

Исследование магнитных полей галактик с помощью RZ-модели

Е.А.Михайлов, В.В.Пушкарёв

МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Магнитные поля в галактиках

- ▶ В настоящее время практически нет сомнений, что ряд галактик обладает магнитными полями величиной несколько микрогаусс.
- ▶ С наблюдательной точки зрения, их существование подтверждается с помощью фарадеевского вращения.
- ▶ С теоретической точки зрения, генерация магнитного поля объясняется механизмом динамо (Arshakian et al. 2009).

Динамо

- ▶ Динамо связано с совместным действием дифференциального вращения и альфа-эффекта.
- ▶ Дифференциальное вращение преобразует полоидальную компоненту магнитного поля в тороидальную.
- ▶ Альфа-эффект преобразует тороидальное магнитное поле в полоидальное.
- ▶ Им противодействует турбулентная диффузия - поэтому эффект динамо является пороговым.

Уравнение Штеенбека - Краузе - Рэдлера

- ▶ Эволюция крупномасштабного магнитного поля описывается с помощью уравнения Штеенбека - Краузе - Рэдлера:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\alpha \mathbf{B}) + \text{rot}[\mathbf{v}, \mathbf{B}] + \eta \Delta \mathbf{B}$$

- ▶ Его явное решение оказывается достаточно сложным как с аналитической, так и с численной точки зрения.
- ▶ В связи с этим используются различные приближения.

Планарное приближение

- ▶ Одним из наиболее популярных подходов к исследованию магнитных полей в галактиках является планарное приближение (Moss 1995).
- ▶ Оно исходит из того, что галактический диск достаточно тонкий, поэтому можно заменить некоторые частные производные на алгебраические выражения.
- ▶ Тем не менее, в ряде случаев (например, при исследовании галактик с «толстыми» дисками) этого недостаточно, и необходимы другие модели.

RZ-модель

- ▶ Возникает необходимость рассмотрения модели, в рамках которой учитывается вертикальная структура поля.
- ▶ Ранее подобная модель (динамо в торе) была рассмотрена для внешних колец галактик (Михайлов 2017).
- ▶ Имеет смысл обобщить ее и для основной части галактики.

Представление для магнитного поля

- ▶ Представим магнитное поле в форме:

$$B = B\mathbf{e}_\varphi + \text{rot}(A\mathbf{e}_\varphi).$$

- ▶ B - тороидальное магнитное поле.
- ▶ A - тороидальная часть векторного потенциала.
- ▶ $B \gg |\text{rot}(A\mathbf{e}_\varphi)|$

Модель для альфа-эффекта

- ▶ Альфа-эффект характеризует закрученность турбулентных движений и имеет противоположные знаки в разных частях галактики.
- ▶ В простейшем случае можно использовать такую линейную модель:

$$\alpha = \alpha_0 \frac{z}{h};$$

- ▶ h - полутолщина галактического диска.

Уравнения RZ-модели



$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha_0 \frac{z}{h} B + \eta \Delta A;$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -r \frac{d\Omega}{dr} \frac{\partial A}{\partial z} + \eta \Delta B.$$

Безразмерные переменные

- ▶ Удобно рассматривать задачу в безразмерных переменных.
- ▶ Расстояния измеряются в единицах радиуса галактики R .
- ▶ Время измеряется в $\frac{h^2}{\eta}$.

Уравнения в безразмерных переменных

▶
$$\frac{\partial A}{\partial t} = R_1 z B + \lambda^2 \Delta A;$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = R_2 \frac{\partial A}{\partial z} + \lambda^2 \Delta B.$$

- ▶ R_1 характеризует альфа-эффект.
- ▶ R_2 связан с дифференциальным вращением.
- ▶ $\lambda = \frac{h}{R}$ характеризует полутолщину диска и диффузию в плоскости диска.
- ▶ Возможность роста характеризуется динамо-числом $D = R_1 R_2$. Рост поля возможен при $D > 13.5$.

Начальные и граничные условия

► При $t=0$

$$A = 0;$$

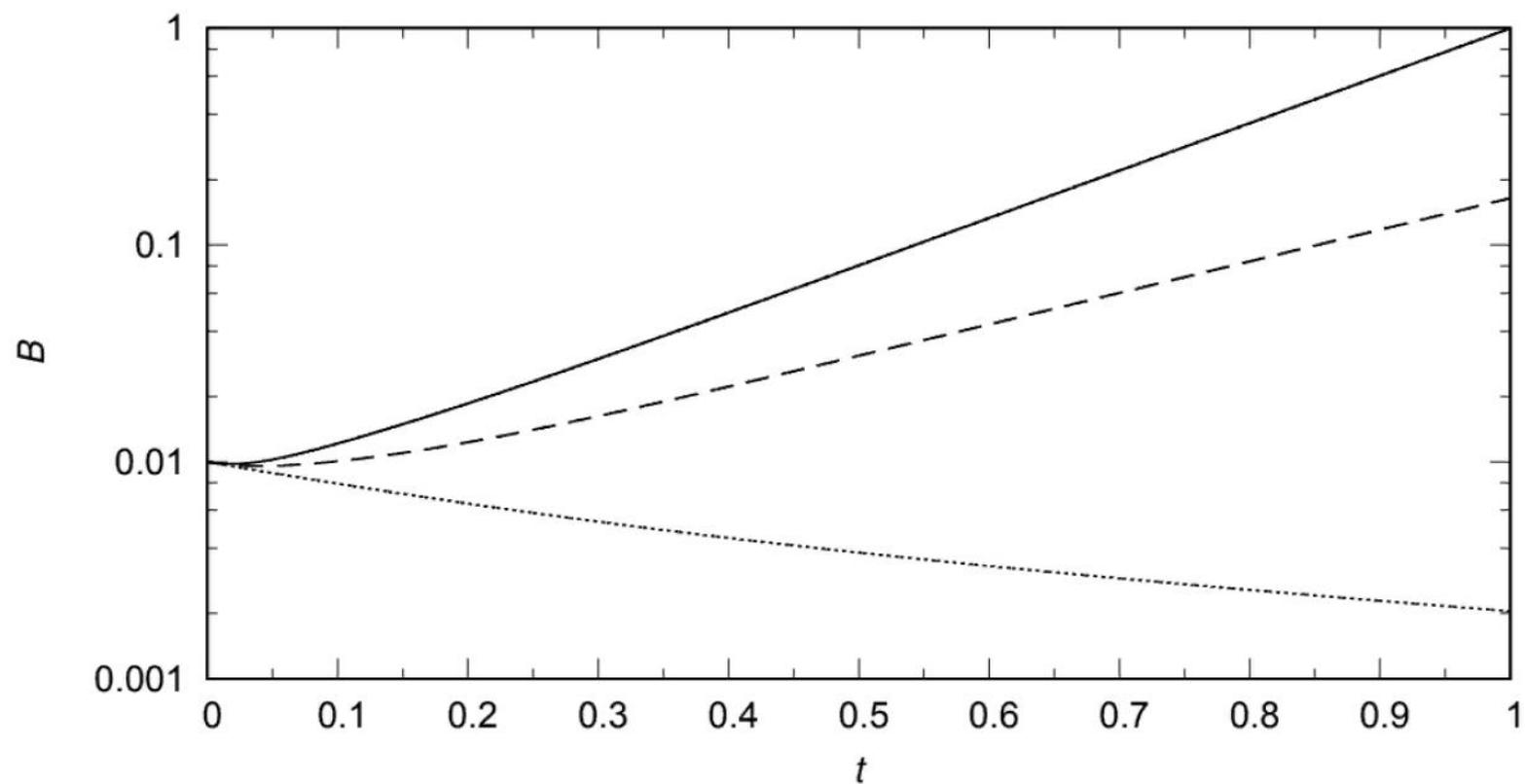
$$B = B_0 \sin(\pi z) \cos\left(\frac{\pi z}{2h}\right).$$

► На границе:

$$B = 0;$$

$$\frac{\partial A}{\partial r} = 0.$$

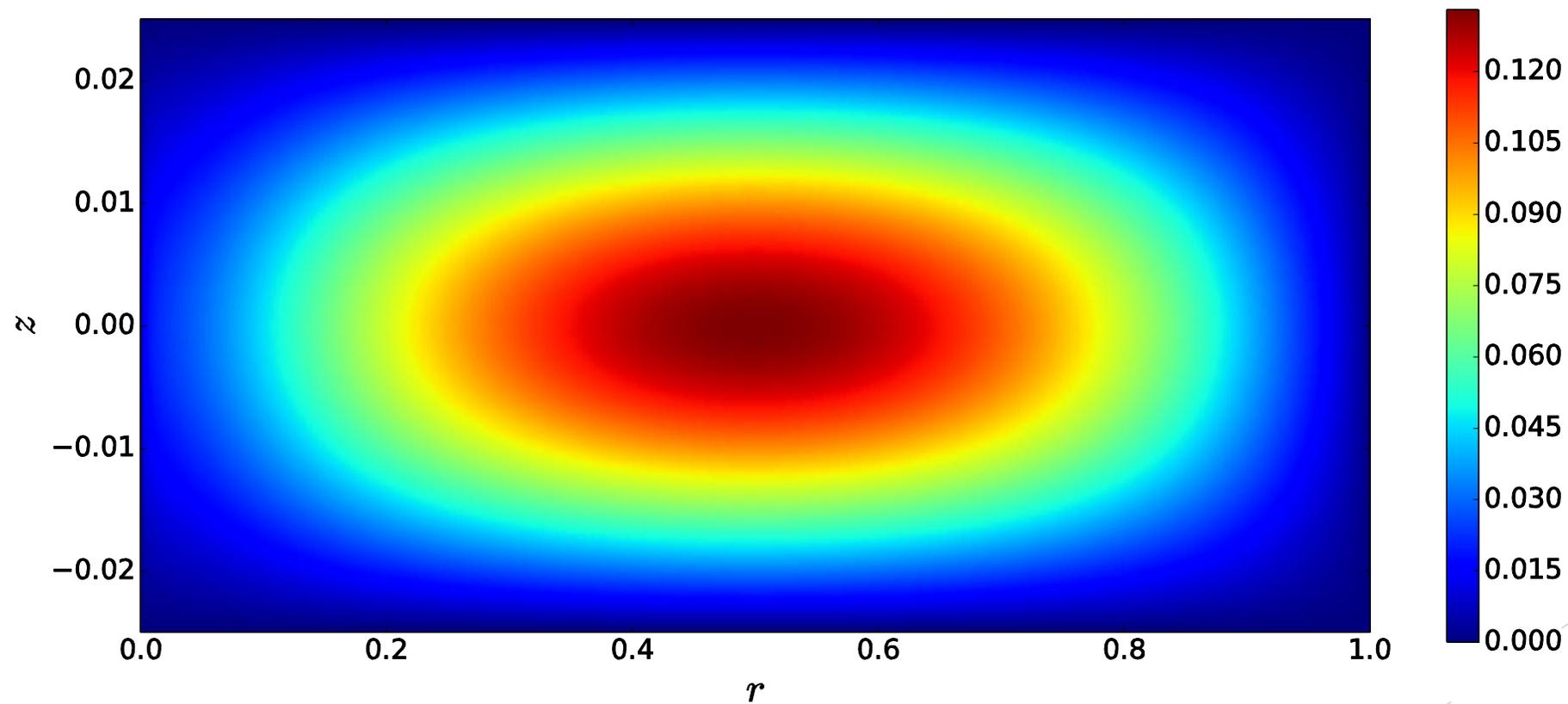
Зависимость магнитного поля от времени



Сплошная линия показывает $D=150$, пунктирная $D=80$, штриховая - $D=5$

(Mikhailov & Pushkarev 2019)

Пространственное распределение поля



Нелинейная модификация

- ▶ Рост магнитного поля обусловлен переходом энергии турбулентных движений в энергию магнитного поля, и не может продолжаться бесконечно.
- ▶ Это может быть учтено путем нелинейной модификации альфа-эффекта (B_{max} - поле равнораспределения):

$$R_1 \rightarrow R_1 \left(1 - \frac{B^2}{B_{max}^2} \right)$$

- ▶ Достаточно удобно измерять магнитные поля в единицах равнораспределения.

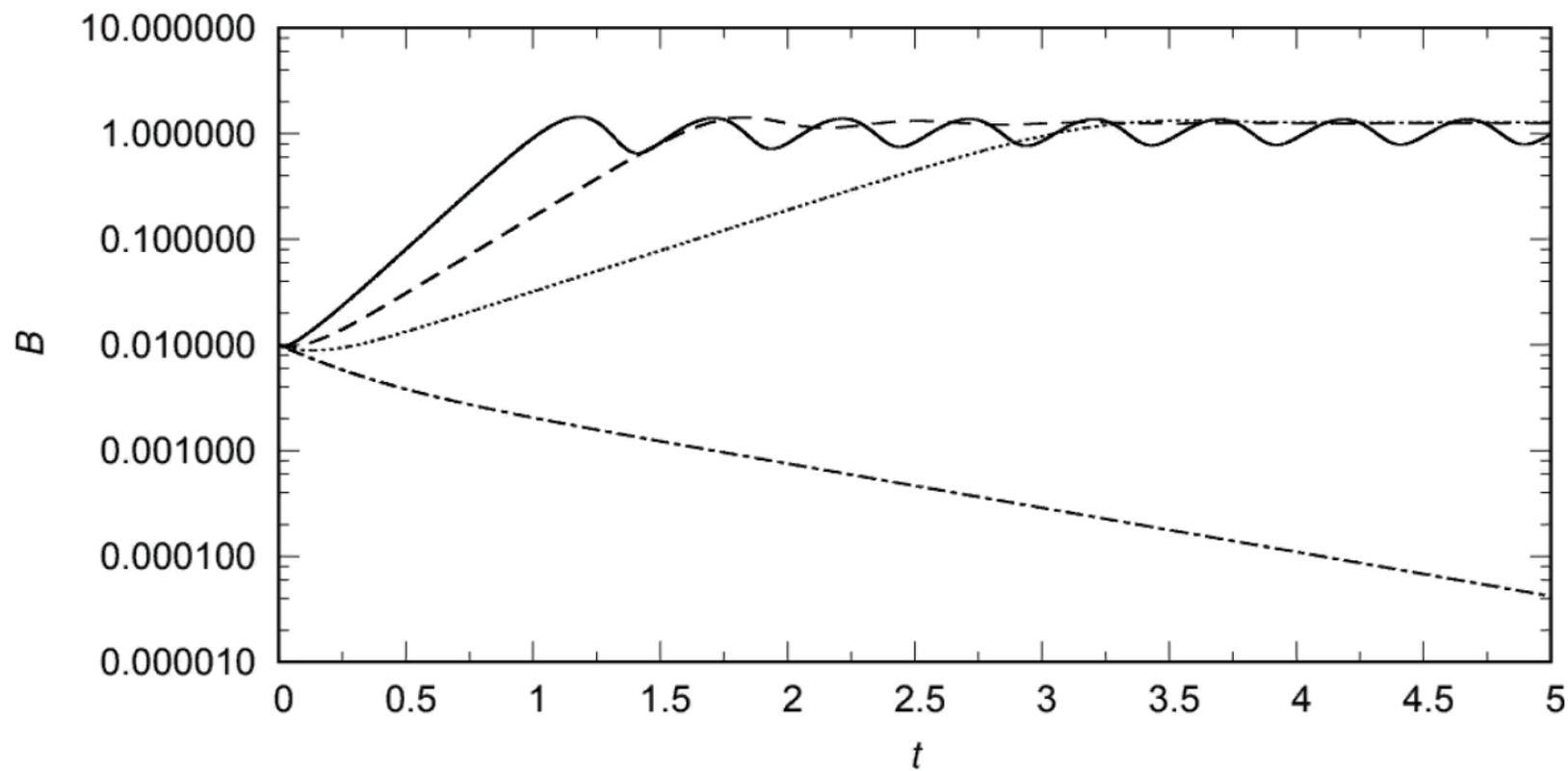
Уравнения для магнитного поля



$$\frac{\partial A}{\partial t} = R_1 z B (1 - B^2) + \lambda^2 \Delta A;$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = R_2 \frac{\partial A}{\partial z} + \lambda^2 \Delta B.$$

Магнитное поле в нелинейном случае



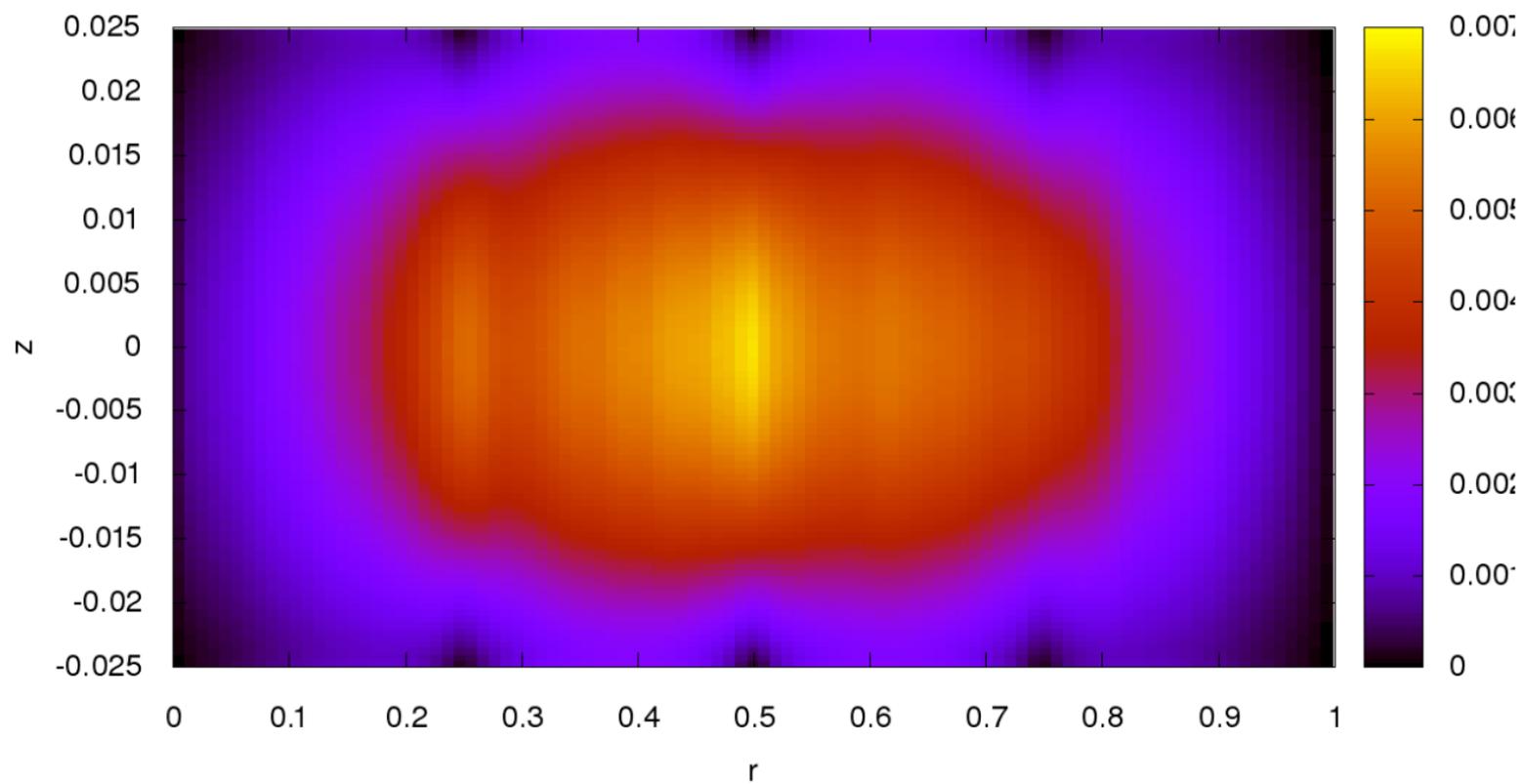
Сплошная линия показывает $D=150$, пунктирная $D=80$, штриховая - $D=5$

(Mikhailov & Pushkarev 2019)

Возможность учета вертикальных ПОТОКОВ

- ▶ В случае использования данной модели можно учитывать вертикальные потоки вещества.
- ▶ Они могут возникать, к примеру, при наличии в галактике звездообразования.
- ▶ Если области звездообразования занимают определенную часть, то из них будут возникать вертикальные потоки вещества.

Результаты моделирования



Заключение

- ▶ Представлена модель для магнитного поля с учетом вертикальной структуры.
- ▶ Показано, что она предусматривает как растущие, так и затухающие решения.
- ▶ Исследована зависимость магнитного поля от пространственных координат, изучено влияние вертикальных потоков, которые могут оказываться важными для изучения влияния звездообразования.

Литература

- ▶ T. Arshakian, R. Beck, M. Krause, D. Sokoloff, *Astron. Astrophys.* 494, 21 (2009).
- ▶ D. Moss, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 275, 191 (1995).
- ▶ Е.А.Михайлов, *Астрон. журн.* 94, 741 (2017).
- ▶ Е.А.Мikhailov, V.V.Pushkarev, *PAMIR Proc.*, 1, 53 (2019).

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**

The background features abstract, overlapping geometric shapes in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. These shapes are primarily located on the right side of the frame, creating a modern, layered effect against the white background.