

Изучение взаимного расположения магнитных линий двухкомпонентного случайного магнитного поля

А.И. Перятинская^{1,*}, В.О. Юровский^{1,†}, И.А. Кудряшов^{2,‡}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 01.06.2023; подписана в печать 21.10.2023)

Галактические космические лучи играют важную роль в физике космоса. Несмотря на многочисленные исследования в области магнитных полей Галактики, понимание структуры магнитных линий остается недостаточным для предсказания траекторий высокоэнергичных космических частиц в различных конфигурациях галактических магнитных полей. В этой работе магнитное поле исследуется численно, путем построения его двухкомпонентной модели и дальнейшего ее качественного и статистического анализа. На качественном уровне представлены результаты моделирования случайного изотропного поля, где магнитные линии расположены близко друг к другу. В таком случае наблюдается регулярная структура. Показано, что при моделировании изотропного случайного поля наблюдается диффузионный режим движения. При добавлении регулярной компоненты определенной интенсивности продольный режим транспорта становится баллистическим.

PACS: 13.85.Tr

УДК: 524.1-65

Ключевые слова: галактические космические лучи, магнитные поля галактики, диффузия.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач исследований является выявление влияния соотношения случайных и регулярных компонент магнитного поля на его структуру, которая определяет траектории и динамику заряженных частиц. Поэтому исследование структуры галактического магнитного поля необходимо для построения теории транспорта частиц.

Транспорт галактических космических лучей в энергетическом диапазоне от ГэВ до ТэВ имеет характер составной диффузии: диффузии магнитных линий в пространстве с наложением одномерной диффузии самих частиц вдоль магнитных линий [1].

При прямом моделировании вычислительная сложность решения задач транспорта частиц очень быстро растет с уменьшением энергии [2]. Поэтому, для построения полноценной картины транспорта важно рассмотреть асимптотический случай, когда энергии частиц настолько малы, что можно пренебречь их винтовым движением вокруг магнитных линий поля. Тогда поведение частиц будет определяться только структурой магнитных линий. Такая асимптотика позволяет увеличить диапазон энергий, предсказываемой моделью транспорта галактических космических лучей.

Целью работы является изучение свойств двухкомпонентного галактического магнитного поля на масштабах галактических рукавов, в частности оценка

транспортных коэффициентов в зависимости от конфигурации магнитного поля.

В данной работе представлены результаты численного моделирования взаимного расположения магнитных линий в двухкомпонентных случайных магнитных полях. Так же обсуждается влияние разных конфигураций поля на структуру магнитных линий.

1. ТЕОРИЯ

1.1. Модель поля

В рамках исследования транспорта заряженных частиц в магнитном поле галактики изучается поведение магнитных линий в модели случайных изотропных и двухкомпонентных полей [3].

Совокупность наблюдений показывает, что в Галактике имеется крупномасштабное магнитное поле, ориентированное вдоль спиральных рукавов, называемое регулярным [1]. На это поле накладываются неоднородности различных масштабов, из которых складывается турбулентная компонента. То есть в рассматриваемом диапазоне масштабов поле галактики можно описать как сумму направленного регулярного поля и турбулентного изотропного случайного поля:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mathbf{B}_{mean}(\mathbf{r}) + \mathbf{B}_{rand}(\mathbf{r}).$$

Для описания поля турбулентной компоненты используется колмогоровская модель спектральной плотности турбулентности. Поскольку турбулентная компонента должна быть изотропной, при моделировании

* szsalexvay@gmail.com

† yrovskyvladimir@gmail.com

‡ ilya.kudryashov.85@gmail.com

рассматривается инерционный интервал. В данной постановке задачи картина статическая и размер вихря лежит в диапазоне от внутреннего масштаба турбулентности $l_0 = 100$ а. е. до внешнего $L_0 = 100$ пк.

Исследуемая модель является микроскопической. Поэтому регулярную компоненту магнитного поля считаем линейной без потери общности. Относительная и абсолютная интенсивность этой компоненты поля различна и зависит от исследуемой области галактики. Интенсивность турбулентной и регулярной компонент можно получить с помощью моделирования отдельных компонентов тороидального, полоидального и гауссовского случайных полей [4].

Общий вид уравнения магнитной линии имеет вид:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(\mathbf{r}),$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор. Введем смещение магнитной линии L . Началом магнитной линии назовем точку отсчета при $L = 0$. Траекторию движения магнитной линии задаем как решение следующего уравнения для описанной безмассовой частицы:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dL} = \frac{\mathbf{V}}{B}.$$

1.2. Диффузия

Стохастическая структура магнитных полей в галактике должна приводить к значительному рассеянию заряженных частиц в результате их взаимодействия с неоднородностями магнитного поля. При этом конфигурация магнитных линий непрерывно меняется в пространстве, что делает траектории движения частиц случайными, а характер их распространения диффузионным.

Транспортный коэффициент диффузии D влияет на режим движения магнитной линии. Компоненты транспортного коэффициента рассчитывается следующим образом:

$$D_{ij}|_L = \frac{q_i(L)q_j(L)}{L}, \quad (1)$$

где $q_i = \{x_i, y_i, z_i\}$, $i, j = \overline{1,3}$.

В зависимости от соотношения между характерными пробегами, режим движения может быть баллистическим или диффузионным. Когда компоненты D перестают зависеть от пробега L , режим движения становится диффузионным. При выделении направления диффузии удобно диагонализировать тензор D . Тогда при расчетах останутся только диагональные коэффициенты, которые будут усреднены по количеству мод поля (см. раздел 1.3). Выражение (1) примет вид:

$$D_{ii}|_L = \frac{\sum_j^N D_{ii}|_{L_j \in [L, L+dl]}}{N}.$$

1.3. Моделирование

Случайное поле представляется в виде суммы конечного числа N мод, синтезированных случайным образом. Такой подход позволяет приближенно описывать стохастическое поле с помощью ограниченного числа компонент, что упрощает моделирование [5]. Формула для данного представления поля записывается следующим образом: $\mathbf{V}_{rand}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N A_i \mathbf{p}_i \cos(\mathbf{k}_i \mathbf{r} + \varphi_i)$, где $\mathbf{V}_{rand}(\mathbf{r})$ — случайное поле в точке \mathbf{r} , A_i — амплитуда гармоники, \mathbf{k}_i — волновой вектор гармоники, \mathbf{p}_i — вектор поляризации (определяет ориентацию и направление колебаний поля для каждой гармоники), φ_i — начальная фаза гармоники. Амплитуда и фазовые зависимости определяют интенсивность и пространственную вариацию поля.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

2.1. Построение изотропного поля и определение транспортного коэффициента

В результате моделирования была получена одна из конфигураций случайного изотропного магнитного поля, линии которого изображены на рис. 1. Магнитные линии начинают строиться в случайных точках куба с длиной ребра 2000 пк, что заведомо больше характерного масштаба турбулентности (см. разд. 1.1).

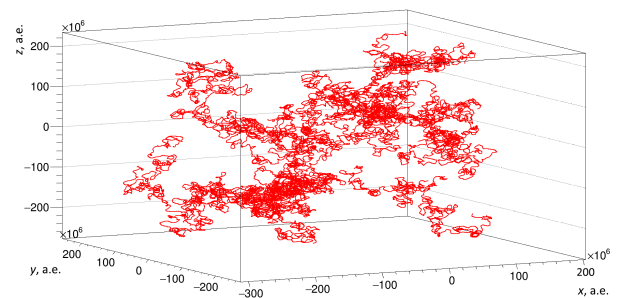


Рис. 1. Магнитные линии случайного магнитного поля с параметрами моделирования: $dL = 10$ а. е., $N = 500$, $L = 1000$ пк

На рис. 2 представлена зависимость транспортного коэффициента $D_r = D_x + D_y + D_z$ от пробега L для различных параметров моделирования: шага интегрирования dL и количества мод N . Близость получаемых результатов свидетельствует об устойчивости модели. На пробегах, больших $L \sim 10^7$ а. е., режим движения магнитных линий переходит из баллистического в диффузионный, где транспортный коэффициент перестает зависеть от пробега, и его значение составляет $D_r \approx 8 \times 10^7$ а. е.

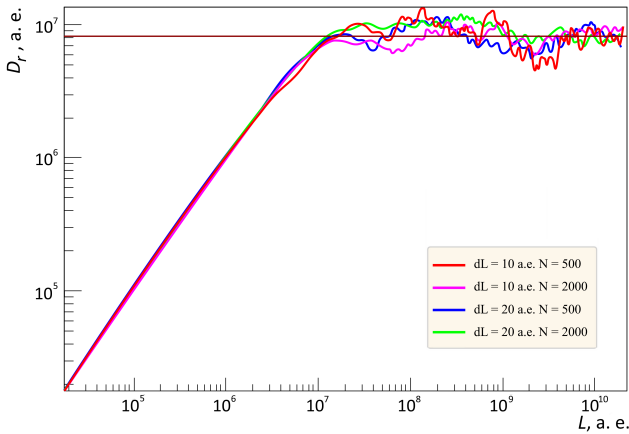


Рис. 2. Транспортный коэффициент изотропного случайного поля

2.2. Образование магнитных трубок в случайном изотропном поле

На рис. 3 изображены магнитные линии случайно изотропного поля. Генерация линий поля запущена так, что начальные точки этих линий отстают друг от друга на величину 1 пк. Рассматриваемое геометрическое место стартовых точек магнитных линий образует крест с центром в начале координат и размером 20 пк.

Магнитные линии, расположенные близко друг к другу, образуют регулярную структуру, которую называют магнитной трубкой (рис. 3). В таких структурах магнитные линии коррелированы между собой на больших пробегах. Текущий разброс стартовых точек взят для качественного представления механизма разрушения магнитной трубки. В дальнейшем будет получена количественная оценка размеров трубки.

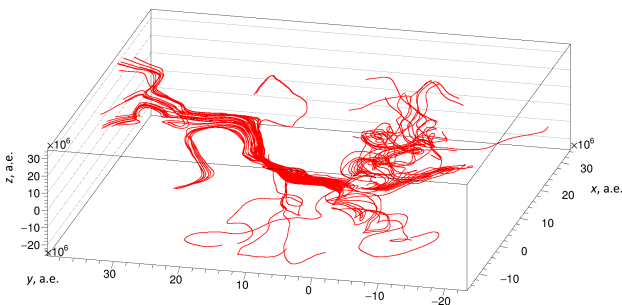


Рис. 3. Магнитные линии случайного изотропного поля. Параметры моделирования: $dL = 10$ а.е., $N = 1000$

Наглядным параметром степени разбегания будет являться расстояние между магнитными линиями r .

Для определения степени разбегания магнитных линий и в дальнейшем параметров образующихся трубок

при различных реализациях случайного поля одинаковой конфигурации построим зависимость r от пробега L и начального расстояния между ними r_0 (3).

$$r(L) = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}, \quad (2)$$

где x_i, y_i, z_i — координаты точки i -й магнитной линии при текущем пробеге L в выбранной системе координат; x_0, y_0, z_0 — координаты точки магнитной линии, имеющей стартовую точку в начале координат. Относительно точек этой кривой измеряются расстояния до остальных магнитных линий.

$$r_0 = r(0) = \sqrt{[x_i(0) - x_0(0)]^2 + [y_i(0) - y_0(0)]^2}. \quad (3)$$

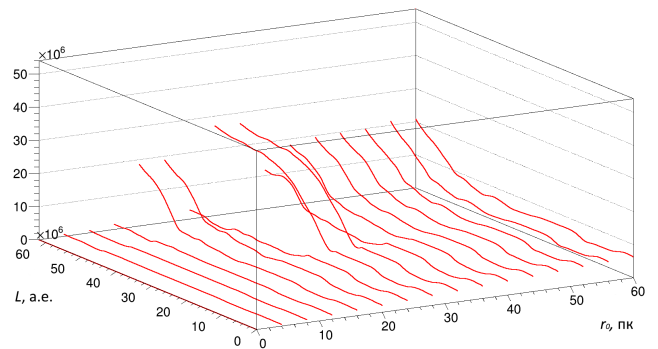


Рис. 4. Зависимость расстояния между магнитными линиями r от пробега L и начального расстояния между ними r_0

Из рис. 4 видно, что на начальных расстояниях $r_0 < 20$ пк линии магнитного поля идут практически параллельно друг другу на пробегах до $L_{corr} \approx 50$ пк ($\sim 10^7$ а.е.), образуя магнитную трубку. При дальнейшем увеличении r_0 магнитные линии становятся менее коррелированными. Сечение такой трубки при определенном L является окружностью, поскольку при одинаковых r_0 , но разных по знакам координат x и y L_{corr} для всех линий одинаково.

Для более точного определения параметров образующейся трубки при последующих исследованиях будет проведено усреднение для многих реализаций поля такой же конфигурации и добавлена регулярная компонента.

2.3. Построение двухкомпонентного поля и определение продольного и поперечного транспорта

В Галактике отношение регулярной и турбулентной компонент поля варьируется в больших диапазонах. При этом предельными случаями являются поля, где одна из компонент на порядки превосходит вторую. В таком случае можно рассматривать только одну компоненту. Введем коэффициент k , равный отношению амплитуд регулярной компоненты и турбулентной.

В двухкомпонентном магнитном поле (рис. 5) изучаются продольный и поперечный диффузионные коэффициенты для магнитных линий при различных отношениях величин случайной и регулярной компоненты.

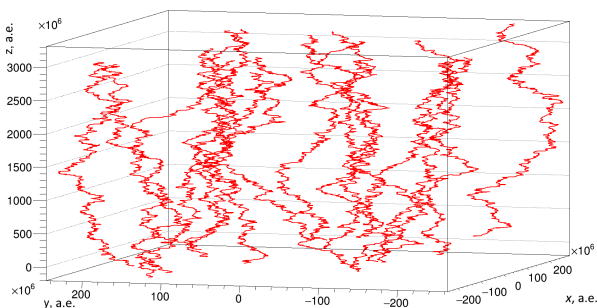


Рис. 5. Линии двухкомпонентного магнитного поля с регулярной компонентой, ориентированной вдоль оси z , по модулю равное турбулентной компоненте ($k = 1$)

В моделировании регулярное поле постоянно, а амплитуда турбулентного поля меняется. При этом при увеличении регулярной компоненты поперечный транспортный коэффициент уменьшается (рис. 6). В представленных расчетах k лежит в диапазоне от 1/16 до 2. Так же показаны продольный и поперечный транспортные коэффициенты для изотропного турбулентного поля ($k=0$). В дальнейшем диапазон значений k будет увеличен.

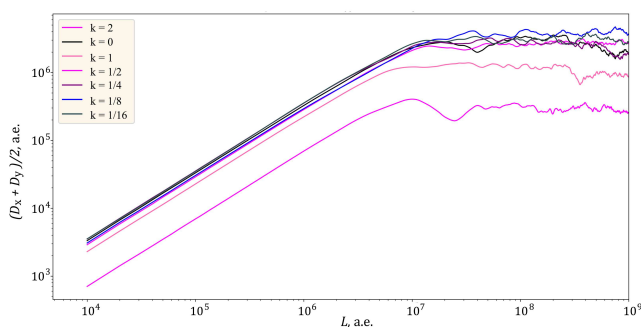


Рис. 6. Поперечный транспортный коэффициент для двухкомпонентного поля с разным k

При добавлении регулярной составляющей поля продольный транспортный коэффициент перестает выходить на плато на больших пробегах, что указывает на

переход в баллистический режим движения магнитных линий (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На текущий момент в работе показано качественное представление структуры изотропного поля при близком расположении начальных точек магнитных линий.

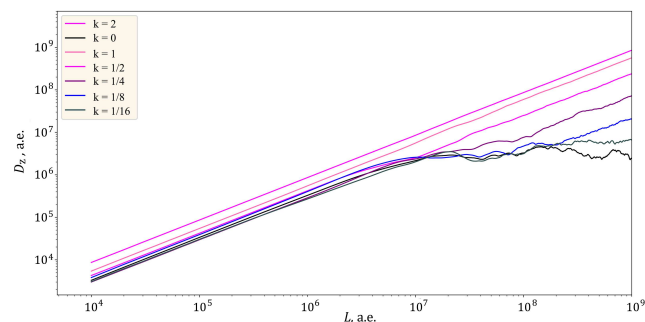


Рис. 7. Продольный транспортный коэффициент для двухкомпонентного поля с разным отношением регулярной компоненты к турбулентной

Для последующего изучения двухкомпонентной модели галактического магнитного поля и количественной оценки корреляционной длины будут построены зависимости степени расхождения магнитных линий между собой в зависимости от начального расстояния между ними и пробега. Поскольку наличие регулярных структур влияет на режим движения магнитных линий, то для получения полной картины требуется получить возможные масштабы магнитных трубок.

Так же получено, что при увеличении амплитуды регулярной компоненты поля меняется транспортный режим магнитных линий. В случае продольной составляющей перестает наблюдаться выход на диффузионный режим, что говорит о малом влиянии изотропной компоненты. Поперечный транспортный коэффициент уменьшается при возрастании регулярного поля. В этом случае интенсивность диффузии магнитных линий в этих направлениях так же ослабнет. Тогда предельном случае, то есть при отсутствии турбулентного поля, распространение будет происходить только в продольном направлении, что согласуется с ожидаемым результатом. Для уточнения полученных зависимостей диапазон значений отношения регулярной компоненты к турбулентной будет расширен.

[1] Бочкарев Н.Г. Магнитные поля в космосе. URSS, 2019.
 [2] Yurovsky V.O., Peryatinskaya A.I., Kudryashov I.A. // arXiv:2211.08873v2 [astro-ph.HE] 30 Jan (2023).
 [3] Shshlchi A., Weinhorst B. // Advances in Space Research. **43**. 1429. May 1 (2009).

[4] Tsouros A., Edenhofer G., EnYlin T. et al. // arXiv:2303.10099v1 [astro-ph.HE] 17 Mar (2023).
 [5] Hauff T., Jenko F., Shalchi A., Schlickeiser R. // The Astrophysical Journal. **711**. 997. March 10 (2010).
 [6] Tautz R.C., Shalchi A., Schlickeiser R. // The

- Astrophysical Journal. **692**. 642. January 1 (2008).
[7] Strong A.W., Moskalenko I.V., Ptuskin V.S. // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **57**. 285 (2007).
[8] Snodin A.P., Ruffolo D., Oughton S. et al. // The Astrophysical Journal. **779**. 56. December 10 (2013).

Studying the relative position of magnetic lines of a two-component random magnetic field

A.P. Peryatinskaya^{1,a}, O. Yurovsky^{1,b}, I.A. Kudryashov^{2,c}

¹Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow 119234, Russia

E-mail: ^aszsalexvay@gmail.com, ^byurovskyvladimir@gmail.com, ^cilya.kudryashov.85@gmail.com

Galactic cosmic rays play an important role in cosmic physics. Despite numerous studies in the field of the magnetic fields of the Galaxy, the understanding of the structure of magnetic lines remains insufficient for predicting the trajectories of high-energy cosmic particles in various configurations of galactic magnetic fields.

In this work, the magnetic field is studied numerically by constructing its two-component model and its further qualitative and statistical analysis. At a qualitative level, the results of modeling a random isotropic field, where the magnetic lines are located close to each other, are presented. In this case, a regular structure is observed (see Section 2.2).

It is shown that when simulating an isotropic random field, a diffusion mode of motion is observed. When a regular component of a certain intensity is added, the longitudinal mode of transport becomes ballistic.

PACS: 13.85.Tr.

Keywords: galactic cosmic rays, galactic magnetic fields, diffusion.

Received 01 June 2023.

Сведения об авторах

1. Перятинская Александра Игоревна — e-mail: szsalexvay@gmail.com.
2. Юровский Владимир Олегович — студент; e-mail: yurovskyvladimir@gmail.com.
3. Кудряшов Илья Анатольевич — науч. сотрудник; e-mail: ilya.kudryashov.85@gmail.com.