

Численное исследование возникновения пространственных инверсий магнитного поля во внешних областях спиральных галактик

Хасаева Т. Т.^{1,2}

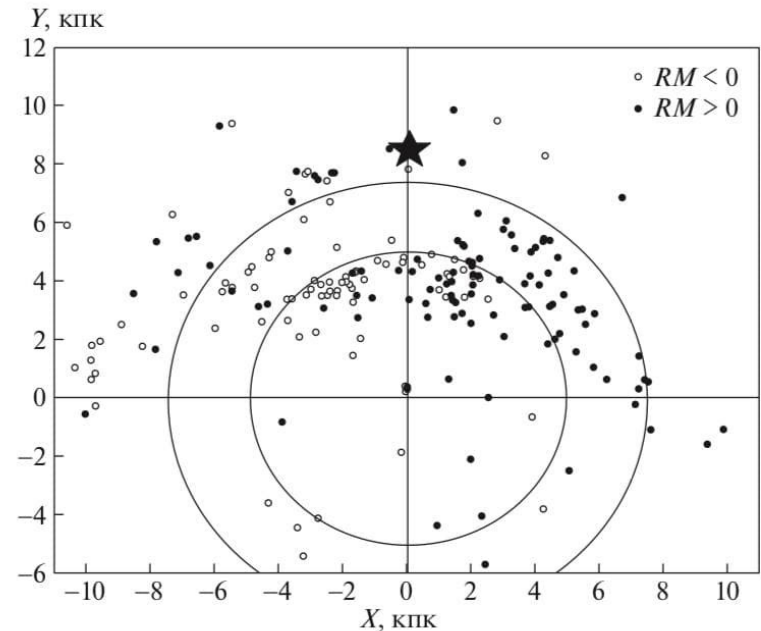
1) *Московский государственный университет, Москва, Российская Федерация*

2) *Институт теории и прогнозирования землетрясений РАН, Москва, Российская Федерация*

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда № 22-17-00114 “Вычислительные задачи геофизической магнитогидродинамики”.

Введение

- В ряде галактик присутствует магнитное поле порядка 1 мкГс (Beck et al. 1996)
- О его наличии свидетельствует регистрация космических лучей и синхротронное излучение
- Измерение угла вращения плоскости поляризации волн (Фарадеевское вращение) позволяет оценить величину галактического магнитного поля
- Для измерений используют излучение от известных на данный момент пульсаров



(Андреасян Р.Р. и др., 2020)

Введение

- Эволюция поля обусловлена механизмом динамо, основанным на таких явлениях как альфа-эффект и дифференциальное вращение галактики
- Альфа-эффект связан с закрученностью турбулентных движений в межзвездной среде
- Дифференциальное вращение характеризует смещение слоев межзвездной среды относительно друг друга
- Рост величины магнитного поля замедляется за счет турбулентной диффузии межзвездного вещества

Постановка задачи

- Магнитное поле принято разделять на мелкомасштабную и крупномасштабную составляющие
- Мелкомасштабное поле служит основой для формирования крупномасштабных структур поля по мере развития галактики
- Крупномасштабная составляющая описывается уравнением Штеенбека-Краузе-Рэддлера (Краузе Ф., Рэдлер К.-Х., 1984)

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\alpha \vec{B}) + \nabla \times [\vec{V} \times \vec{B}] + \eta \Delta \vec{B}$$

- Для численного решения подобной задачи необходимо ввести ряд упрощений

Постановка задачи

- Существует ряд приближений, допустимых в рамках исследования галактического магнитного поля
- Поскольку полутолщина галактического диска ($h \cong 0.5$ кпк) много меньше его радиуса ($R \cong 10$ кпк), его можно считать достаточно плоским
- Такой подход носит название планарного приближения (Beck et al. 1996)
- Это позволяет свести задачу к двумерной

Особенности модели

- В случае спиральных галактик магнитное поле принято рассматривать как сумму радиальной (B_r) и угловой (B_φ) компоненты
- Зависимость обеих компонент магнитного поля от координаты z будем считать $B(r, \varphi, z) = B(r, \varphi) \cos\left(\frac{\pi z}{2h}\right)$

Основные уравнения

- Таким образом, система уравнений, описывающих эволюцию магнитного поля в планарном приближении записывается в полярных координатах

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} = -\frac{\alpha(r, B)}{h} B_\varphi - \eta \frac{\pi^2}{4h^2} B_r - \Omega \frac{\partial B_r}{\partial \varphi} + \eta \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 B_r}{\partial \varphi^2} \right)$$

$$\frac{\partial B_\varphi}{\partial t} = r \frac{\partial \Omega}{\partial r} B_r - \eta \frac{\pi^2}{4h^2} B_\varphi - \Omega \frac{\partial B_\varphi}{\partial \varphi} + \eta \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\varphi) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 B_\varphi}{\partial \varphi^2} \right)$$

$$B_r |_{r=0} = 0 \quad B_r |_{r=R} = 0$$

$$B_\varphi |_{r=0} = 0 \quad B_\varphi |_{r=R} = 0$$

Основные уравнения

- Использование декартовой сетки с численной точки зрения выгоднее
- Система уравнений в декартовых координатах имеет вид:

$$\frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\alpha_0}{h \cdot \sqrt{1 + \frac{x^2 + y^2}{r_0^2}}} (yB_x - xB_y) \left(1 - \frac{B^2}{B_0^2}\right) - \frac{\partial \Omega}{\partial y} yB_y - \Omega B_y - \Omega y \frac{\partial B_y}{\partial y} - \frac{\partial \Omega}{\partial y} xB_x -$$

$$-\Omega x \frac{\partial B_x}{\partial y} - B_x(x, y, 0) \frac{\pi^2 \eta}{4h^2} + \eta \Delta_{xy} B_x$$

$$\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\alpha_0}{h \cdot \sqrt{1 + \frac{x^2 + y^2}{r_0^2}}} (yB_x - xB_y) \left(1 - \frac{B^2}{B_0^2}\right) + \frac{\partial \Omega}{\partial x} yB_y + \Omega y \frac{\partial B_y}{\partial x} + \frac{\partial \Omega}{\partial x} xB_x + \Omega B_x +$$

$$\Omega x \frac{\partial B_x}{\partial x} - B_y(x, y, 0) \frac{\pi^2 \eta}{4h^2} + \eta \Delta_{xy} B_y$$

Параметры динамо

- Альфа-эффект

$$\alpha(B, r) = \frac{\alpha_0(B)}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{r_0^2}}}$$

Здесь $r_0 \cong 2$ кпк

- Рост поля ограничен из соображений закона сохранения энергии, в связи с чем необходимо ввести условие насыщения роста поля (*Mikhailov, E. et al. 2014*)

$$\alpha_0(B) = \alpha_0 \left(1 - \frac{B^2}{B_0^2} \right)$$

- B_0 - поле равномерного распределения, равное 3 мкГс,
 α_0 - параметр, характеризующий вклад альфа-эффекта, равный примерно 1-3 км/с

Параметры динамо

- Угловая скорость вращения галактики

$$\Omega = \frac{\Omega_0}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{r_0^2}}}$$

Ω_0

Здесь Ω_0 характеризует Ω_0 ад $\frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{кпк}}$ дифференциального вращения ($\Omega_0 = 30$) в генерацию поля

- Вклад турбулентной диффузии $\eta = 0.3 \frac{\text{кпк} \cdot \text{км}}{\text{с}}$ определяется коэффициентом

Инверсии магнитного поля

- В некоторых галактиках присутствуют инверсии
- Отметим, что инверсии являются ярким примером контрастных структур
- С естественной точки зрения, наиболее реальными являются случайные начальные условия для поля
- Существуют свидетельства наличия поля на больших расстояниях от центра галактики (15 кпк и более) (*Mikhailov, E. et al. 2014*)
- Возникает вопрос о возможности формирования инверсий в таких областях

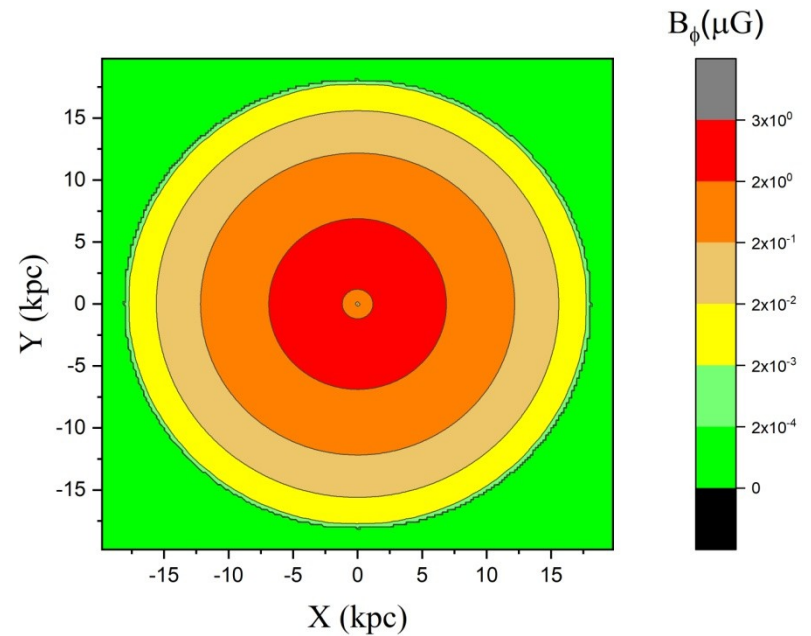
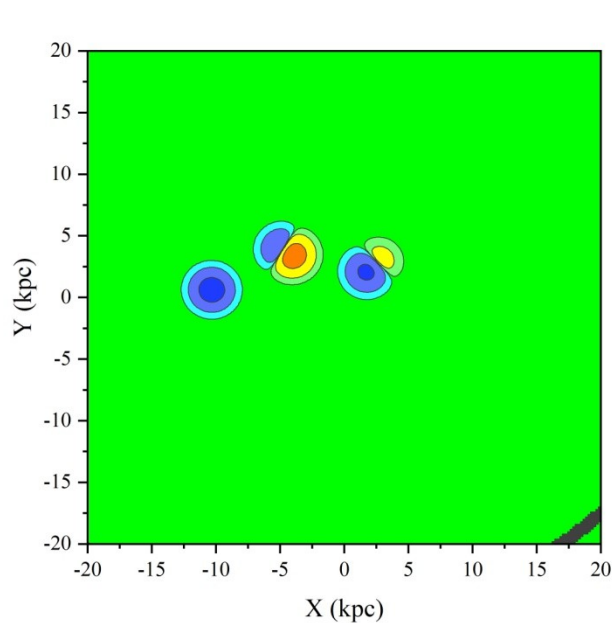
Особенности исследования

- В данной работе рассматриваются случайные НУ, формирующие контрастные структуры
- Предполагается, что поле стремится к осесимметричной структуре
- Расширение вычислительной области, а также необходимость перебора ряда случайных начальных условий приводит к нехватке вычислительной мощности
- Проблема недостатка вычислительных ресурсов была решена с помощью параллельных методов с использованием видеокарт
- Также была оценена эффективность использования различных CPU и GPU

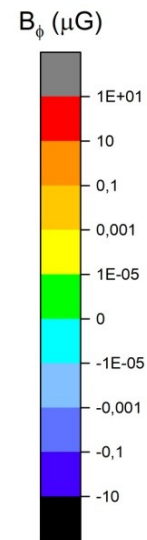
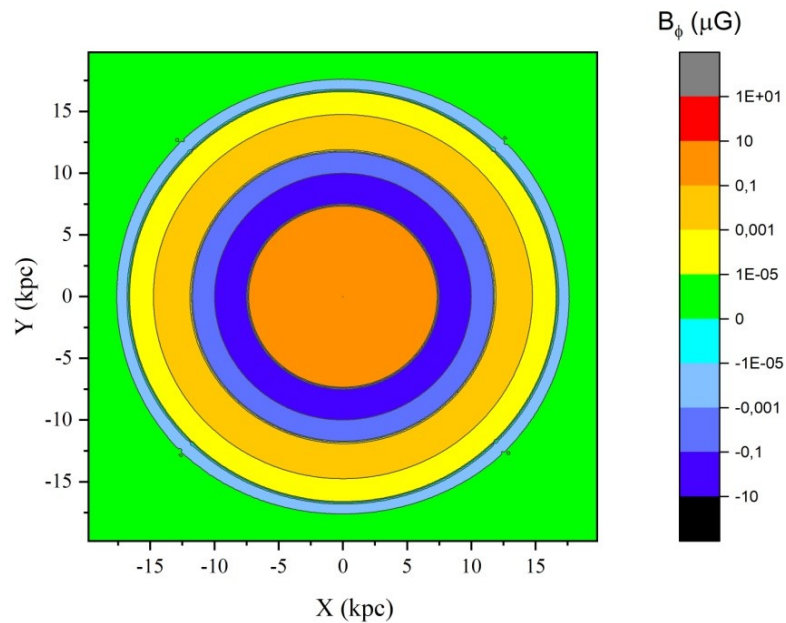
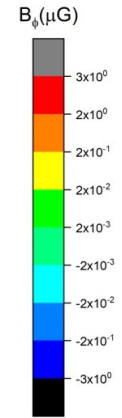
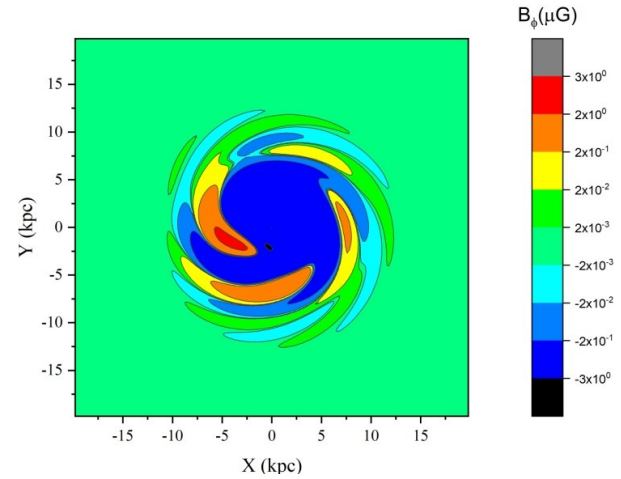
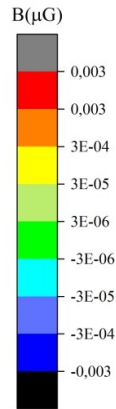
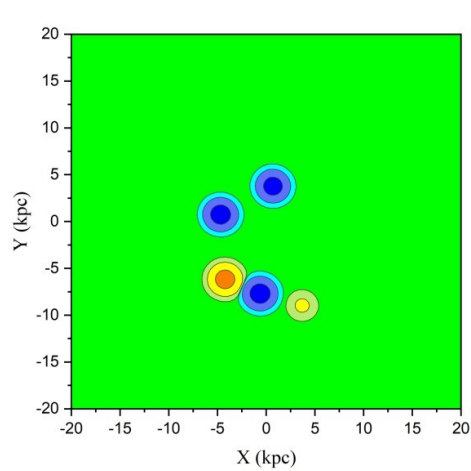
Основные результаты

- Начальные условия имеют вид экспоненциальных всплесков

$$\vec{B} = \sum_{n=0}^K \vec{B}_n e^{-\frac{(\vec{r}-\vec{r}_n)^2}{2\sigma^2}}$$

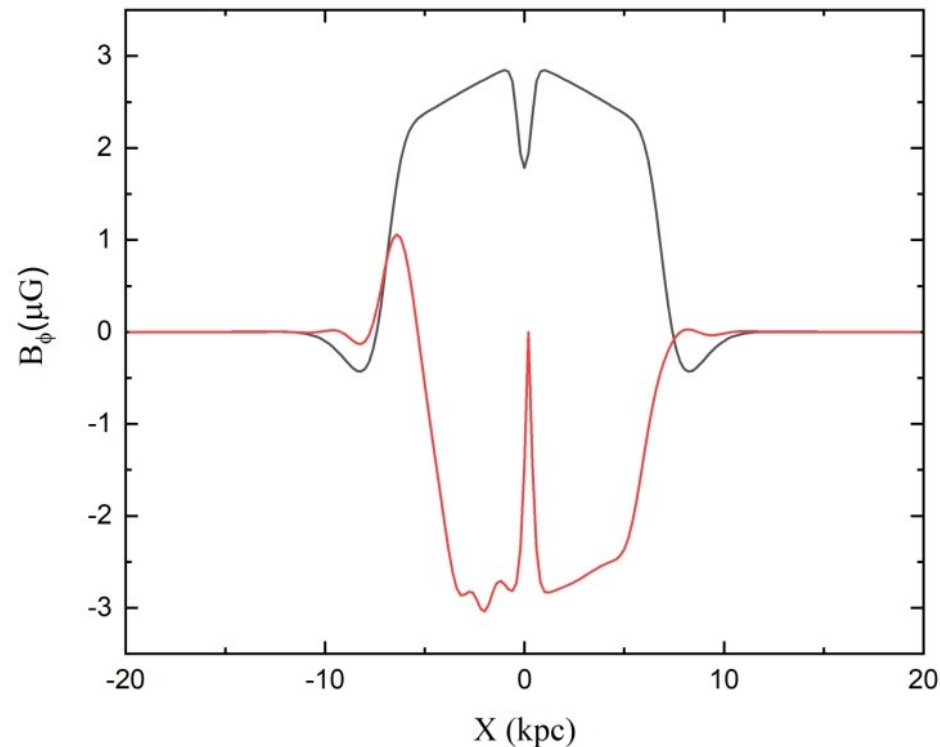


Возникновение инверсий

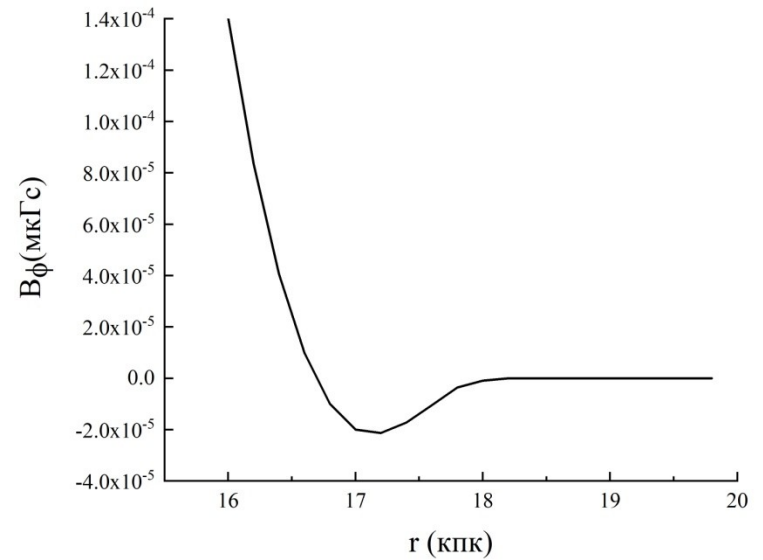
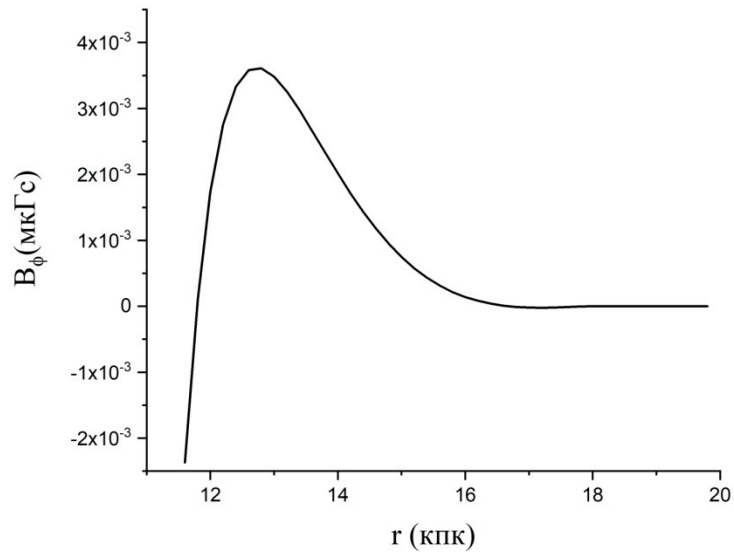


Возникновение инверсий

- Вид магнитного поля, вычисленного на этапе формирования поля ($t = 5$ млрд. лет) и после стабилизации структуры ($t = 15$ млрд. лет)

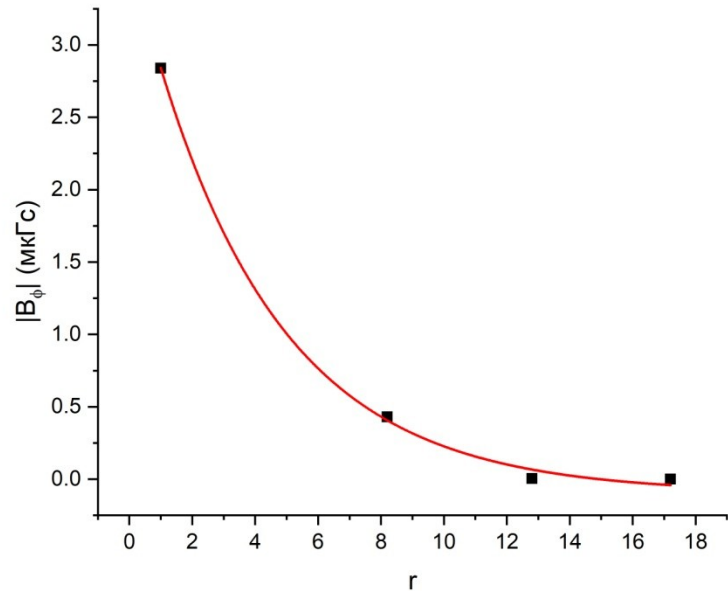


Амплитуда магнитного поля



Амплитуда магнитного поля

Можно заметить, что амплитуда магнитного поля убывает экспоненциально, с показателем $k \cong 0.25$.



Мегнеторотационная неустойчивость

- Мегнитоторотационная неустойчивость – явление, приводящее к турбулентности галактического вещества в связи с уменьшением угловой скорости вращения его слоев по мере удаления от центра галактики
- Особый интерес представляет собой вопрос о влиянии МРН на возникновение добавочного поля во внешних областях галактики
- Данный вопрос ранее рассматривался в случае аккреционных дисков (*Shakura, N., et al. 1014*)

Мегнеторотационная неустойчивость

- Рассмотрим уравнение для поля в безразмерных переменных

$$\frac{d^2\Psi}{dr^2} + \left\{ -k_z^2 - \frac{3}{4} \frac{1}{r^2} + \frac{2\Omega \left[\frac{\omega^2}{k_z^2} \frac{r^2}{2\Omega} - c_A^2 r \frac{d\Omega}{dr} \right]}{\left(c_A^2 - \frac{\omega^2}{k_z^2} \right)^2} \right\} \Psi = 0$$

- Решим задачу на поиск собственных значений в случае $\omega=0$, соответствующего переходному значению между режимом колебаний и экспоненциального роста решения

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial r^2} + \left(-\frac{3}{4} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{2}{r^2} \left(\frac{V}{c_A} \right)^2 \right) \cdot \Psi = k_z^2 \Psi$$

- Численно найдено собственное значения ($k_z=36$)
- В безразмерных переменных характерными размерами галактик k_z^{-1} является величина порядка 0.025-0.2
- Величина имеет тот же порядок (0.03-0.2), что свидетельствует о возможности генерации добавочного поля во внешних областях

ИТОГИ

- Установлено что согласно модельным предположениям при некоторых случайных начальных условиях формируются контрастные структуры во внешних областях галактики
- Теоретически предположения о наличии у установившейся структуры осевой симметрии также подтверждаются в вычислительном эксперименте
- Магнитное поле убывает экспоненциально по мере удаления от центра диска
- Установлено, что магниторотационная неустойчивость может повлиять на генерацию магнитного поля во внешних областях галактического диска

Список литературы

- Краузе Ф., Рэдлер К.-Х. Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо. М., 1984.
- *Beck R., Brandenburg A., Moss D. et al.* Galactic Magnetism: Recent Developments and Perspectives // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 1996. Vol. 34. P.155 – 206
- *Mikhailov, E., Kasparova, A., Moss, D. et al.* Magnetic fields near the peripheries of galactic discs // Astronomy and Astrophysics. 2014. Vol.568: A66.
- Андреасян Р.Р., Михайлов, Е.А., Андреасян А.Р. Структура и особенности формирования инверсий галактического магнитного поля // Астрономический журнал. 2020. Т. 97. С.179 – 189.
- *Shakura, N., Postnov, K., Kolesnikov, D., Lipunova, G.,* On the appearance of non-local MRI in Keplerian accretion discs// Preprint arXiv:2210.15337v1 [astro-ph.HE].2022