

Батарейный механизм Бирмана как источник магнитных полей в галактических и аккреционных дисках

© Е.А. Михайлов,^{1,2} Р.Р. Андреасян,³ И.К. Марчевский,⁴ А.И. Тян²

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

³ Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А. Амбарцумяна НАН Республики Армения,
0213 Бюракан, Армения

⁴ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия
e-mail: ea.mikhajlov@physics.msu.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 17 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Исследован механизм Бирмана применительно к аккреционным дискам. Определена роль механизма Бирмана в появлении затравочных полей. Исследования велись как с помощью методов усреднения, так и в рамках многочастичного моделирования.

Ключевые слова: галактики, аккреционные диски, магнетизм.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59247.345-24

Введение

Наличие в галактиках магнитных полей величиной в несколько микрогаусс на сегодняшний день твердо установлено [1]. Они исследованы с помощью измерений фарадеевского вращения плоскости поляризации радиоволн [2], спектра синхротронного излучения [3]; свидетельством их наличия в Млечном Пути служит также пространственное распределение космических лучей. По современным представлениям генерация магнитных полей в большинстве подобных объектов обусловлена механизмом динамо [4,5]. Он связан с совместным действием альфа-эффекта (характеризует спиральность турбулентных движений) и дифференциального вращения, и приводит к экспоненциальному росту магнитных полей. Также существуют основания полагать, что магнитные поля присутствуют в аккреционных дисках, объясняя такие процессы, как перенос момента количества движения [6]. Крупномасштабные структуры магнитного поля там также могут быть обусловлены динамо [7]. Есть также наблюдательные свидетельства существования таких полей, связанные с изучением фарадеевского вращения [8].

Между тем, хотя динамо и позволяет описать экспоненциальный рост магнитных полей, оно требует ненулевых начальных условий, которые должны быть связаны с другими механизмами. Если в случае с аккреционными дисками определенную роль может играть перенос в замороженного поля вместе с падающей средой, то в случае галактик все обстоит сложнее. Одним из объяснений наличия затравочных магнитных полей может служить механизм Бирмана [9,10]. Он связан с распространением потоков протонов и электронов в радиальном направлении. Ввиду того что модули

зарядов частиц одинаковы, а массы различаются, они по-разному взаимодействуют с вращающейся средой, что приводит к возникновению круговых токов [11]. Эти токи ассоциированы с магнитными полями. Хотя оценки и показывают [10], что они невелики, подобные структуры могут служить начальными условиями для других механизмов роста поля.

Исследование структуры полей представляет собой более сложную задачу. Если усреднять их по довольно большому масштабу, приходим к интегральному уравнению II рода, где разные слагаемые учитывают как рост поля, так и его насыщение [12,13]. Его особенностью является наличие сингулярных уравнений, интегралы в которых нужно понимать в смысле главных значений. Его решение с достаточно высокой точностью является нетривиальной задачей и требует значительных вычислительных ресурсов [14].

Альтернативный подход связан с многочастичным моделированием путем рассмотрения движения протонов и электронов. В таком случае решают уравнение движения для отдельных частиц, учитывая их взаимодействие друг с другом. Такая процедура также затратна, поэтому на практике при расчете частицы объединяют в „пучки“. С другой стороны, характерной чертой всех методов частиц является простота создания параллельных реализаций вычислительных алгоритмов, что позволяет эффективно проводить вычисления, в том числе на графических ускорителях.

1. Уравнение движения частицы

При движении заряженной частицы (протона или электрона) ее азимутальный угол φ удовлетворяет урав-

нению

$$\varphi''(t) = -2V\varphi'(t)/r - [\varphi'(t) - \Omega]/\tau - qVB/mcr,$$

где V — скорость движения в радиальном направлении; r — расстояние до центра; Ω — угловая скорость вращения диска; B — магнитное поле; m — масса частицы; q — ее заряд; τ — характерное время взаимодействия между частицей и средой. Каждой паре частиц соответствует круговой ток ($\varphi_e'(t)$ — угловая скорость электрона, $\varphi_p'(t)$ — протона)

$$I = e[\varphi_p'(t) - \varphi_e'(t)]/2\pi,$$

создающий на расстоянии R от центра магнитное поле

$$b(R) = I\Phi(R)/cR, \quad \Phi(x) = \int_0^{2\pi} \frac{1 - x \cos \varphi}{1 + x^2 - 2x \cos \varphi} d\varphi.$$

2. Интегральное уравнение для магнитного поля

Можно ожидать, что угловая скорость частиц достаточно быстро „подстраивается“ под вращение среды и зависит в основном от расстояния до центра. Тогда будет иметь место стационарное распределение магнитного поля, которое описывается уравнением [12]:

$$B(r) = \alpha \int_{R_{\min}}^1 Q(r, R) B(R) dR + F(r),$$

где расстояния измеряются в радиусах диска; α — коэффициент, в который входят размеры диска, плотность частиц в нем и т.д.; $R_{\min}$ — внутренний радиус диска. В случае галактик имеем [12]:

$$Q(r, R) = -\Phi(r/R)/R^2, \quad F(r) = \int_{R_{\min}}^1 Q(r, R) R^{-1} dR,$$

$$\alpha = 2nhq2V\tau\epsilon m^{-1}c^{-2},$$

где n — типичная концентрация частиц около внутренней границы диска, h — полутолщина диска, ϵ — отношение внутреннего и внешнего радиусов диска. Величины q , τ и m соответствуют протону [12]. Коэффициент α достаточно велик, что вызывает некоторые вычислительные сложности. Поэтому мы использовали значения, которые несколько меньше, но при этом позволяют воспроизводить основные качественные свойства магнитного поля. Результат решения интегрального уравнения для галактик показан на рис. 1. Отметим, что магнитное поле измеряется в безразмерных единицах [12] (так, для Млечного Пути это величина порядка 10^{-15} G).

Для аккреционных дисков выражение выглядит немного сложнее:

$$Q(r, R) = -[1 - 0.9(R_{\min}/R)^{1/2}]^{-16/5} \Phi(r/R) R^{7/8},$$

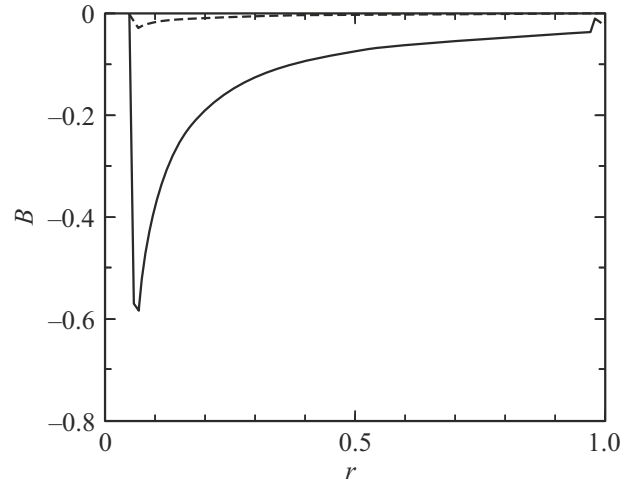


Рис. 1. Магнитное поле в галактике (решение интегрального уравнения). $\alpha = 30$ (сплошная линия), 600 (штриховая линия).

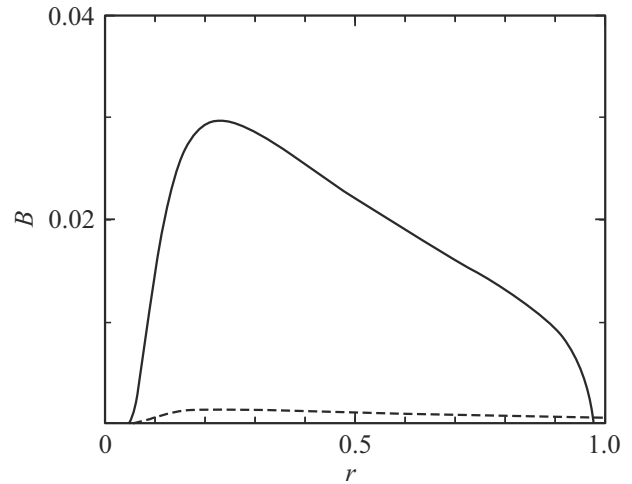


Рис. 2. Магнитное поле в аккреционном диске (решение интегрального уравнения). $\alpha = 30$ (сплошная линия), 600 (штриховая линия).

$$F(R) = - \int_{R_{\min}}^1 Q(r, R) [1 - 0.9(R_{\min}/R)^{1/2}]^{39/10} R^{-11/8} dR,$$

$$\alpha = 2nhq2V\tau\epsilon^{1/8} m^{-1}c^{-2}.$$

Результат решения для аккреционных дисков представлен на рис. 2. Величины α здесь также достаточно велики, поэтому были взяты значения, позволяющие вычислительно исследовать основные характеристики поля. Отметим, что оно имеет другой знак: это связано с преобладающими потоками среды в сторону центра.

3. Многочастичное моделирование

Другой подход связан с моделированием движения отдельных частиц. Рассмотрим „пучки“ частиц, которые соответствуют частицам, расположенным на одном расстоянии до оси. Для частиц каждого из „пучков“ нужно

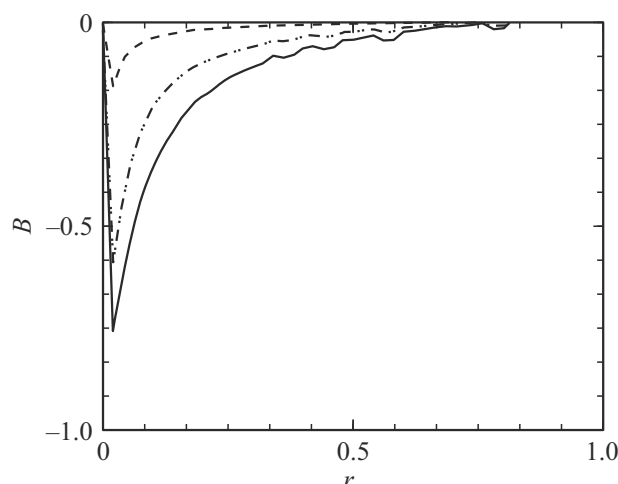


Рис. 3. Магнитное поле в галактике (многочастичное моделирование). $N = 1.7 \cdot 10^{43}$ частиц (сплошная линия), $9.4 \cdot 10^{42}$ частиц (штрихпунктирная линия), $1.7 \cdot 10^{42}$ частиц (штриховая линия).

решить уравнения движения, а также вычислить создаваемое им магнитное поле, которое затем используется при расчете дальнейшего движения частицы. Данная задача решалась численно с помощью собственного программного кода. Результаты моделирования подтвердили теоретические предположения о том, что характеристики быстро выходят на стационарные значения. Создаваемое магнитное поле в случае галактик представлено на рис. 3. Можно видеть, что результаты хорошо согласуются с результатами анализа предшествующей модели. И использованные значения соответствуют величине параметра $\alpha \sim 10^{1...2}$ (впрочем, ввиду разных модельных предположений проводить прямое сравнение следует с осторожностью). Тем не менее нельзя не отметить, что общее число частиц N не очень велико ввиду ограниченности вычислительных ресурсов.

Выводы

В работе исследован процесс генерации магнитного поля за счет механизма Бирмана в галактиках и аккреционных дисках. Для этого использован как подход, связанный с усреднением и решением интегральных уравнений, так и вычисление магнитных полей с применением многочастичного моделирования. Показано, что структура магнитного поля оказывается принципиально схожей для обеих моделей.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. Beck, A. Brandenburg, D. Moss, A. Shukurov, D. Sokoloff. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **34**, 155 (1996). DOI: 10.1146/annurev.astro.34.1.155
- [2] R. Beck, E.M. Berkhuijsen, R. Gießübel, D.D. Mulcahy. *Astron. Astrophys.*, **633**, A5 (2020). DOI: 10.1051/0004-6361/201936481
- [3] V.L. Ginzburg, V.V. Zheleznyakov. *Paris Symposium Radio Astronomy, IAU Simp.*, **9**, 589 (1959). DOI: 10.1017/S0074180900051494
- [4] T. Arshakian, R. Beck, M. Krause, D. Sokoloff. *Astron. Astrophys.*, **494**, 21 (2009). DOI: 10.1051/0004-6361:200810964
- [5] R. Beck, L. Chamandy, E. Edson, E.G. Blackman. *Galaxies*, **8** (1), 4 (2019). DOI: 10.3390/galaxies8010004
- [6] N.I. Shakura, R.A. Sunyaev. *Astron. Astrophys.*, **24**, 337 (1973). DOI: 10.1017/S007418090010035X
- [7] D.V. Boneva, E.A. Mikhailov, M.V. Pashentseva, D.D. Sokoloff. *Astron. Astrophys.*, **652**, A38 (2021). DOI: 10.1051/0004-6361/202038680
- [8] E. Kravchenko, M. Giroletti, K. Hada, D.L. Meier, M. Nakamura, J. Park, R.C. Walker. *Astron. Astrophys.*, **637**, L6 (2020). DOI: 10.1051/0004-6361/201937315
- [9] L. Biermann, A. Schlüter. *Phys. Rev.*, **82** (6), 863 (1951). DOI: 10.1103/PhysRev.82.863
- [10] И.Н. Мишустин, А.А. Рузмайкин. *ЖЭТФ*, **61**, 441 (1971).
- [11] Р.Р. Андреасян. *Астрофизика*, **39**, 111 (1996).
- [12] Е.А. Михайлов, Р.Р. Андреасян. *Астрономический журнал*, **98** (10), 795 (2021). DOI: 10.31857/s000462992109005x
- [13] R.R. Andreasyan, I.K. Marchevsky, V.E. Martynova, E.A. Mikhailov. *Communications Byurakan Astrophysical Observatory*, **69** (2), 274 (2022). DOI: 10.52526/25792776-22.69.2-274
- [14] И.К. Лифанов *Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент* (ТОО „Янус“, М., 1995), с. 29.