

УДК: 524.1:524.354.4

ПУЛЬСАРЫ И ВОЗМОЖНОЕ ЛОКАЛЬНОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Г. С. МАРТИРОСЯН

Поступила 15 октября 1987

Принята к печати 16 марта 1988

В предположении, что пульсары являются указателями места и времени взрывов сверхновых, которые в свою очередь являются источниками космических лучей, и на основе диффузионной модели распространения космических лучей в межзвездном пространстве, рассчитана плотность энергии космических лучей в околоземном пространстве. Анализ показал, что источники, вносящие основной вклад в наблюдаемую плотность энергии космических лучей, вокруг Солнечной системы распределены внутри радиуса $r = 0.9$ мпк.

1. Введение. В современных моделях происхождения космических лучей (КЛ) предполагается, что частицы могут ускоряться как при самом взрыве сверхновой, так и в оболочке сверхновой или в магнитосферах молодых пульсаров [1].

В настоящее время установлено, что пульсары рождаются вследствие взрывов сверхновых [2]. В данной работе предполагается, что пульсары являются указателями места и времени взрывов сверхновых, которые в свою очередь являются источниками космических лучей. Используя такое предположение и основываясь на диффузионной модели распространения частиц в турбулентных магнитных полях межзвездной среды, мы рассчитали плотность энергии космических лучей в околоземном пространстве от этих источников и определили область распределения тех источников, которые вносят основной вклад в наблюдаемую плотность энергии. В расчетах использованы известные пространственно-временные координаты 293 пульсаров [3].

В работе [4] на основе подобной модели была сделана попытка объяснить наблюдаемую плотность энергии и восстановить предысторию космических лучей, используя параметры известных в то время 12 пульсаров.

2. Модель расчета. Экспериментально установлено, что спектр космических лучей простирается до энергии $\sim 10^{20}$ эВ. Имеется ряд аргументов в пользу того, что вплоть до энергии $\sim 10^{15}$ эВ космические лучи имеют

галактическое происхождение. В околоземном пространстве плотность энергии галактических космических лучей составляет $w_{\text{эл}} \sim 10^{-12}$ эрг см⁻³ для частиц с энергией $E \geq 10^9$ эВ. в то время как для частиц с $E > 10^{15}$ эВ, $w_{\text{эл}} \sim 10^{-16}$ эрг см⁻³ [1]. Исходя из этого и учитывая, что в интервале 10^9 эВ $\leq E \leq 10^{15}$ эВ нет разких особенностей в энергетическом спектре, химическом составе и анизотропии, под галактическими космическими лучами будем подразумевать частицы с энергиями 10^9 эВ $\leq E \leq 10^{15}$ эВ, для которых диффузионная модель является хорошим приближением при описании движения космических лучей в межзвездной среде.

Далее будем предполагать, что источниками космических лучей являются сверхновые, при этом космические лучи могут ускоряться как непосредственно при взрыве сверхновой, так и в молодой оболочке сверхновой. Поскольку время жизни молодых оболочек сверхновых, в которых могут быть ускорены космические лучи, значительно меньше возраста сверхновых, представляющих интерес, то в этом случае ускорение космических лучей будем считать мгновенным. Возраст сверхновой определяется возрастом пульсара по данным о замедлении вращения пульсара. Если происходит мгновенный точечный взрыв сверхновой на расстоянии r от Земли и распространение образованных частиц в межзвездной среде подчиняется уравнению диффузии, то через время t наблюдаемая плотность энергии космических лучей от данного источника составит

$$W_i(r, t) = W_{\text{CH}} [4\pi D t_i]^{-3/2} \cdot \exp[-r_i^2/4Dt_i] \cdot \exp[-t_i/\tau_*], \quad (1)$$

где W_{CH} — общее энергосодержание во время взрыва в виде космических лучей, $D = 1/3\lambda v$ — коэффициент диффузии, λ — среднее расстояние между магнитными неоднородностями, $v \simeq c$ — скорость частиц, $\tau_* = 3d^2/2\lambda c$ — время жизни космических лучей относительно выхода из области захвата с линейным размером d . Полная плотность энергии от n источников будет $W = \sum_{i=1}^n W_i$. В выражении (1) пренебрегли

вкладом ядерных взаимодействий КЛ с межзвездным веществом, так как время жизни КЛ относительно ядерных взаимодействий существенно больше, чем τ_* .

Значения длины свободного пробега λ выбрали, следуя работам [1, 5, 6].

В работе [1], после детального обсуждения имеющихся экспериментальных данных, отмечается, что в галактическом диске коэффициент диффузии должен быть $\sim 10^{27}$ см² с⁻¹ ($\lambda \sim 3.2 \cdot 10^{-2}$ пк). В работе [5], предполагая, что сверхновые, как источники КЛ, имеют случайное пространственное распределение внутри галактического диска с частотой появле-

ния 10^{-2} год $^{-1}$ и используя диффузионную модель, рассчитаны плотность энергии, степень анизотропии и отношение L и M ядер КЛ. Из этих расчетов авторы сделали вывод, что λ — длина свободного пробега диффундирующих частиц должна меняться в пределах 10^{-2} пк $\leq \lambda \leq 10^{-1}$ пк.

Из экспериментально наблюдаемого содержания изотопа ^{10}Be в КЛ в работе [6] для τ_* в галактическом диске получено значение $\tau_* = 1.7 \cdot 10^7$ лет, что при $d = 500$ пк соответствует значению $\lambda \sim 7 \cdot 10^{-2}$ пк.

В данной работе расчеты проведены при следующих значениях параметров: $W_{\text{CH}} = 10^{51}$ эрг, $d = 500$ пк и $\lambda = 5 \cdot 10^{-2}$ пк. При этих значениях λ и d время удержания КЛ $\tau_* = 2.45 \cdot 10^7$ лет.

Для выявления источников с координатами (r, t) , которые в настоящей эпохе вносят основной вклад в наблюдаемую плотность энергии КЛ, было решено уравнение $\partial W(r, t)/\partial t = 0$. Для выражения (1) решение этого уравнения относительно t имеет вид:

$$T = 0.25 \tau_* (-3 + \sqrt{9 + 4r^2/\tau_* D}). \quad (2)$$

Выражение (2) при определенных значениях τ_* и D указывает время T , через которое плотность энергии КЛ от данного источника достигает максимума на расстоянии r .

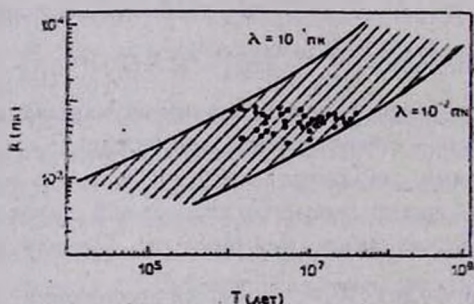


Рис. 1. Зависимость от расстояния времени T , через которое максимальная плотность энергии наблюдается на расстоянии r . Заштрихованная область соответствует интервалу 10^{-2} пк $< \lambda < 10^{-1}$ пк. Точками обозначены источники, вносящие основной вклад в плотность энергии КЛ в настоящей эпохе.

На рис. 1 заштрихованная область указывает $T = T(r)$ зависимость, соответствующую интервалу 10^{-2} пк $\leq \lambda \leq 10^{-1}$ пк.

3. Обсуждение результатов. Из вышеупомянутого числа сверхновых отбор тех источников КЛ, которые вносят существенный вклад в наблюдаемую плотность энергии в настоящей эпохе, проводился по двум критериям.

1. Рассматривались только те источники, для которых

$$W_{\max} \geq 10^{-15} \text{ эрг см}^{-3} = 0.1 \% \cdot w_{\text{вз}} (E \geq 10^9 \text{ эВ}) \text{ при } \lambda = 5 \cdot 10^{-2} \text{ пк.}$$

2. Из числа источников, удовлетворяющих первому условию, отбирались те, у которых время жизни t (время, прошедшее после момента взрыва сверхновой) удовлетворяло условию $T_1 \leq t \leq T_2$, где T_1 и T_2 вычисляются согласно выражению (2), соответственно для значений $\lambda = 10^{-1}$ пк и $\lambda = 10^{-2}$ пк при данном расстоянии источника r .

Расчеты показали, что из 293 сверхновых только параметры 39 сверхновых удовлетворяют вышеуказанным двум условиям. На рис. 1 точками обозначены пространственно-временные координаты этих 39 сверхновых. Как видно из рисунка, все источники по расстояниям распределены внутри полосы $0.2 \text{ кпк} \leq r \leq 0.9 \text{ кпк}$, а характеристический возраст этих источников составляет $\sim 1.04 \cdot 10^7$ лет. Расчетная суммарная плотность энергии КЛ от этих сверхновых около Земли составляет $\sim 6.6 \cdot 10^{-13} \text{ эрг см}^{-3} = 0.4 \text{ эВ см}^{-3}$. Экспериментально наблюдаемая плотность энергии КЛ около Земли $\sim 0.5 \text{ эВ см}^{-3}$.

В табл. 1 приведены параметры 39 пульсаров, определяющих координаты и время взрыва этих сверхновых, а также значения $W_{\max}$ при $\lambda = 5 \cdot 10^{-2}$ пк.

На рис. 2 приведены проекции 58 источников на плоскость Галактики, для которых $W_{\max} \geq 10^{-15} \text{ эрг см}^{-3}$. Точками обозначены координаты вышеупомянутых 39 источников. Кружками отмечены координаты 19 источников, из которых $W_{\max}$ для 10 источников около Земли наблюдалось в прошлом, а для 9 — в будущем. Например, от известной сверхновой в Парусах (PSR 0833—45; $r = 0.5 \text{ кпк}$, $t = 1.12 \cdot 10^4$ лет) максимальный поток ($W_{\max} = 3.5 \cdot 10^{-14} \text{ эрг см}^{-3}$) КЛ достигнет Земли через $T = 6.88 \cdot 10^6$ лет. В связи с этим интересно отметить, что $1.74 \cdot 10^8$ лет и $3.09 \cdot 10^7$ лет назад плотность энергии КЛ около Земли должна была увеличиться соответственно в 5 и 6 раз вследствие взрывов сверхновых, порождающих пульсары PSR 0950+08 и PSR 1929+10. Такое увеличение плотности энергии КЛ могло бы привести к биологическим последствиям, обсужденным в работе [7].

Как видно из рис. 2, все 39 источников вокруг Солнечной системы распределены изотропно, следствием чего может быть наблюдаема низкая анизотропия КЛ при энергиях $E \leq 10^{15} \text{ эВ}$. Из приведенных результатов расчета следует, что если диффузное приближение достаточно верно описывает движение КЛ в межзвездном пространстве, то наблюдаемые КЛ имеют локальное происхождение. При этом можно сделать следующие конкретные выводы:

Таблица 1

ПУЛЬСАРЫ, ВНОСЯЩИЕ ОСНОВНОЙ
ВКЛАД В НАБЛЮДАЕМУЮ
ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ

№	PSR	$W_{\max}/10^{-14}$ [эрг см ⁻³]
1	0105+65	0.18
2	0149-16	2.29
3	0203-40	1.82
4	0301+19	0.97
5	0403-76	0.25
6	0450+55	2.12
7	0538-75	0.55
8	0656+14	3.17
9	0823+26	0.39
10	0834+06	2.48
11	0844-35	0.71
12	0853-33	0.85
13	0905-51	0.17
14	0906-17	1.36
15	0640+16	0.31
16	0943+10	0.97
17	1112+50	6.64
18	1237+25	5.99
19	1508+55	0.35
20	1530+27	1.57
21	1530-53	0.55
22	1540-06	0.52
23	1601-52	0.24
24	1612+07	0.24
25	1702-18	0.33
26	1706-16	0.22
27	1747-46	0.52
28	1845-19	1.19
29	1919+21	5.99
30	1946-25	0.16
31	2021+51	0.45
32	2045-16	3.77
33	2048-72	0.58
34	2151-56	1.46
35	2152-31	0.75
36	2315+21	0.39
37	2321-61	0.85
38	2323+63	1.19
39	2327-20	9.16

1. Основной вклад в наблюдаемую плотность энергии КЛ вносят источники, распределенные в области с радиусом $r \leq 0.9$ кпк вокруг Солнечной системы.

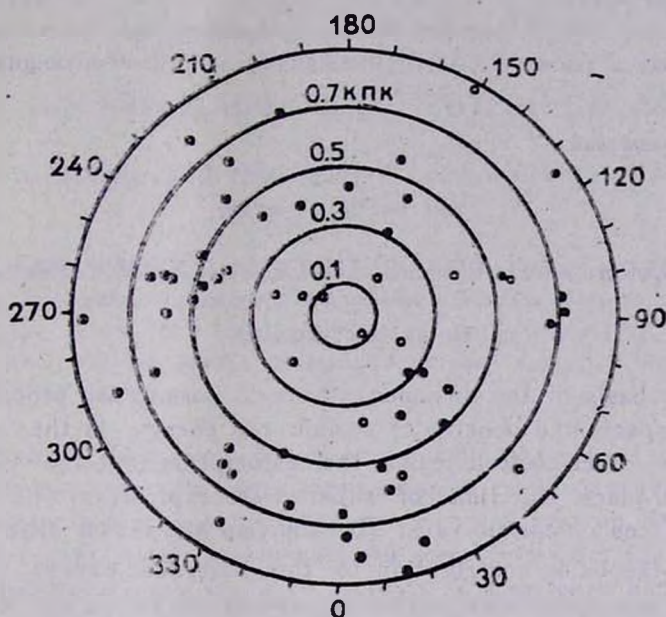


Рис. 2. Проекция на галактическую плоскость источников с $W_{\max} > 10^{-15}$ эрг см⁻³. Точками обозначены источники, вносящие основной вклад в плотность энергии КЛ в настоящей эпохе.

2. Время удержания КЛ в этой области составляет $\sim 2.45 \cdot 10^7$ лет.

3. Для обеспечения наблюдаемой плотности энергии КЛ $W_{\text{кк}} \sim 10^{-12}$ эрг см⁻³ достаточно, чтобы светимость источников в КЛ была $L_{\text{кк}} \sim 10^{38}$ эрг с⁻¹ что на $2 \div 3$ порядка ниже, чем требуемая светимость источников при галактической модели происхождения КЛ.

Из других предположений к такому выводу пришли также авторы ряда работ. Например, в работе [8], исходя из соображений, связанных со временем жизни КЛ, L/M отношения, низкой анизотропии и спектра электронов высоких энергий, автор пришел к выводу, что низкоэнергичные ($R \leq 10$ ГэВ с⁻¹) частицы, диффундируя, могут дойти до Земли от близких источников ($r \leq 100 \div 300$ пк), а частицы высоких энергий ($R > 10^6$ ГэВ с⁻¹) — от источников с расстояниями $r \leq 1 \div 10$ кпк. В работе [9], основываясь на наблюдательных данных, связанных с 44 ОВ звездами внутри Пояса Гульда, являющегося также мощным источником

γ-излучения, авторы приходят к выводу, что наблюдаемые около Земли КЛ имеют локальный характер (сфера с радиусом ~ 1 кпк, время удержания $\sim 2 \cdot 10^7$ лет).

Автор искренне благодарен Ф. А. Агароняну за ценные замечания и обсуждения, а также Э. А. Мамиджанияну за стимулирующий интерес к работе.

Ереванский физический
институт

THE PULSARS AND POSSIBLE LOCAL COSMIC RAY ORIGIN

H. M. MARTIROSIAN

On the basis of the diffusion model of cosmic ray propagation in interstellar space, the density of cosmic ray energy in the circumterrestrial space is calculated under the assumption that the pulsars are indicators of place and time of supernovae explosions which in their turn are sources of cosmic rays. The analysis has shown that the sources making the basic contribution to the observed energy density of cosmic rays are distributed within the radius of $r=0.9$ kpc around the Solar system.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астрофизика космических лучей, под ред. В. Л. Гинзбурга, Наука, М., 1984.
2. Pulsars: Int. Astr. Union Simp., No. 95, Eds. W. Sieber, R. Wielebinski, Dordrecht a. o. Reidel, 1981.
3. R. N. Manchester, J. H. Taylor, Astron. J., 86, 1953, 1981.
4. R. E. Lingenfelter, Nature, 224, 1182, 1969.
5. R. Ramaty, D. V. Reames, R. E. Lingenfelter, Phys. Rev. Lett., 24, 913, 1970.
6. M. Garcia-Munoz, G. M. Mason, J. A. Simpson, Astrophys. J., 217, 859, 1977.
7. В. И. Красовский, Н. С. Шкловский, Докл. АН СССР, 116, 197, 1957.
8. R. E. Streitmatter, V. K. Balasubrahmanyam, J. F. Ormes, 18-th ICRC, Bangalore, OG 5, 1—9, 183, 1983.
9. M. Casse, J. A. Paul, Astrophys. J., 237, 236, 1980.