

Письма в ЖЭТФ, том 10, стр. 347 – 353

5 октября 1969 г.

**О НОВОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ОБЪЯСНЕНИЯ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
СВЕРХВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ**

Г.В.Куликов, Ю.А.Фомин, Г.Б.Христиансен

В настоящее время можно считать окончательно установленным существенное увеличение показателя энергетического спектра первичного космического излучения при энергии $E \sim (2 + 4) 10^{15}$ эв от значения

$\gamma = 1,6 + 1,7$ при $E < 10^{15}$ эв до значения $\gamma = 2,3 + 2,4$ при $E > 10^{16}$ эв [1-7]. Многочисленные экспериментальные данные указывают также на последующее уменьшение показателя первичного энергетического спектра при $E \gtrsim 10^{17} + 10^{18}$ эв [7-12] вновь до значения $\gamma = 1,6 + 1,7$. До последнего времени этот результат естественным образом рассматривался в рамках диффузионной картины распространения космических лучей в нашей Галактике и суперпозиции космических лучей галактического и метагалактического происхождения [7, 13, 14]. Однако, в последние годы выяснилось, что в процессе взаимодействия реликтового излучения с температурой 3°К с космическими лучами энергия последних уменьшается и, начиная с энергий $\sim 3 \cdot 10^{19}$ эв, происходит резкое обрезание энергетического спектра [15, 16], которое, по-видимому, не соответствует имеющимся предварительным экспериментальным данным [17]. Согласно [18] во Вселенной может существовать также инфракрасное излучение с температурой 8°К, что приведет к более раннему обрезанию энергетического спектра (при $\sim 10^{19}$ эв) и к еще большему расхождению с экспериментом. Поэтому представляется своевременным рассмотреть другие возможные модели происхождения космических лучей сверхвысоких энергий, в которых время распространения космических лучей предельно высоких энергий от источника до Земли было бы значительно меньше, чем это получается для космических лучей метагалактического происхождения.

Рассмотрим модель чисто Галактического происхождения космических лучей, в которой помимо стационарно генерируемого энергетического спектра Галактических космических лучей с интегральным показателем $\gamma = 1,7$ существует нестационарная компонента, произошедшая от взрыва ядра Галактики и имеющая около источника то же значение показателя интегрального энергетического спектра $\gamma = 1,7$ ¹⁾. Полагая, что коэффициент диффузии $D(E) = D_0 (E/E_{кр} z)^{\alpha}$ при $E > E_{кр} \cdot z$ и $D = D_0$ при $E < E_{кр} \cdot z$ ²⁾, имеем для концентрации стационарной

¹⁾ Вопрос о космических лучах нестационарного происхождения рассматривался в [19] в связи с проблемой высокоширотного обрезания энергетического спектра.

²⁾ $E_{кр}$ — энергия протонов, начиная с которой коэффициент диффузии зависит от E , z — заряд первичного ядра.

и нестационарной компонент соответственно :

$$N_{\text{ст}} = \frac{Q_{\text{ст}}(E)}{4\pi D(E)r} ; N_{\text{нест}} = \frac{Q_{\text{нест}}(E) e^{-r^2/4D(E)t}}{(4\pi \cdot D(E)t)^{\frac{3}{2}}} ; \quad \alpha = 1 .$$

Здесь $Q_{\text{ст}}$ — интенсивность стационарного источника, r — расстояние от центра Галактики до наблюдателя, $Q_{\text{нест}}$ количество частиц с энергией $(E, E + dE)$, испущенное нестационарным источником, t — время, прошедшее с момента взрыва. Полагая $t = 10^6$ лет = $3 \cdot 10^{13}$ сек, $r = 3 \cdot 10^{22}$ см и $D_0 = 10^{28}$ см²/сек получаем, что показатель экспоненты $r^2/4Dt \gg 1$ при $E \leq E_{\text{кр}}$ и убывает при возрастании E . В результате дифференциальный энергетический спектр $N_{\text{нест}}$ имеет максимум в области значений E , удовлетворяющих условию $r^2/4Dt \sim 1$ (Рис. 1)¹⁾.

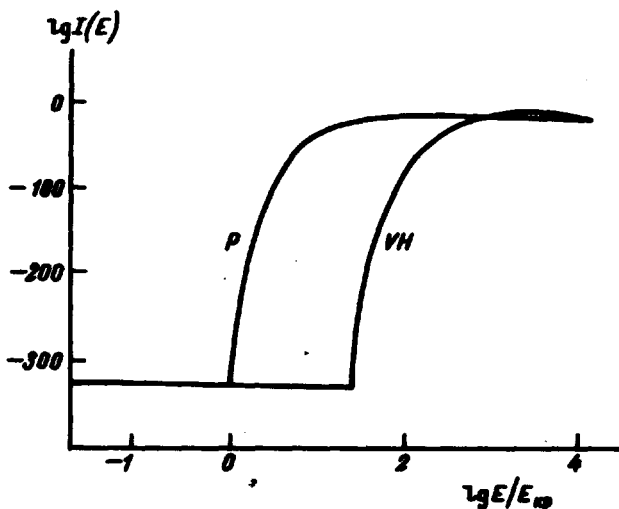


Рис. 1

На рис. 2 представлены парциальные интегральные спектры космических лучей стационарного и нестационарного происхождения, а также суммарный интегральный спектр. Распределения по x стационарной компоненты у Земли и нестационарной компоненты в источнике выбраны согласно [19]. Заштрихованная область на рис. 2, б соответствует экспериментальным значениям первичного спектра, получаемым различны-

¹⁾ При выбранных параметрах диффузионный пробег $\lambda = 3D/c = 10^{18} (E/E_{\text{кр}})$ см. Условие применимости диффузионного приближения $r \gg \lambda \gg \rho$, где $\rho = E/300H$. При $E_{\text{кр}} \sim 10^{15}$ эв и $H \sim 3 \cdot 10^6$ э это условие выполняется при любом E , учитывая (см. рис. 3), что в области больших E играют преимущественную роль ядра с большими x .

ми авторами [3, 6 - 11] из спектра по числу частиц. Точка при энергии $5 \cdot 10^{19}$ эв взята из работы [17]. Таким образом, рассмотренная модель объясняет двойное изменение формы первичного энергетического спектра и возможное существование космических лучей с энергией $\geq 3 \cdot 10^{19}$ эв

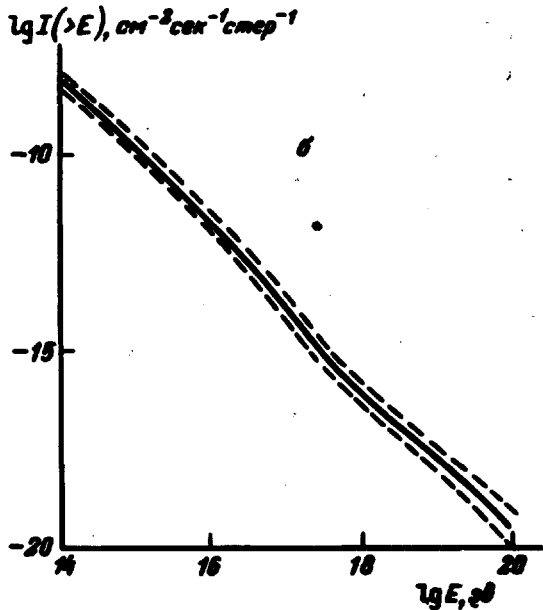
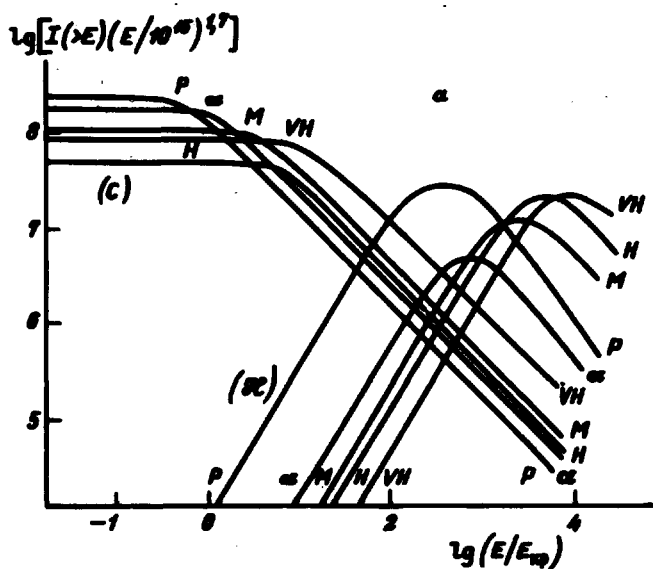


Рис. 2

Химический состав, полученный в рамках рассматриваемой модели (рис.3) не противоречит имеющимся в настоящее время весьма скудным экспериментальным сведениям о составе в области энергий $E = 10^{15} + 2 \cdot 10^{17}$ эв.

Экспериментальные данные при больших энергиях отсутствуют.

Т а б л и ц а 1

ядро	P	α	M	H	νH
состав у земли, %	38	28	15	7	12
состав в источниках, %	34	5	14	21	26
$Q_{\text{нест}} / Q_{\text{ст}} \cdot T$	2,8				21,7

В табл. 1 дан химический состав стационарной компоненты у Земли (в области энергий $E < E_{K1}$), химический состав в источниках стационарной и нестационарной компонент, а также отношение интенсивностей источников нестационарной и стационарной составляющих спектра протонов и тяжелых ядер. (Время жизни стационарной компоненты принималось равным $T = 3 \cdot 10^8$ лет). Используя полученное отношение интенсивностей источников нестационарной и стационарной составляющих спектра получим, что в среднем поток космических лучей из единицы объема диска в ~ 20 раз больше, чем из единицы объема гало.

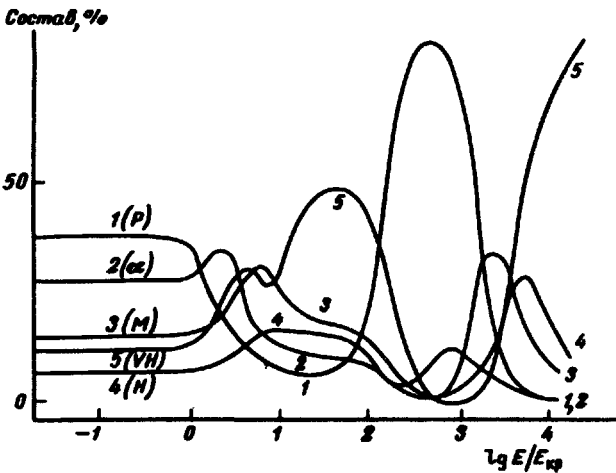


Рис.3

Этот результат находится в хорошем согласии с экспериментальными данными работ [20] и [21], в которых получено, что поток радиоизлучения и поток γ -лучей из единицы объема диска в десятки раз больше, чем из единицы объема гало.

Коэффициент анизотропии в рассматриваемой модели при тех энергиях, где превалирует нестационарная компонента, не зависит от коэф-

коэффициента диффузии и определяется временем, прошедшим с момента взрыва. Он равен $\delta = \frac{3}{2} \cdot \frac{r}{ct} = 5\%$, что не противоречит экспериментальным данным (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

$E, эв$	$10^{14}+10^{15}$	10^{16}	$5 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{17}$	10^{18}	10^{19}
$\delta, \%$	0,1 [24]	0,7 [10]	3,0 [10]	3,4 [23]	10 [11]	30 [11]

В табл. 2 приведены верхние границы амплитуд вариаций, которые определяются только по порядку величины. В области меньших энергий, где основную роль играет стационарная компонента, при выбранных параметрах модели коэффициент анизотропии $\delta \approx (0,01 \pm 1)\%$ и в пределах экспериментальных ошибок нет противоречия с данными табл. 2.

Научно-исследовательский институт

ядерной физики

Московского

государственного университета

Поступила в редакцию

29 июля 1969 г.

Литература

- [1] Г.В.Куликов, Г.Б.Христиансен. *Nuovo Cim. Suppl.*, 8, 742, 1958
- [2] S.Fukui, H.Hasegawa, T.Matano et al, *Progr. Theor. Phys. Suppl.*, 16, 1, 1960
- [3] С.Н.Вернов, Г.Б.Христиансен, В.Б.Атрашкевич и др. *J.Phys. Soc. Japan. Suppl. AIII*, 17, 118, 1962
С.Н.Вернов, Г.Б.Христиансен. *Proc. Int. Conf. on Cosmic Rays, Calgary, A345*, 1968
- [4] H.Allan. *Proc. Phys. Soc.*, 78, 1170, 1962
- [5] С.В.А.Мс Cusker. *Int. Conf. on Cosmic Rays. Jaipur*, 4, 35, 1963
- [6] H.Bradt, M. La Pointe, I.Clark et al. *Proc. Int. Conf. on Cosmic Rays, London*, 2, 715, 1965
- [7] Г.В.Куликов, Г.Б.Христиансен. *ЖЭТФ*, 35, 635, 1958
- [8] Г.В.Базилевская. *Дипломная работа МГУ* 1959
- [9] В.И.Соловьева. *Канд. Диссертация. ФИАН* 1964
- [10] I.Dllvaile, P.Kęndzioriski, K.Greisen, *I.Phys. Soc. Japan. Suppl.*, AIII, 17, 76, 1962

- [11] I.Linsley. Int. Conf. on Cosmic Rays, Jaipur, 4, 77, 1963
- [12] A.Watson. Report of Conf. on EAS, Lodz, 1968
- [13] Г.Б.Христиансен. Изв. АН СССР, 29, 1872, 1965.
- [14] Н.Н.Горюнов, Л.Г.Деденко, Г.Т.Зацепик. J.Phys. Soc. Japan, Suppl, AIII, 17, 103, 1963
- [15] K.Greisen. Phys. Rev. Lett., 16, 748, 1966
- [16] Г.Т.Зацепин, В.А.Кузьмин. Письма в ЖЭТФ, 4, 114, 1966
- [17] D.Andrews, A.Evans, R.Reid et al.Nature 219, 5152, 1968
- [18] K.Shivanandan, I.Hauk et al. Phys. Rev. Lett., 21, 1460 1968
- [19] А.Н.Чарахчян, Т.Н.Чарахчян. Геомагнетизм и аэрономия, 4, 643, 1964
- [20] В.Л.Гинзбург, С.И.Сыроватский. Происхождение космических лучей физматгиз, М., 1960
- [21] I.Baldwin, I.A.V. Symposium 31. Radio Astronomy and Galactic System. edited by H.Woerden, London, N-Y, p.342, 1967
- [22] G.Clark, G.Garmire, F.Kraushaar. Astron. Journ., 153, L 203, 1968
- [23] P.Blake, I.Hallows, H.Hunter et al. Canad. J.Phys., 46, part 2, 78, 1968
- [24] Н.Н.Ефимов, Д.Д.Красильников, С.И.Никольский, Ф.К.Шамсутдинова Canad.J.Phys., 46, part 2, 84, 1968
-