

Механизмы формирования магнитных полей на большом расстоянии от центра галактики

© Т.Т. Хасаева,^{1,2} Е.А. Михайлов^{1,3,4}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
113556 Москва, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия

⁴Московский центр фундаментальной и прикладной математики,
119333 Москва, Россия

e-mail: ea.mikhajlov@physics.msu.ru

Поступило в Редакцию 11 мая 2023 г.

В окончательной редакции 28 августа 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Исследована возможность генерации магнитного поля на большом (10–15 кpc) расстоянии от центра галактики. Магнитное поле может генерироваться как с помощью механизма динамо с учетом нелинейных эффектов, так и за счет магниторотационной неустойчивости. Предположительно более значимую роль на таком удалении играют нелинейные эффекты механизма динамо.

Ключевые слова: магниторотационная неустойчивость, динамо, галактики, магнетизм.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56818.f232-23

Введение

В настоящий момент существование магнитных полей величиной порядка нескольких микрогаусс в ряде спиральных галактик твердо установлено и практически не вызывает сомнений [1]. Первые наблюдательные свидетельства их существования были связаны с исследованием пространственного распределения космических лучей и спектра синхротронного излучения. В настоящее время галактические магнитные поля изучаются в основном с помощью измерения фарадеевского вращения плоскости поляризации радиоволн. Первые работы для Млечного Пути основывались на данных об излучении от нескольких десятков пульсаров [2], в то время как на сегодняшний момент известно более тысячи источников для нашей Галактики [3] и миллионы объектов внегалактического происхождения [4].

С теоретической точки зрения возникновение крупномасштабных магнитных полей обычно описывается с помощью механизма динамо, который основан на спиральности турбулентных движений межзвездной среды и дифференциальном вращении, одновременное наличие которых способствует экспоненциальному росту поля [5]. Им противодействует диссипация, которая стремится разрушить регулярные структуры магнитного поля. По этой причине генерация магнитного поля — пороговый эффект — возможна лишь при условии, что действие динамо достаточно интенсивно для противостояния диссипативным эффектам [6]. Данные условия, как правило, выполнены на относительно небольшом расстоянии до центра галактики (до 6–8 кpc). По этой причине большинство работ явно или неявно предпо-

лагали, что магнитные поля существуют лишь во внутренних частях галактики, оставляя открытым вопрос о существовании поля на большом удалении от центра.

Между тем вычислительные исследования, посвященные изучению вопроса о генерации магнитных полей на расстоянии вплоть до 15–20 кpc от центра диска, наглядно показали, что хотя поле и имеет там существенно меньшую величину, но оно может присутствовать в окраинных областях [7] и может расти, несмотря на то, что значение динамо-числа ниже критического, и на первый взгляд рост поля должен быть подавлен диссипативными эффектами. Генерация объясняется, по-видимому, эффектом Колмогорова–Петровского–Пискунова, хорошо известного для нелинейных параболических уравнений математической физики [8]. Другим возможным механизмом, объясняющим рост магнитного поля, является магниторотационная неустойчивость. В одной из недавних работ был рассмотрен вопрос о возбуждении магнитных полей в аккреционных дисках [9]. Судя по всему, похожих результатов можно было бы ожидать и для галактических объектов.

Магниторотационная неустойчивость — это гидродинамический эффект, связанный с неустойчивостью течения жидкости в магнитном поле [10]. Так, в случае течения немагнитной жидкости должны иметь место достаточно большие градиенты угловой скорости для того, чтобы течение оказалось неустойчивым. В то же время для возникновения магниторотационной неустойчивости достаточно убывания угловой скорости с практически любым градиентом. Первые работы, связанные с описанием данного процесса, были посвящены течениям между цилиндрами, имеющими место в различных техни-

ческих установках. Между тем впоследствии появилось большое количество исследований, показывающих принципиальную возможность возникновения магниторотационной неустойчивости и в других задачах, в частности в астрофизике [11]. Так, Шакурой с соавторами данный процесс был исследован для аккреционных дисков [9]. Учитывая, что с принципиальной точки зрения магнитогидродинамические эффекты в галактических и аккреционных дисках схожи [12], мы пользуемся аналогичными соображениями для аккреционных дисков.

В настоящей работе мы анализируем возможную генерацию поля во внешних областях галактики за счет действия как динамо, так и магниторотационной неустойчивости.

1. Генерация магнитного поля во внешних областях за счет действия динамо

Рассмотрим планарное приближение, которое широко применяется для тонких астрофизических дисков. Уравнения для магнитного поля в безразмерных единицах (расстояния измеряются в радиусах диска R , а времена — в единицах, связанных с характерным временем диссипации, магнитные поля — в единицах равномерного распределения, связанных с одинаковой величиной энергии поля и турбулентных движений) будут следующими [13]:

$$\begin{aligned} \partial B_r / \partial t &= R_\alpha \alpha(r) B_\phi (1 - B_r^2 - B_\phi^2) \\ &\quad - \pi^2 B_r / 4 + \lambda^2 (\partial^2 B_r / \partial r^2 + \partial B_r / r \partial r - B_r / r^2), \\ \partial B_\phi / \partial t &= R_\omega B_r r d\Omega / dr - \pi^2 B_\phi / 4 \\ &\quad + \lambda^2 (\partial^2 B_\phi / \partial r^2 + \partial B_\phi / r \partial r - B_\phi / r^2), \end{aligned}$$

где R_α — характеризует спиральность турбулентных движений (альфа-эффект), R_ω — дифференциальное вращение, $\lambda = h/R$ — диссипацию в плоскости диска (h — его полутолщина), также введены функции $\Omega(r) = \Omega_0 (1 + (r/r_\omega)^2)^{-1/2}$, $\alpha(r) = k\Omega(r)$. Можно видеть, что в таком случае действие динамо должно быть подавлено на больших расстояниях.

Для изучения возможности возбуждения магнитного поля во внешних областях мы рассматривали следующие начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} B_r|_{r=0.5} &= B_\phi|_{r=0.5} = B_r|_{r=1.5} = B_\phi|_{r=1.5} = 0, \\ B_r|_{t=0} &= 0; \quad B_\phi|_{t=0} = A(r - 0.5)(1.5 - r). \end{aligned}$$

Для решения задачи использовалась явная численная схема ввиду удобства реализации ее с помощью параллельных вычислений (в данном случае на видеокартах). Эволюция решения показана на рис. 1. Можно видеть, что со временем к моменту $t = 10$ млрд. лет амплитуда поля стремительно увеличивалась, после чего решение вышло на некоторый стационарный уровень. Стоит также отметить, что по мере эволюции фронт решения не

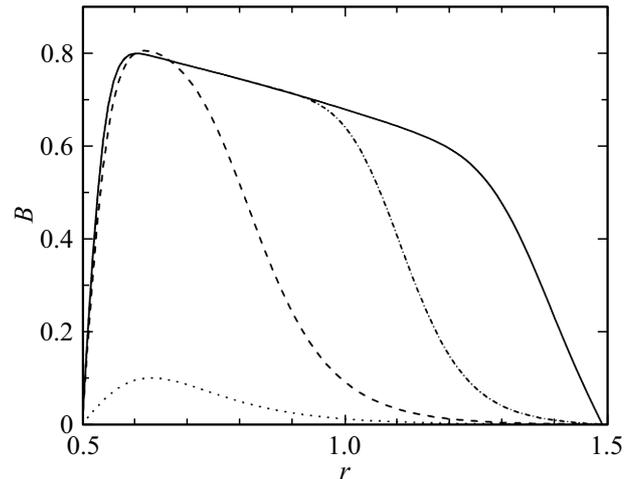


Рис. 1. Зависимость величины магнитного поля от расстояния до центра галактики для разных значений времени эволюции: пунктирная линия — $t = 5$ млрд. лет, штриховая линия — $t = 7$ млрд. лет, штрихпунктирная линия — $t = 10$ млрд. лет, сплошная линия — $t = 15$ млрд. лет.

меняет своего местоположения, в то время как его спад смещается к дальней границе расчетной области. Структура решения будет зависеть от начальных условий. Особую роль играет количество отчетливо выделяемых пиков для затравочного поля. Для аккреционных дисков данный вопрос изучался в [14].

2. Магниторотационная неустойчивость

Будем предполагать, что зависимость магнитного поля от вертикальной координаты описывается с помощью закона $\exp(ik_z z)$ [9]. Возмущения азимутального магнитного поля $b(r)$ могут быть описаны с помощью вспомогательной функции $\psi(r) = b(r)r^{1/2}$. Для нее можно записать уравнение, принципиально схожее с уравнением Шредингера, где k_z^2 играет роль энергии:

$$d^2\psi/dr^2 + 1/r^2(-3/4 + 2V^2/c_A^2)\psi = k_z^2\psi,$$

где V — крупномасштабная скорость вращения галактического диска, c_A — альфвеновская скорость.

Рассмотрим задачу на собственные значения с граничными условиями:

$$\psi|_{r=0.5} = \psi|_{r=1.5} = 0.$$

Магнитное поле, соответствующее старшей собственной функцией, полученной с помощью численного решения данной задачи, показано на рис. 2. Важно отметить, что старшее собственное значение характеризует вертикальный масштаб течения $L_z = 2\pi/k_z$. Для полученных нами решений оказывается, что $L_z \sim 0.14$ (здесь $k_z = 46$, а $k_z^2 = 2.1 \cdot 10^3$).

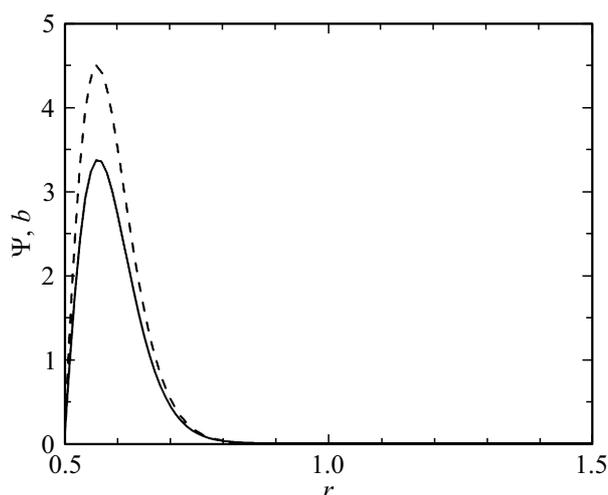


Рис. 2. Старшая собственная функция, соответствующая собственному значению $k_z^2 = 2107$, нормированная на единицу: сплошная линия — $\psi(r)$, штриховая линия — $b(r)$.

Заключение

Таким образом, в работе мы исследовали возможность генерации магнитного поля на большом расстоянии от центра галактики (в размерных единицах это соответствует 10–15 кpc). Можно отметить, что магнитное поле может успешно генерироваться как с помощью механизма динамо с учетом нелинейных эффектов, так и за счет магниторотационной неустойчивости. При этом поле, которое может сформироваться за счет данного явления, быстро убывает с расстоянием (рис. 2). Поэтому можно предполагать, что более значимую роль на таком удалении играют нелинейные эффекты механизма динамо. Это означает, что на больших расстояниях от центра галактического диска могут присутствовать поля, сопоставимые с теми, которые имеют место вблизи центра.

Финансирование работы

Работа Т.Т. Хасаевой выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики „Базис“ (проект #22-2-2-55-1). Работа Е.А. Михайлова выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России (соглашение 075-15-2019-1621).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Я.Б. Зельдович, А.А. Рузмайкин, Д.Д. Соколов. *Магнитные поля в астрофизике* (НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, Институт компьютерных исследований, М., 2006)

[2] R.N. Manchester. *Astrophys. J.*, **172**, 43 (1972).
 [3] Р.Р. Андреасян, Е.А. Михайлов, А.Р. Андреасян. *Астроном. журн.*, **97** (3), 179 (2020).
 [4] E. Lopez-Rodriguez, A.S. Borlaff, R. Beck, W.T. Reach, S.A. Mao, E. Ntormousi, K. Tassis, S. Martin-Alvarez, S.E. Clark, D.A. Dale, I. del Moral-Castro. *Astrophys. J. Lett.*, **942** (1), L13 (2022).
 [5] D.D. Sokoloff. *Geomagnetism and Aeronomy*, **59** (7), 799 (2019).
 [6] T. Arshakian, R. Beck, M. Krause, D. Sokoloff. *Astronomy and Astrophys.*, **494**, 21 (2009).
 [7] E. Mikhailov, A. Kasparova, D. Moss, R. Beck, D. Sokoloff, A. Zasov. *Astronomy and Astrophys.*, **568**, A66 (2014).
 [8] А. Н. Колмогоров, И.Г. Петровский, Н.С. Пискунов. *Бюллетень МГУ, Сер. А, Математика и механика*, **1** (6), 1 (1937).
 [9] N. Shakura, K. Postnov, D. Kolesnikov, G. Lipunova. *Eprint arXiv:2210.15337* (2022).
 [10] Е.П. Велихов. *ЖЭТФ*, **36**, 1399 (1959).
 [11] S.A. Balbus, J.F. Hawley. *Astrophys. J.*, **376**, 214 (1991).
 [12] D.V. Boneva, E.A. Mikhailov, M.V. Pashentseva, D.D. Sokoloff. *Astronomy and Astrophys.*, **652**, A38 (2021).
 [13] D. Moss. *Monthly Notices of the Royal Astronom. Society*, **275**, 191 (1995).
 [14] D.A. Grachev, E.A. Mikhailov, E.N. Zhikhareva. *Open Astronomy*, **32** (1), 216 (2023).