ ,  $f_2(z) = 1/0.46 \cdot \exp(-|z|/0.23)$ . Функция  $f_1(r)$  найдена в результате аппроксимации наблюдаемого распределения пульсаров по радиусу  $r$  [8], а функция  $f_2(z)$  взята из [8].

В приведенной выше модели магнитного поля Галактики для определения ожидаемого числа ливней по галактической широте вычислялись траектории античастиц с Земли. Траектории античастиц вычислялись до их выхода за пределы гало, они соответствуют траекториям положительно заряженных частиц от источников. Поток ожидаемых частиц в данном направлении будет пропорционален длине пути античастиц в области источников и плотности источников. Мы рассмотрели траектории античастиц, антипротонов, для энергий  $5 \cdot 10^{17}$  эВ и  $1.3 \cdot 10^{19}$  эВ. Энергия антипротонов  $1.3 \cdot 10^{19}$  эВ соответствует средней энергии рассматриваемых ливней, энергия  $5 \cdot 10^{17}$  эВ соответствует порождению ливней ядрами железа.

Длины пути частиц в диске Галактики, или ожидаемые интенсивности частиц, в зависимости от галактической широты  $b$  показаны на рис.1. Сплошной линией показаны длины пути частиц, когда источники космических лучей распределены по

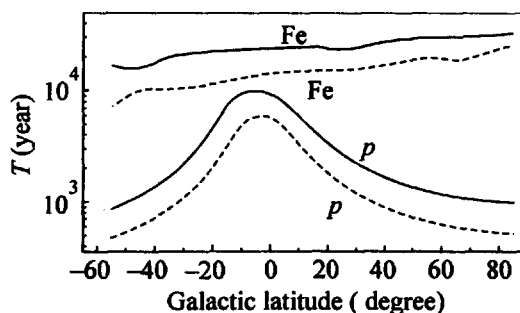


Рис.1. Длины пути (ожидаемые интенсивности) протонов  $p$  и ядер железа  $Fe$  с энергией  $1.3 \cdot 10^{19}$  эВ в диске Галактики. Сплошные кривые – источники распределены равномерно по всему диску, штриховые – источниками являются пульсары

всему диску, штриховой – когда источниками являются пульсары. Независимо от рассматриваемых источников, в случае первичного излучения из протонов ожидается 100-процентная анизотропия, а в случае ядер железа – несколько процентов.

Отметим, что аналогичный вывод был сделан в [9] для других моделей магнитного поля Галактики. Увеличение размера гало до 30 – 100 кпк с величиной поля  $\sim 1$  мкГс практически не меняет полученных результатов [10, 11].

На рис.2 показаны наблюдаемое распределение ливней по галактической широте  $b$  по данным Якутской установки ШАЛ и ожидаемое число ливней от первичного излучения из протонов  $p$  и ядер железа Fe. Ожидаемое число ливней найдено от

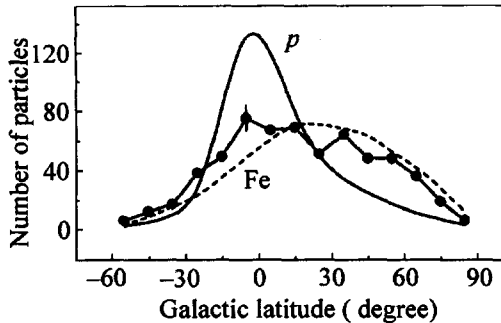


Рис.2. Наблюдаемое (кружки, они соединены линией) и ожидаемое число ливней от протонов  $p$  и ядер железа Fe по галактической широте

ожидаемой интенсивности (рис.1) с учетом экспозиции якутской установки ШАЛ на небесной сфере и нормировано к наблюдаемому числу ливней. После нормировки ожидаемое число ливней как для протонов, так и ядер железа в обоих случаях распределения источников совпали. Сравнение наблюдаемого и ожидаемого числа ливней по галактической широте  $\chi$ -квадрат методом показало, что доля ядер железа в первичном излучении при  $10^{19}$  эВ должна быть не менее 80%.

Отметим, что по вышерассмотренным ливням со стороны галактической плоскости при широтах  $|b| < 3^\circ$  обнаружен повышенный поток частиц: наблюдается 59 ливней вместо ожидаемых 34.4 в случае изотропии первичного излучения, превышение составляет над ожидаемыми  $4.2\sigma$ . Данный повышенный поток частиц при энергии  $\sim 10^{19}$  эВ, видимо, связан с тем, что космические лучи до  $4 \cdot 10^{19}$  эВ скорее всего являются галактическими и рождаются в пульсарах [7]. Оценка химсостава первичного излучения по направлению прихода ливней показывает, что космические лучи при энергии  $\sim 10^{19}$  эВ состоят в основном из ядер железа, их доля составляет  $\geq 80\%$ .

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект # 00-02-16325).

1. B.N.Afanasiev, M.N.Dyakonov, V.P.Egorova et al., *Proc. Int. Symp. "Extremely High Energy Cosmic Rays"*, Institute for cosmic Ray Research, Tokyo, 1966, p.32.
2. D.J.Birg, S.C.Corbato, H.Y.Dai et al., *Phys. Rev. Lett.* **71**, 4301 (1993).
3. A.W.Wolfendale and T.Wibig, *Proc. 26-th ICRC, Salt Lake City*, **3**, 1999, p.248.
4. N.N.Efimov, A.A.Mikhailov, and A.D.Krasilnikov, *Proc. 21-th ICRC, Adelaide*, **2**, 1990, p.64.
5. R.J.Rand and S.R.Kulkarni, *Astrophys. J.* **343**, 760 (1989).
6. V.S.Berezinsky, A.A.Mikhailov, and S.I.Syrovatskii, *Proc. 16-th ICRC, Kyoto*, **2**, 1979, p.86.
7. A.A.Mikhailov, *Proc. 26-th ICRC, Salt Lake City*, **3**, 1999, p.268.
8. R.Manchester and J.Taylor, *Pulsar*, San Francisco, 1977.
9. M.Giller, J.L.Osborne, J.Wdowczyk, and M.Zelinska, *J.Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **20**, 1649 (1994).
10. V.S.Berezinsky, S.I.Grigoryeva, A.A.Mikhailov et al., *Proc. ICRF Int. Symp., Kofu*, 1991, p.134.
11. R.Lampard, R.W.R.Clay, B.R.Dawson, and A.G.Smith, *Proc. 25-th ICRC, Durban*, **4**, 1997, p.193.