

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВО ВНЕШНИХ ОБЛАСТЯХ ГАЛАКТИК С УЧЕТОМ РАСШИРЕНИЯ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ДИСКА

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

¹МГУ имени М.В.Ломоносова

²ИТПЗ РАН

³Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН

В настоящее время существование магнитных полей в ряде космических объектов подтверждается наблюдениями. Так, о существовании галактического магнитного поля свидетельствует, например, фарадеевское вращение плоскости поляризации радиоволн, исходящих от удаленных космических объектов, например, пульсаров [1]. Как правило, генерацию такого поля принято объяснять действием механизма динамо, суть которого заключается в преобразовании механической энергии турбулентных движений в энергию магнитного поля.

Эффект динамо основан на совместном действии альфа-эффекта и дифференциального вращения галактического диска, которые обеспечивают нарастание поля. Существует ряд работ, посвященных исследованию галактических магнитных полей на расстояниях, не превышающих 10 кпк от центра галактического диска [2], где условия на соотношение соответствующих параметров часто выполнены. В то же время существуют свидетельства возможности генерации поля и на расстояниях более 15 кпк [3], в так называемых внешних областях галактики. Несмотря на то, что поле, возникающее на таких расстояниях от центра, на порядок меньше, оно также может сформироваться в регулярную структуру, не затухнув прежде.

Численное исследование такого поля представляет собой более сложную задачу ввиду ряда неучтенных ранее факторов, таких как расширение галактического диска по мере удаления от центра [4]. Для изучения возможности и результата генерации магнитного поля в таких условиях была сформулирована и решена задача на собственные значения, характеризующая магнитное поле во внешних областях галактики с учетом расширения галактического диска, по мере удаления от его центра. Численное решение данной задачи было найдено путем использования метода прогонки, удобного для решения систем линейных уравнений возникающих в нашем исследовании.

Рассмотрим планарное приближение, которое широко применяется для тонких астрофизических дисков [2]. Возьмем простой осесимметричный случай, исключив зависимость от азимутальной координаты. Уравнения для магнитного поля будут следующими:

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} = -\frac{\Omega(r)l^2}{h^2(r)}B_\phi - \eta \frac{\pi^2 B_r}{4h^2(r)} + \eta \left(\frac{\partial^2 B_r}{\partial r^2} + \frac{\partial B_r}{r\partial r} - \frac{B_r}{r^2} \right);$$

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial t} = r \frac{d\Omega}{dr} B_r - \eta \frac{\pi^2 B_\phi}{4h^2(r)} + \eta \left(\frac{\partial^2 B_\phi}{\partial r^2} + \frac{\partial B_\phi}{r\partial r} - \frac{B_\phi}{r^2} \right);$$

Здесь $h(r)$ – полутолщина галактического диска, увеличивающаяся по мере удаления от центра галактики в соответствии с данными полученными в работе [], $\Omega(r) = \frac{V_0}{r}$ – дифференциальное вращение галактики, η – коэффициент турбулентной диффузии, характеризующий основные диссипативные процессы в системе.

Для перехода к задаче на собственные значения необходимо привести задачу к безразмерному виду, разделив переменные, включающие в себя B_r и B_ϕ . Для этого введем следующие замены:

$$y = B_r \sqrt{-r \frac{d\Omega}{dr}} - B_\phi \sqrt{\frac{\Omega(r)l^2}{h^2(r)}},$$

$$z = B_r \sqrt{-r \frac{d\Omega}{dr}} + B_\phi \sqrt{\frac{\Omega(r)l^2}{h^2(r)}};$$

Подставив указанные замены в уравнения, из общих алгебраических соображений получим два разделенных уравнения:

$$\frac{dy}{dt} = y(A(r) - B(r)) + \eta \left(\frac{\partial^2 y}{\partial r^2} + \frac{\partial y}{r\partial r} - \frac{y}{r^2} \right);$$

$$\frac{dz}{dt} = z(A(r) + B(r)) + \eta \left(\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \frac{\partial z}{r\partial r} - \frac{z}{r^2} \right);$$

где $A(r) = \sqrt{\frac{\Omega(r)l^2}{h^2(r)}} \sqrt{-r \frac{d\Omega}{dr}}$, а $B(r) = \eta \frac{\pi^2}{4h^2(r)}$ для краткости. Решения обоих уравнений можно представить в следующем виде:

$$y(r, t) = \sum_i \tilde{y}_i(r) e^{\lambda_{iy} t};$$

$$z(r, t) = \sum_i \tilde{z}_i(r) e^{\lambda_{iz} t};$$

В таком случае можно сказать, что для поиска старшего собственного значения достаточно решить уравнения с учетом того, что:

$$\frac{dy}{dt} = \lambda_{iy} y;$$

$$\frac{dz}{dt} = \lambda_{iz} z;$$

Задача на собственные значения в таком случае имеет вид:

$$\lambda_y y = y(A(r) - B(r)) + \eta \left(\frac{\partial^2 y}{\partial r^2} + \frac{\partial y}{r\partial r} - \frac{y}{r^2} \right);$$

$$\lambda_z z = z(A(r) + B(r)) + \eta \left(\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \frac{\partial z}{r\partial r} - \frac{z}{r^2} \right);$$

Решим каждое уравнения по отдельности методом прогонки. Приближенные старшие собственные значения в каждом случае $\lambda_y = 11.85$ и $\lambda_z = 12.31$ положительные, что говорит о возможности генерации поля с заданными начальными условиями.

Зная приближенные старшие собственные значения можно воспользоваться обратным степенным методом чтобы найти остальные собственные значения и собственные функции для каждого уравнения. На графике представлен набор собственных функций z_i , соответствующий собственным значениям λ_z .

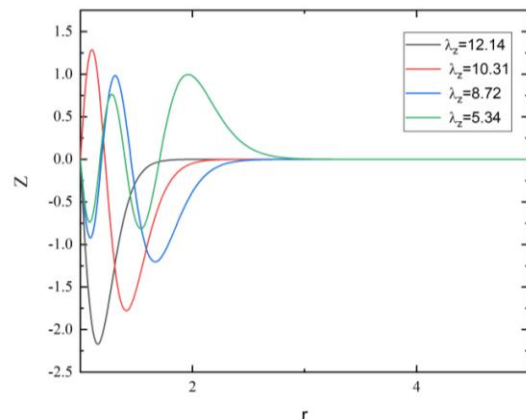


Рис. 1.: Первые четыре собственные функции z_i , соответствующие собственным значениям λ_z

Литература

1. Я.Б. Зельдович, А.А. Рузмайкин, Д.Д. Соколов, *Магнитные поля в астрофизике* (НИИ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, М., 2006).
2. E. Mikhailov, A. Kasparova, D. Moss, R. Beck, D. Sokoloff, A. Zasov, *Astronomy and Astrophysics* 568, A66 (2014).
3. D.V. Boneva, E.A. Mikhailov, M.V. Pashentseva, D.D. Sokoloff, *Astronomy and Astrophysics*, 652, A38 (2021).
4. E. Mikhailov, T. Khasaeva, *Mathematics*, 12, №5 (2024).
5. T. H. Randriamampandry, J. Wang, K. and Moses Mogotsi, *Astrophysical Journal*, 916, 26 (2021)

По итогам расчетов были найдены положительные собственные значения. Наличие нескольких положительных собственных значений, как и ранее предполагалось, показывает возможность генерации поля во внешних областях галактического диска, что закрепляет предыдущие теоретические оценки. Кроме того, в дальнейшем возникает возможность оценить масштабы генерации магнитного поля во внешних областях галактик.