

УДК 524.63-34

ФРАКТАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ ЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ В ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ GAIA DR2

© 2024 М. Л. Осташова^{1*}, А. С. Расторгуев^{1,2**}¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119191 Россия

Поступила в редакцию 18 марта 2024 года; после доработки 25 апреля 2024 года; принята к публикации 27 апреля 2024 года

В данной работе изучаются фрактальные свойства звездной среды в окрестности Солнца на основе данных Gaia DR2 для 200 000 звезд всех спектральных классов на расстояниях от 1 до 100 пк от Солнца. Рассматриваются основные этапы развития представлений о фрактальной структуре в звездной среде галактик. Анализ пространственного распределения звезд выполняется методом «масса — радиус». Численные расчеты показывают, что средняя условная локальная звездная плотность в сферах с возрастающим радиусом r с центром в i -ой звезде аппроксимируется степенными законами, что подтверждает выводы Вокулера—Мандельброта для фрактальных структур в гравитирующих средах и указывает на присутствие фрактальных структур в звездной среде в окрестности Солнца с фрактальной размерностью $D \simeq 2.41$. Определенные по выборке из 200 000 звезд характеристики фрактальных свойств среды обсуждаются и сравниваются с более ранним результатом, полученным для 13 000 F- и G-карликов в окрестности Солнца по данным Женевско—Копенгагенского обзора.

Ключевые слова: *распределение звезд — звездная динамика — окрестности Солнца*

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение фрактальных структур в звездной среде Галактики является одной из важных задач астрономии и особенно звездной динамики, поскольку помогает построить внутренне последовательную и более соответствующую наблюдательным данным кинетическую теорию звездной среды и уточнить основные уравнения звездной динамики, устраняя из них ряд противоречий, обусловленных существенным отличием кинетических параметров (временных масштабов, коэффициентов динамического трения, диффузии и др.) для фрактальных звездных сред от соответствующих параметров для квазиоднородных сред с ограниченными флуктуациями плотности.

Классическая модель звездной среды Галактики как бесконечной однородной среды с ограниченными флуктуациями плотности была взята за основу Чандрасекаром (Chandrasekhar, 1943) для получения уравнений звездной динамики и может рассматриваться в качестве первого приближения для гравитирующей звездной среды. Реальная звездная среда Галактики является неоднородной и

содержит различные гравитационно-динамически связанные структуры. Например, сильно связанными системами являются ядра шаровых скоплений и тесные двойные системы. Они могут существовать в течение сотен и тысяч своих характерных динамических времен и могут быть разрушены только редкими сильными внешними воздействиями, по энергии сравнимыми с энергией их связи. Менее связанными системами являются широкие пары двойных и кратных звезд, рассеянные звездные скопления и их короны, звездные ассоциации, молекулярные облака и газопылевые комплексы. Естественно, что процессы, происходящие в таких системах, не могут быть описаны в рамках классической модели Галактики. Кроме того, использование бесконечной однородной звездной среды в звездной динамике приводит к физически бесконечным временам релаксации, на много порядков превышающим возраст системы, что также не соответствует данным наблюдений. Проблему нерешаемости больших времен релаксации Огородников (Ogorodnikov, 1958) назвал основным парадоксом звездной динамики.

Вследствие этого изучение структурных неоднородностей в звездной среде Галактики, и в том числе фрактальных структур, является актуальной задачей звездной динамики.

*E-mail: ostashova.mariya@physics.msu.ru

**E-mail: alex.rastorguev@gmail.com

2. ЗАКОН КАРПЕНТЕРА–ВОКУЛЕРА И ФРАКТАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

Фрактальная структура среды галактик была предсказана Карпентером и Вокулером. Carpenter (1938) обнаружил, что число галактик $N(r)$ в скоплении размера r описывается выражением $N(r) \sim r^{1.5}$, а не $N(r) \sim r^3$, как должно было бы быть в случае одинаковой плотности распределения галактик. Это означало, что численная плотность галактик n в скоплении уменьшается с ростом их характерных размеров по дробно-степенному закону:

$$n(r) \sim \frac{N(r)}{r^3} \sim r^{-1.5}, \quad (1)$$

где $N(r)$ — число галактик в скоплении, r — размер скопления, $n(r)$ — плотность галактик в скоплении.

Основываясь на созданном к тому времени Опорном каталоге ярких галактик (de Vaucouleurs et al., 1964)¹, de Vaucouleurs (1970) заново проанализировал результаты Карпентера и пришел к выводу, что в галактической среде выполняется закон

$$n(r) \sim r^{-1.7}, \quad (2)$$

тем самым подтвердив и уточнив результат Карпентера. Вокулер обобщил выводы Карпентера и распространил его результаты не только на скопления галактик, но и на всю галактическую среду. Он показал, что галактическая среда устроена иерархически и, следовательно, любой наблюдатель, если он находится на объекте, включенном в иерархию, обнаружит, что средняя плотность вокруг него убывает с расстоянием. При этом в галактической среде нет выделенного положения, то есть любые достаточно большие одинаковые объемы имеют одинаковую среднюю плотность, независимо от положения их центров относительно друг друга. Эту плотность можно назвать инвариантной условной плотностью. Однако если размеры этих одинаковых объемов синхронно изменять, то условная плотность будет значимо изменяться с характерным размером объема r по закону (2) — закону Карпентера–Вокулера для галактической среды.

Мандельброт (Mandelbrot, 1977; 1986) — родоначальник фрактального анализа — ввел понятие «фрактала», что означает «дробный, разбитый, ломаный». Мандельброт называл так самоподобные геометрические фигуры, каждый фрагмент которых повторяется при уменьшении масштаба, то есть

¹Третий каталог в трех томах (de Vaucouleurs et al., 1991).

такая фигура обладает свойством масштабной инвариантности. Опираясь на результаты Вокулера, Мандельброт интерпретировал закон (2) как частный случай стохастического самоподобия трехмерных случайных фрактальных множеств, для которых выполняется следующее соотношение:

$$n(r) \sim r^{-\alpha}, \quad (3)$$

где r — характерный размер увеличивающегося объема вокруг наблюдателя, включенного в иерархию; $n(r)$ — инвариантная условная плотность; α — показатель степени. Мандельброт применил фрактальную размерность для фрактальных звездных сред и показал, что

$$D = 3 - \alpha, \quad (4)$$

где D — фрактальная (хаусдорфова) размерность. Согласно Мандельброту, в зависимости от характеристик среды в различных гравитирующих средах для фрактальных структур

$$0 \leq D \leq 3, \quad (5)$$

то есть показатель степени α может изменяться от 0 до 3.

Дальнейшие работы подтвердили выводы Мандельброта. В настоящее время фрактальность строения областей звездообразования на расстоянии от 1 до 200 пк установлена по наблюдениям молодого населения нашей и других галактик (Efremov and Elmegreen, 1998; Elias et al., 2009; Elmegreen et al., 2014; Gouliermis et al., 2014), а также для F- и G-карликов в окрестности Солнца (Chumak and Rastorguev, 2015; 2016) по данным Женевско–Копенгагенского обзора, далее GCS (Nordström et al., 2004; Holmberg et al., 2009). Также было показано, что межзвездные газопылевые облака имеют фрактальную структуру в широком диапазоне размеров (Larson, 1981; de Vega et al., 1998). Настоящая работа продолжает исследования этих малоизученных структур звездной среды.

3. ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ В ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ Gaia DR2

Наша выборка для изучения фрактальных свойств пространственного распределения звезд в околосолнечной окрестности включает 200 000 звезд всех спектральных классов на расстоянии от 1 до 100 пк от Солнца. Мы использовали наблюдательные данные (значения координат и параллакса), полученные на космическом телескопе Gaia. Поскольку в Gaia DR2 отсутствует каталог неодионых (двойных и кратных) звезд (Ziegler et al., 2018), то двойные (кратные) звезды в ансамбле мы считали за одну.

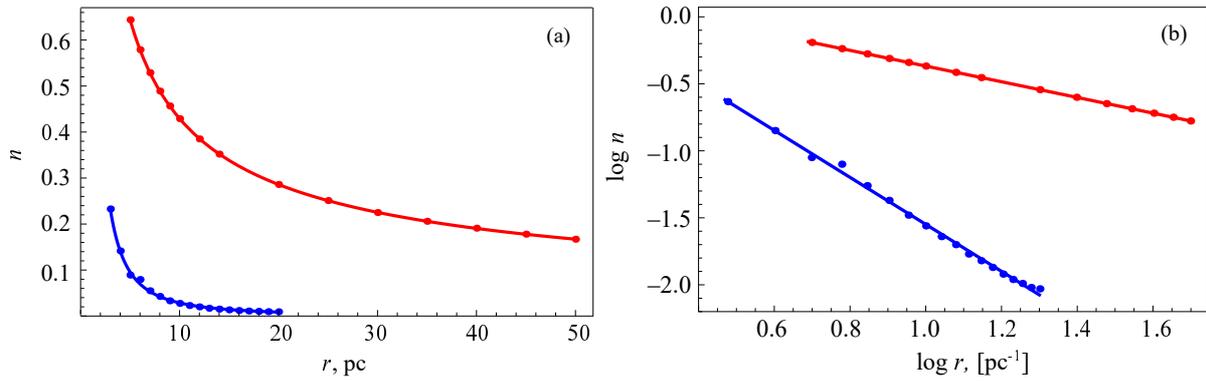


Рис. 1. Зависимость средней условной звездной плотности от радиуса сферы вокруг звезд в околосолнечной окрестности для 200 000 звезд из наблюдательных данных Gaia DR2 (верхние красные линии) в линейном и логарифмическом виде (панели (a) и (b) соответственно). Для сравнения показаны подобные зависимости для звезд-карликов F- и G-типа (нижние синие линии) по наблюдательным данным GCS, полученные в работе Chumak and Rastorguev (2016).

Анализ пространственного распределения звезд выполнялся методом «масса—радиус», суть которого состоит в определении числа $N(r, R_i)$ звезд в сферах с увеличивающимся радиусом r с центром в i -ой звезде, находящейся на радиальном расстоянии R_i от наблюдателя. Среднее число звезд в сферах радиуса r можно определить по формуле:

$$N(r) = \frac{1}{m(r)} \sum_{i=1}^{m(r)} N(r, R_i), \quad (6)$$

где $N(r)$ — среднее число звезд в сферах с радиусом r , $N(r, R_i)$ — число звезд в сферах с радиусом r с центром в i -ой звезде, R_i — радиальное расстояние i -ой звезды от наблюдателя, $m(r)$ — число сфер радиуса r .

Разделив далее $N(r)$ на $V(r)$ — объем сферы радиуса r , — получим среднюю функцию распределения условной звездной плотности $n(r)$:

$$n(r) = \frac{N(r)}{V(r)}. \quad (7)$$

Наши численные расчеты для выбранных 200 000 звезд из наблюдательных данных космической миссии Gaia DR2 (Brown et al., 2018) в околосолнечной окрестности показывают, что средняя условная звездная плотность $n(r)$ в сферах с увеличивающимся радиусом r с центром в i -ой звезде аппроксимируется степенными законами вида:

$$n(r) = hr^{-\alpha}, \quad (8)$$

где h и α — численные коэффициенты, что подтверждает выводы Вокулера—Мандельброта для фрактальных структур в гравитирующих средах. При этом коэффициенты h и α оказываются равными

$$h = 1.654, \quad \alpha = 0.586, \quad (9)$$

с уровнем значимости по Пирсону $R^2 \simeq 0.992$. Таким образом, фрактальная (хаусдорфова) размерность равна $D = 3 - \alpha \simeq 2.41$.

Полученная зависимость средней условной звездной плотности от радиуса сферы вокруг звезд для выбранных 200 000 звезд в окрестности Солнца показана красной (верхней) линией на рис. 1a и 1b, в линейном и логарифмическом виде соответственно. Для сравнения на обоих рисунках приведены подобные зависимости для F- и G-карликов (синие нижние линии) из работы Chumak and Rastorguev (2016), в которой изучались 13 000 карликов типа F и G на расстояниях от 1 до 20 пк от Солнца из наблюдательных данных GCS и были получены коэффициенты $h = 1.644$, $\alpha = 1.769$ и фрактальная размерность $D \simeq 1.23$.

Отсутствие разброса экспериментальных точек относительно аппроксимирующей их кривой объясняется значительно бóльшим (более чем на порядок) количеством звезд в нашей выборке по сравнению с предыдущим исследованием для F- и G-карликов (Chumak and Rastorguev, 2016). Сравнительная характеристика обоих исследований приведена в таблице 1.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение пространственного распределения 200 000 звезд всех спектральных классов в окрестности Солнца по наблюдательным данным космической миссии Gaia (DR2, 2018) показало наличие фрактальных структур в звездной среде со средней фрактальной хаусдорфовой размерностью $D \simeq 2.41$. Этот результат находится в согласии с результатом изучения фрактальных структур звездной среды в околосолнечной окрестности для F- и G-карликов по наблюдательным данным GCS (Chumak and Rastorguev, 2016).

Таблица 1. Сравнительная характеристика изучения фрактальных структур в околосолнечной окрестности по данным Gaia DR2 и GCS

	Gaia DR2 ^{a)}	GCS ^{b)}
Число звезд	200 000	13 000
r , пк от Солнца	< 100	< 20
Спектральный класс	Все	F- и G-карлики ^{c)}
Размерность Хаусдорфа D	2.41	1.23

^{a)}Наша выборка; ^{b)}работа Chumak and Rastorguev (2016); ^{c)}25–40% звездной плотности в околосолнечной окрестности.

Полученная нами фрактальная размерность $D \simeq 2.41$ обусловлена большей полнотой наблюдательных данных космической миссии Gaia по сравнению с Женевско–Копенгагенским обзором звезд, а также тем, что выбранные звезды включают звезды всех спектральных классов на расстоянии до 100 пк от Солнца и, следовательно, соответствует более реальному описанию звездной среды в окрестности Солнца.

По результатам исследования можно сделать вывод о том, что звезды в окрестности Солнца образуют гравитационно-связанные структурные образования — такие как кластеры, части спиральных рукавов, сгустки — которые имеют фрактальные свойства и подчиняются законам фрактальной кинетики.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа финансировалась за счет бюджета учреждений. Никаких дополнительных грантов на проведение и руководство данным конкретным исследованием получено не было.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы результаты космической миссии Gaia Европейского космического агентства (ESA) (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>). Данные Gaia обрабатываются Консорциумом обработки и анализа данных Gaia (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>), финансируемым национальными институтами, в частности институтами-участниками многостороннего соглашения Gaia–Gaia Multilateral Agreement (MLA).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A1 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833051
2. E. F. Carpenter, *Astrophys. J.* **88**, 344 (1938). DOI:10.1086/143987
3. S. Chandrasekhar, *Reviews of Modern Physics* **15** (1), 1 (1943). DOI:10.1103/RevModPhys.15.1
4. O. V. Chumak and A. S. Rastorguev, *Baltic Astronomy* **24**, 30 (2015). DOI:10.1515/astro-2017-0200
5. O. V. Chumak and A. S. Rastorguev, *Astronomy Letters* **42** (5), 307 (2016). DOI:10.1134/S1063773716050029
6. G. H. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, and H. Shapley, *Reference catalogue of bright galaxies* (1964).
7. G. de Vaucouleurs, *Science* **167** (3922), 1203 (1970). DOI:10.1126/science.167.3922.1203
8. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin, Jr., et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (Springer, New York, 1991).
9. H. J. de Vega, N. Sánchez, and F. Combes, *Astrophys. J.* **500** (1), 8 (1998). DOI:10.1086/305700
10. Y. N. Efremov and B. G. Elmegreen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **299** (2), 588 (1998). DOI:10.1046/j.1365-8711.1998.01819.x
11. F. Elias, E. J. Alfaro, and J. Cabrera-Cañó, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **397** (1), 2 (2009). DOI:10.1093/mnras/staa046
12. D. M. Elmegreen, B. G. Elmegreen, A. Adamo, et al., *Astrophys. J.* **787** (1), article id. L15 (2014). DOI:10.1088/2041-8205/787/1/L15
13. D. A. Gouliermis, S. Hony, and R. S. Klessen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439** (4), 3775 (2014). DOI:10.1093/mnras/stu228
14. J. Holmberg, B. Nordström, and J. Andersen, *Astron. and Astrophys.* **501** (3), 941 (2009). DOI:10.1051/0004-6361/200811191
15. R. B. Larson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **194**, 809 (1981). DOI:10.1093/mnras/194.4.809

16. B. B. Mandelbrot, *Fractals: form, chance, and dimension* (W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1977).
17. B. B. Mandelbrot, in *Proc. Sixth Trieste Intern. Symp. on Fractals in Physics, Trieste, Italy, 1985*, Ed. by L. Pietronero and E. Tosatti (North Holland Publishing, Amsterdam, 1986) pp. 3–28.
18. B. Nordström, M. Mayor, J. Andersen, et al., *Astron. and Astrophys.* **418**, 989 (2004). DOI:10.1051/0004-6361:20035959
19. К. Ф. Огородников, *Динамика звездных систем* (Физматгиз, Москва, 1958).
20. C. Ziegler, N. M. Law, C. Baranec, et al., *Astron. J.* **156** (6), article id. 259 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aad80a

Fractal Effects of the Stellar Medium in the Vicinity of the Sun According to Gaia DR2 Data

M. L. Ostashova¹ and A. S. Rastorguev^{1,2}

¹Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119191 Russia

In this paper, we study the fractal properties of the stellar medium in the solar vicinity based on the Gaia DR2 data for 200 000 stars of all spectral types at distances from 1 to 100 pc from the Sun. We consider the main stages of the development of ideas about the fractal structure in the stellar medium of galaxies. Analysis of the spatial distribution of stars is performed using the “mass–radius” method. Numerical calculations show that the average conditional local stellar density in spheres with the increasing radius r centered on the i -th star is approximated by power laws, which confirms the de Vaucouleurs–Mandelbrot conclusions for fractal structures in gravitating media and indicates the presence of fractal structures in the stellar medium in the solar neighborhood with the fractal dimension $D \simeq 2.41$. The characteristics of the fractal properties of the medium, determined from a sample of 200 000 stars, are discussed and compared with an earlier result obtained for 13 000 F and G dwarfs in the solar neighborhood according to the Geneva–Copenhagen survey.

Keywords: *fractal distribution of stars, stellar dynamics, solar neighborhood*