

Лагутин А. А., Нижулин Ю. А., Райкин Р. И.

Флуктуации космических лучей от близких галактических источников

В модели случайно распределенных галактических источников исследуются флуктуации космических лучей, обусловленные близкими источниками. Показано, что при диффузионном характере распространения космических лучей в Галактике распределение по числу частиц от источника, вносящего наибольший вклад в наблюдаемое число частиц, описывается устойчивым законом с показателем $\alpha \approx 1,1$. Области наиболее вероятного положения источников, вносящих наибольший вклад в концентрацию космических лучей в точке наблюдения, полученные в рамках указанной модели, не противоречат имеющимся экспериментальным данным по ближайшим источникам. Обсуждается чувствительность полученных результатов к изменению коэффициента диффузии и времени удержания частиц в Галактике.

Введение

В настоящее время принято считать, что наиболее вероятными источниками космических лучей с энергией $E < 10^{17}$ в Галактике являются вспышки сверхновых [1].

Получение информации о пространственно-временном распределении источников $S(t, \mathbf{r})$ традиционно осуществляется путем сопоставления экспериментальных данных о характеристиках космических лучей с результатами расчетов, полученных при разных предположениях относительно $S(t, \mathbf{r})$.

Зависимость теоретических результатов от распределения источников $S(t, \mathbf{r})$ и очевидная невозможность их полного определения, особенно в ситуации, когда наблюдаемые космические лучи произошли от невидимых сегодня («мертвых») источников, приводит к необходимости использовать статистический подход для предсказания ожидаемых характеристик космических лучей [1–5].

В наших предыдущих работах [3–5] мы исследовали поведение флуктуаций и анизотропии космических лучей в Галактике в модели со случайно распределенными дискретными источниками. Было показано, что при диффузионном характере распространения космических лучей в Галактике распределения по числу частиц и току описываются устойчивыми законами с показателями $5/3$ и $5/4$, соответственно. В настоящей статье мы продолжаем исследования характеристик космических лучей в модели со случайно распределенными источниками. Целью данной работы является изучение распределения по числу частиц от источников, вносящих наибольший вклад в наблюдаемое число частиц, нахождение наиболее вероятного положения этих ис-

точников.

1. Модель источников

Будем считать, что космические лучи генерируются в случайные моменты времени точечными источниками, случайно распределенными в объеме V_R Галактики. Конечную область объемом $V_R \times T$ в четырехмерном пространстве-времени $R^3 \times R^1$ будем обозначать U . Источник, расположенный в точке \mathbf{r}_i , в момент времени t_i испускает N_i частиц. Для простоты будем считать, что все источники имеют одинаковую мощность, т. е. $N_i = N_0$. Распространение частиц в межзвездной среде удобно описывать функцией Грина $G(t, \mathbf{r}; t_i, \mathbf{r}_i)$, которая показывает вклад в число частиц в точке наблюдения $y = (t, \mathbf{r})$ от частицы, рожденной в источнике с координатами $x_i = (t_i, \mathbf{r}_i)$. Полная концентрация частиц в точке наблюдения $N_R(t, \mathbf{r})$, создаваемая излучением всех источников из объема V_R , дается выражением

$$N_R(t, \mathbf{r}) = \sum_i N_i = N_0 \sum_i G(t, \mathbf{r}; t_i, \mathbf{r}_i). \quad (1)$$

Сделаем следующие предположения относительно введенной системы источников:

1. система источников является пуассоновским ансамблем [6], т. е. обладает следующими свойствами:
 - 1.1. числа источников n_1 и n_2 , попавших соответственно в области U_1 и U_2 , являются независимыми случайными величинами;
 - 1.2. вероятность $P(n = k)$ при любом $k > 0$ зависит от k и объема u области U , но не зависит от ее формы;

1.3. при малых значениях объема u

$$P(n = 1) = qu + o(u),$$

$$P(n > 2) = o(u),$$

где q — постоянная величина, имеющая смысл средней плотности источников в области U .

При выполнении указанных свойств, распределение величины n подчинено закону Пуассона с параметром $\lambda = qu$:

$$P(n = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!};$$

1.4. распределение положения источника в области U — равномерное, т. е. плотность распределения $\Psi = 1/u$;

2. для любой области U конечного объема число источников n , попавших в U , и их положения x_1, x_2, \dots являются независимыми случайными величинами.

Нами рассматривались случаи распределения источников в тонком диске, диске конечной толщины и сферической области.

2. Распространение космических лучей в Галактике

Будем предполагать, что флуктуации в прохождении частиц от источника до точки наблюдения отсутствуют. Концентрация космических лучей в данной точке (\mathbf{r}, t) будет случайной величиной вследствие случайного характера источников. Перенос космических лучей в межзвездной среде будем рассматривать в рамках феноменологической модели, в которой распространение и выход частиц из системы описываются двумя независимыми параметрами: коэффициентом диффузии D и временем удержания частиц в системе Γ^{-1} . В силу того, что в настоящее время влияние конвекционных и коллективных эффектов на время пребывания частиц в Галактике еще детально не исследовано, мы предполагаем, что выход частиц из системы обусловлен как диффузией, так и другими процессами. Используемое нами уравнение переноса имеет вид [1]

$$\frac{\partial N}{\partial t} - D\Delta N + \Gamma N = N_0 \sum_i \delta(t - t_i) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i). \quad (2)$$

Соответствующее (2) уравнение для функции Грина есть

$$\frac{\partial G(t, \mathbf{r}; t', \mathbf{r}')}{\partial t} - D\Delta G(t, \mathbf{r}; t', \mathbf{r}') + \Gamma G(t, \mathbf{r}; t', \mathbf{r}') =$$

$$= \delta(t - t_i) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i),$$

решение которого можно записать в виде

$$G(t, \mathbf{r}; t', \mathbf{r}') = \frac{\Theta(t - t')}{[4\pi D(t - t')]^{3/2}} \times \exp\left(-\Gamma(t - t') - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2}{4D(t - t')}\right), \quad (3)$$

где

$$\Theta(t) = \begin{cases} 1, & t > 0, \\ 0, & t < 0. \end{cases}$$

3. Метод расчета

Ансамбли источников моделировались методом Монте Карло при различных характеристиках Галактики: коэффициенте диффузии, времени удержания космических лучей, области нахождения источников. Используя (1) и (3) считались распределения по числу частиц в точке наблюдения, соответствующие конкретным значениям этих характеристик. После этого находились параметры полученных распределений. Поскольку указанные распределения должны принадлежать к классу устойчивых законов [5], для восстановления параметров распределения⁵ использовался алгоритм из [6] (см. также [8]).

В случае нашей модели, когда распространение космических лучей описывается уравнением (2), «ближайшим» будем называть источник, дающий в данной случайной реализации ансамбля источников в Галактике максимальный вклад в концентрацию космических лучей в точке наблюдения. При этом «ближайший» источник определяется совокупностью пространственной и временной координат. Кроме того, из всего множества источников в рассматриваемой реализации выделялись n «ближайших» источников, вносящих n первых по величине вкладов в изучаемые величины. Параметры распределений исследуемых величин от «ближайших» источников также оценивались с помощью указанного выше алгоритма. Для тестирования комплекса программ, реализующего описанный метод, были проведены расчеты распределений в случае, имеющем аналитическое решение [5].

⁵Для описания распределений из класса устойчивых законов используются четыре параметра: α — показатель устойчивого закона, β — параметр асимметрии, γ — параметр сдвига, λ — масштабный параметр

Сопоставление показало, что параметры распределений, получаемых при моделировании, восстанавливаются с хорошей точностью (погрешность не превышает 10%).

4. Распределение по числу частиц от «ближайшего» источника

В наших предыдущих работах [3–5] мы показали, что у распределения по числу частиц отсутствуют моменты порядка выше первого, поэтому для оценок флуктуаций необходимо знать точный вид распределения по числу частиц. Используя описанный выше метод, нами были получены распределения по числу частиц от источника, вносящего наибольший вклад в концентрацию космических лучей в точке наблюдения. Данное распределение принадлежит к классу устойчивых законов с параметром $\alpha \sim 1,1$. Отметим, что этот показатель значительно отличается от показателя распределения по числу частиц от всех источников в Галактике, который равен $5/3$. Наши оценки показывают, что вклад «ближайшего» источника во флуктуации числа частиц от всех источников составляет $\sim 30\%$.

5. Наиболее вероятное положение источника, вносящего наибольший вклад в концентрацию космических лучей в точке наблюдения

На рисунке 1 показан вклад в число частиц в точке наблюдения от источника, находящегося в точке с координатами (r, t) в Галактике, а также нанесены контуры областей, в которых с большей вероятностью должны оказаться источники, вносящие наибольшие относительные вклады в наблюдаемую у Земли концентрацию космических лучей. На рисунке 2 показаны координаты источников, дающих три первых по величине вклада в концентрацию космических лучей. Здесь же нанесены области, показывающие наиболее вероятное положение источников, вносящих первые три по величине вклада в наблюдаемое число частиц. На рис. 3 на полученные в результате моделирования области положения источников, наложены известные сегодня ближайшие объекты нашей Галактики по данным [1,9]. Из рисунка видно, что полученные нами области нахождения источников, вносящих различные вклады в наблюдаемую концентрацию космических лучей хорошо согласуются с координатами известных источников в нашей Галактике.

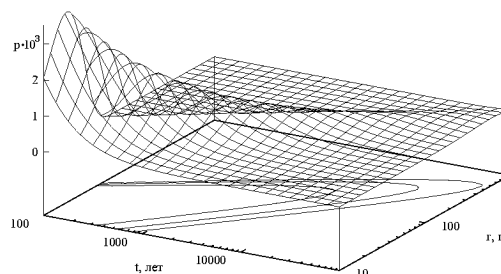


Рис. 1. Плотность вероятности того, что зарегистрированная частица испущена источником с координатами (r, t) . $D = 5 \cdot 10^{28} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, $\Gamma^{-1} = 10^8 \text{ лет}$

Относительные вклады близких источников обсуждаются, например, в [1,9]. Вопрос о вкладе источников Monogen и Geminga в этих работах не решен, однако согласно нашим расчетам они могут давать второй и третий вклады в наблюдаемое число частиц. Более того, предположение об одинаковой мощности источников не приводит к противоречию с экспериментальными данными.

6. Чувствительность результатов к параметрам модели

Исследуем теперь чувствительность полученных нами результатов к параметрам используемой модели: коэффициенту диффузии, времени удержания космических лучей в Галактике, области, в которой могут находиться источники.

Чувствительность параметра α устойчивого распределения

Из способа получения распределения, в случае, допускающим аналитическое решение, следует, что параметр α получаемого устойчивого закона не должен зависеть от коэффициента диффузии. Численные расчеты подтверждают это утверждение. Зависимость α от времени удержания частиц в Галактике не удается исследовать аналитически. Расчеты показали, что уменьшение величины Γ^{-1} от 10^8 до 10^7 лет не приводит к заметному изменению в показателе α . Дальнейшее уменьшение величины Γ^{-1} приводит к уменьшению показателя α получающегося устойчивого закона (см. табл. 1). Изменение

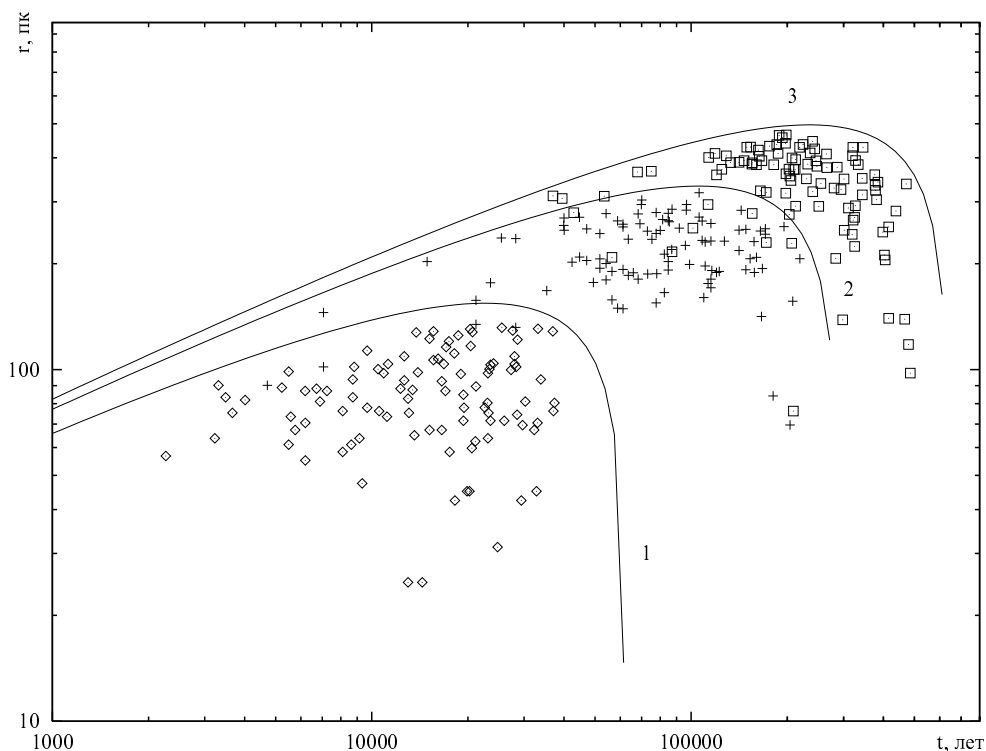


Рис. 2. Положения источников, дающих первый (\diamond), второй (+) и третий (\square) по величине вклады в концентрацию космических лучей в точке наблюдения. $D = 5 \cdot 10^{28} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, $\Gamma^{-1} = 10^8 \text{ лет}$

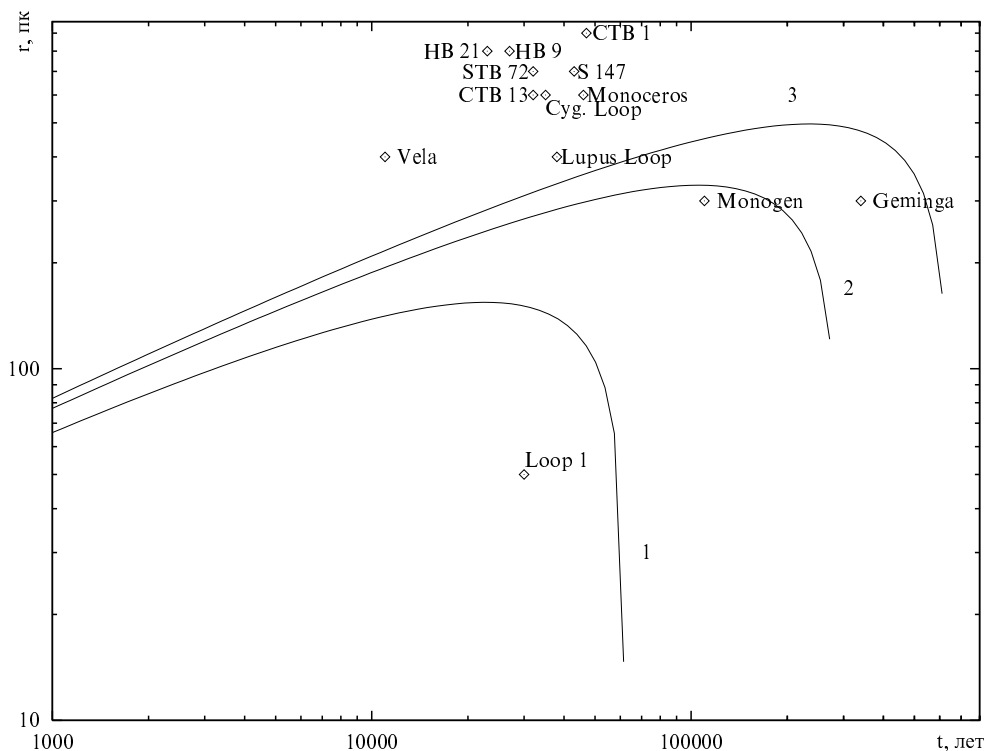


Рис. 3. Области нахождения источников, дающих первый (1), второй (2) и третий (3) по величине вклады в концентрацию космических лучей в точке наблюдения и известные сегодня ближайшие источники космических лучей [1,9]. $D = 5 \cdot 10^{28} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, $\Gamma^{-1} = 10^8 \text{ лет}$

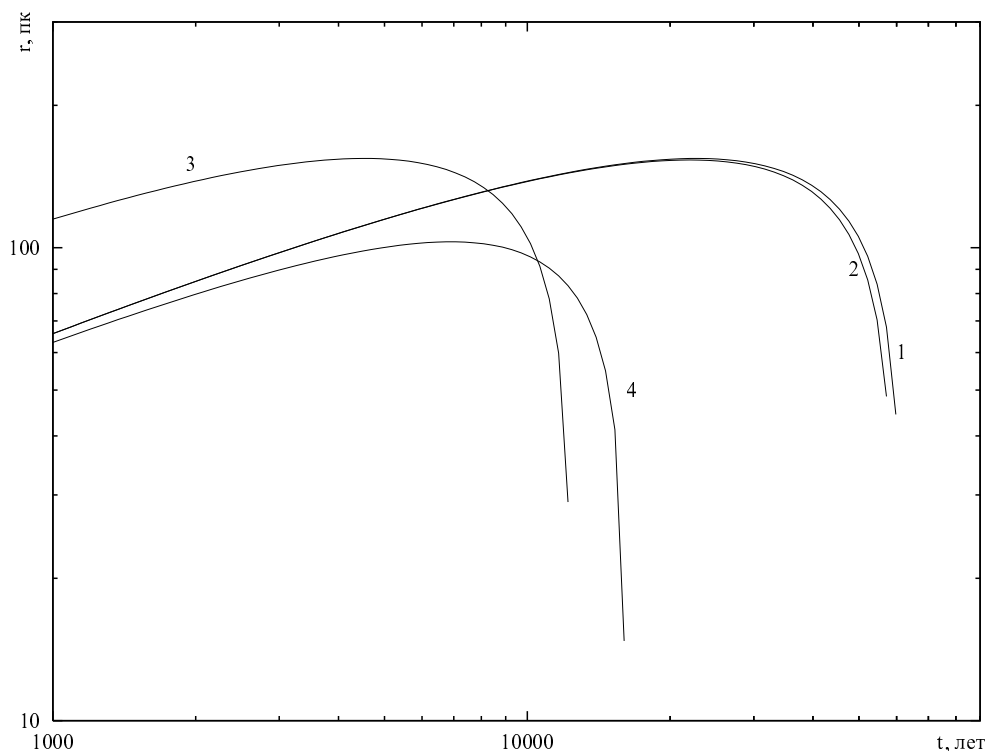


Рис. 4. Влияние параметров модели на положение «ближайшего» источника. 1 — $D = 5 \cdot 10^{28} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$, $\Gamma^{-1} = 10^8 \text{ лет}$; 2 — $D = 5 \cdot 10^{28} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$; $\Gamma^{-1} = 10^6 \text{ лет}$; 3 — $D = 2,5 \cdot 10^{29} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$, $\Gamma^{-1} = 10^8 \text{ лет}$; 4 — источники находятся в тонком диске, $D = 5 \cdot 10^{28} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$, $\Gamma^{-1} = 10^8 \text{ лет}$

Таблица 1

Зависимость параметра α от времени удержания частиц в Галактике

Γ^{-1} , лет	α
$1 \cdot 10^8$	1,56
$3 \cdot 10^7$	1,55
$1 \cdot 10^7$	1,53
$3 \cdot 10^6$	1,47
$1 \cdot 10^6$	1,32

геометрии области, в которой располагаются источники космических лучей, вызывает уменьшение α со значения $5/3$ для случая распределения источников в сферической области до $\sim 4/3$ для случая распределения источников в тонком диске.

Чувствительность положения ближайшего источника к параметрам модели

Для выяснения вопроса о чувствительности к параметрам модели области наиболее вероятного положения источника, вносящего наибольший вклад в концентрацию космических лучей в точке наблюдения, были проведены расчеты при разных значениях коэффициента диффузии и времени удержания космических лучей в Га-

лактике, а также рассмотрены разные геометрии областей, в которых могут располагаться источники. Результаты некоторых расчетов представлены на рис. 4. Отметим, что изменение времени удержания частиц в Галактике очень слабо влияет на положение «ближайшего» источника, а изменение коэффициента диффузии приводит к соответствующему сдвигу временной координаты «ближайшего» источника и не оказывает влияние на его возможное положение в пространстве. Из рисунка видно, что изменение параметров модели в разумных пределах не приводит к противоречию с имеющимися экспериментальными данными по ближайшим источникам.

Выводы

В работе рассматривается проблема расчета флуктуаций космических лучей от ближайшего источника в модели случайно распределенных дискретных источников в Галактике. Анализируется распределения по числу частиц от различных источников в ансамбле, обсуждаются области, в которых должны находиться источники, вносящие главные вклады в концент-

рацию космических лучей в точке наблюдения в принятой модели. В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Распределение по числу частиц от источника, вносящего наибольший вклад в концентрацию космических лучей в точке наблюдения описывается устойчивым законом с показателем $\alpha = 1,1$. Оценки показали, что вклад «ближайшего» источника во флуктуации числа частиц составляет $\sim 30\%$.
2. Найдены области наиболее вероятного положения источников, дающих различные относительные вклады в наблюдаемую концентрацию космических лучей.
3. Сопоставление полученных областей с известными источниками в Галактике показало, что теоретические оценки в модели равномерно распределенных дискретных источников не противоречат экспериментальным данным.
4. Полученные результаты достаточно слабо зависят от времени удержания космических лучей в Галактике, изменение коэффициента диффузии приводит к соответствующему сдвигу источников по времени, не оказывая влияния на расстояние.

Литература

1. Березинский В. С., Буланов С. В., Гинзбург В. Л. и др. Астрофизика космических лучей. М.: Наука, 1990, 528 с.
2. Lee M. A. // *Astrophys. J.*, 1979, v.229, p.424.
3. Лагутин А. А., Никулин Ю. А. Флуктуации космических лучей в Галактике. Препринт АГУ № 93-2, Барнаул, 1993.
4. Lagutin A. A., Nikulin Yu. A. // *Proc. 24 ICRC*, 1995, v. 3, p.329.
5. Лагутин А. А., Никулин Ю. А. // *ЖЭТФ*, 1995, т.108, с. 1505.
6. Золотарев В. М. Одномерные устойчивые распределения. М.: Наука, 1983, 304 с.
7. Кендалл М., Моран П. Геометрические вероятности. М.: Наука, 1972, 192 с.
8. Дудкин Г. Н., Гончаров А. И., Лагутин А. А. и др., / В сборнике «Проблемы устойчивости стохастических моделей», М.: 1989, с. 42.
9. Nishimura J., Fujii M., Taira T. // *16 ICRC*, 1979, v.1, p.488.