

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 $t=0$

$$A = 0;$$

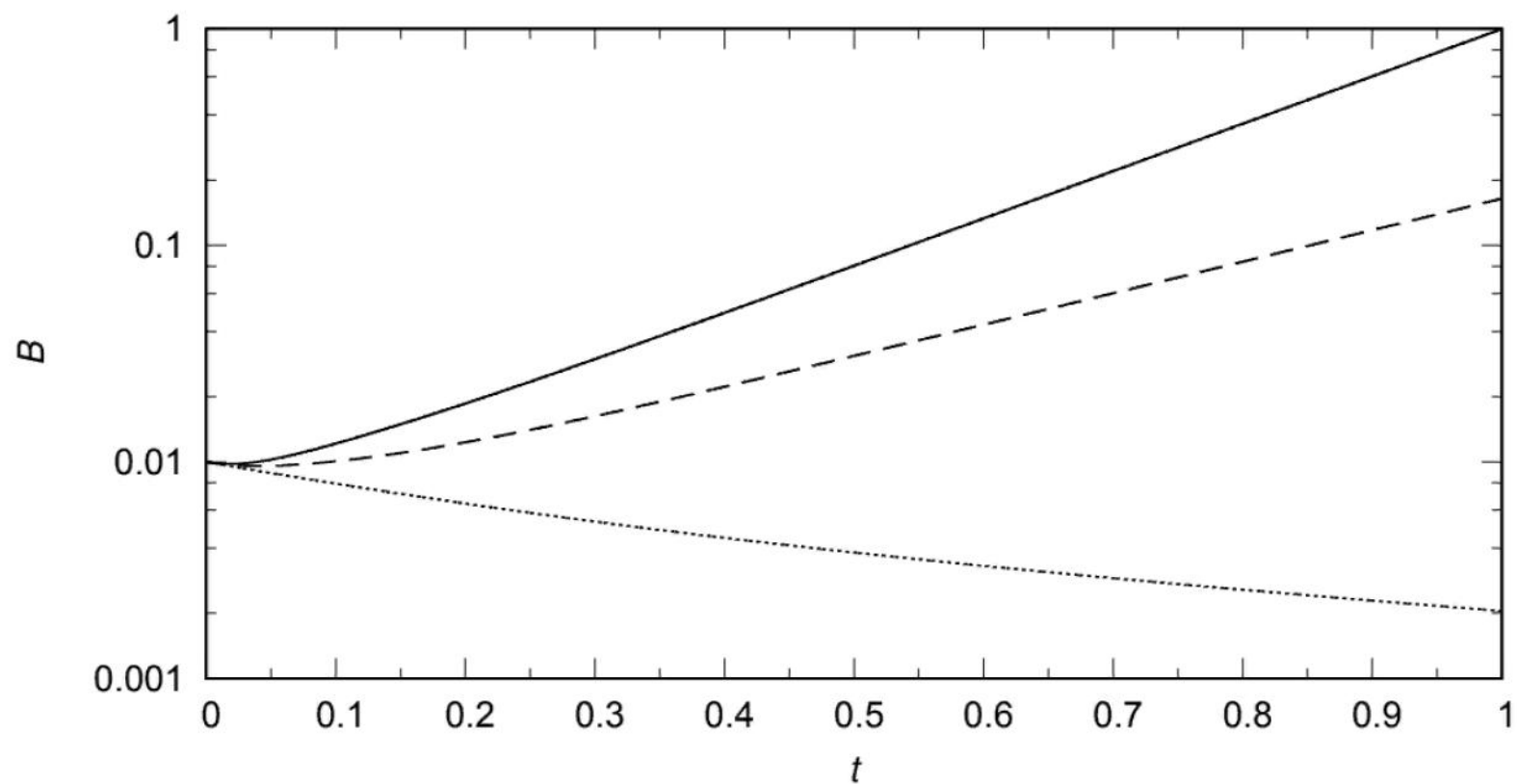
$$B = B_0 \sin(\pi z) \cos\left(\frac{\pi z}{2h}\right).$$

► На границе:

$$B = 0;$$

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

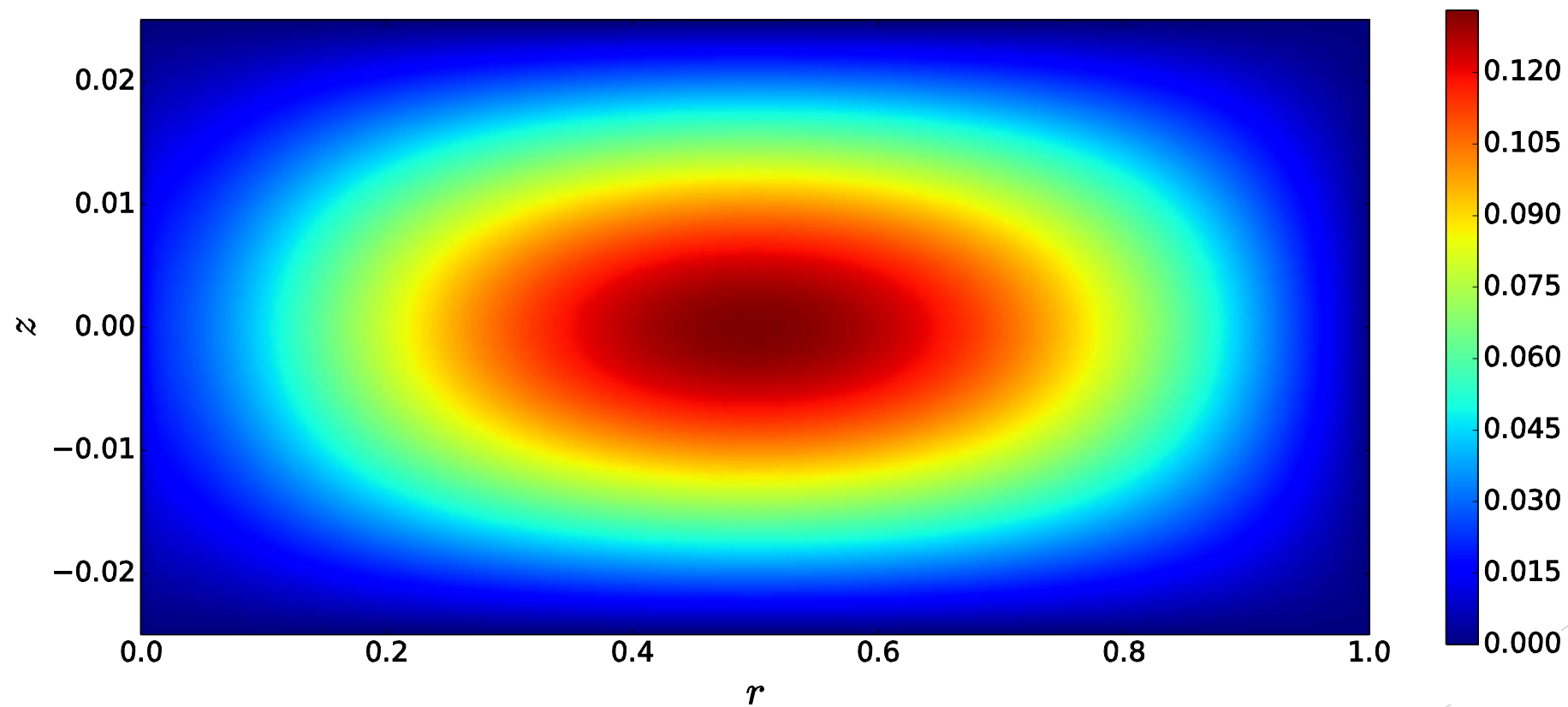
Зависимость магнитного поля от времени



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.

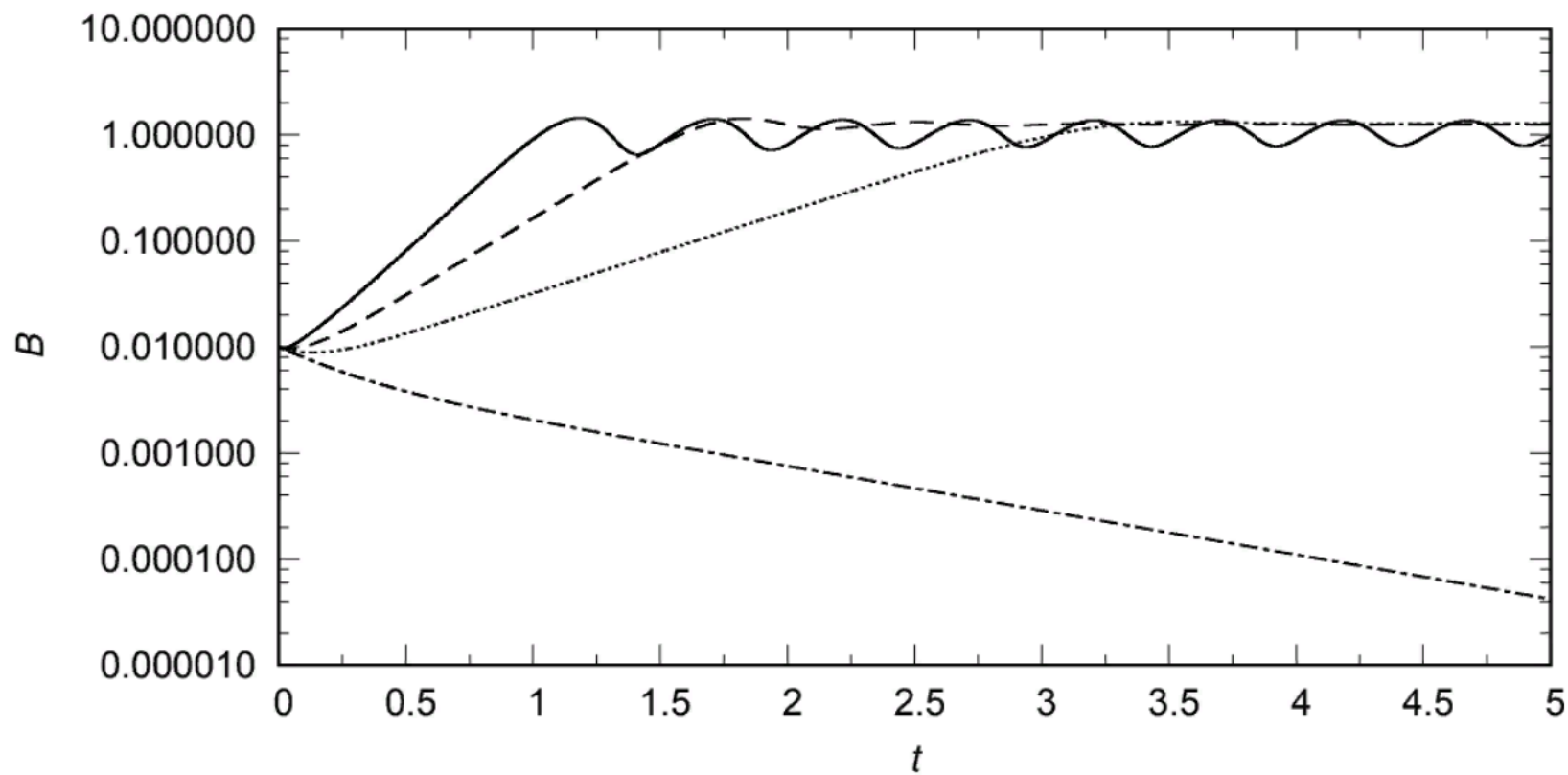
Уравнения для магнитного поля



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

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

Магнитное поле в нелинейном случае



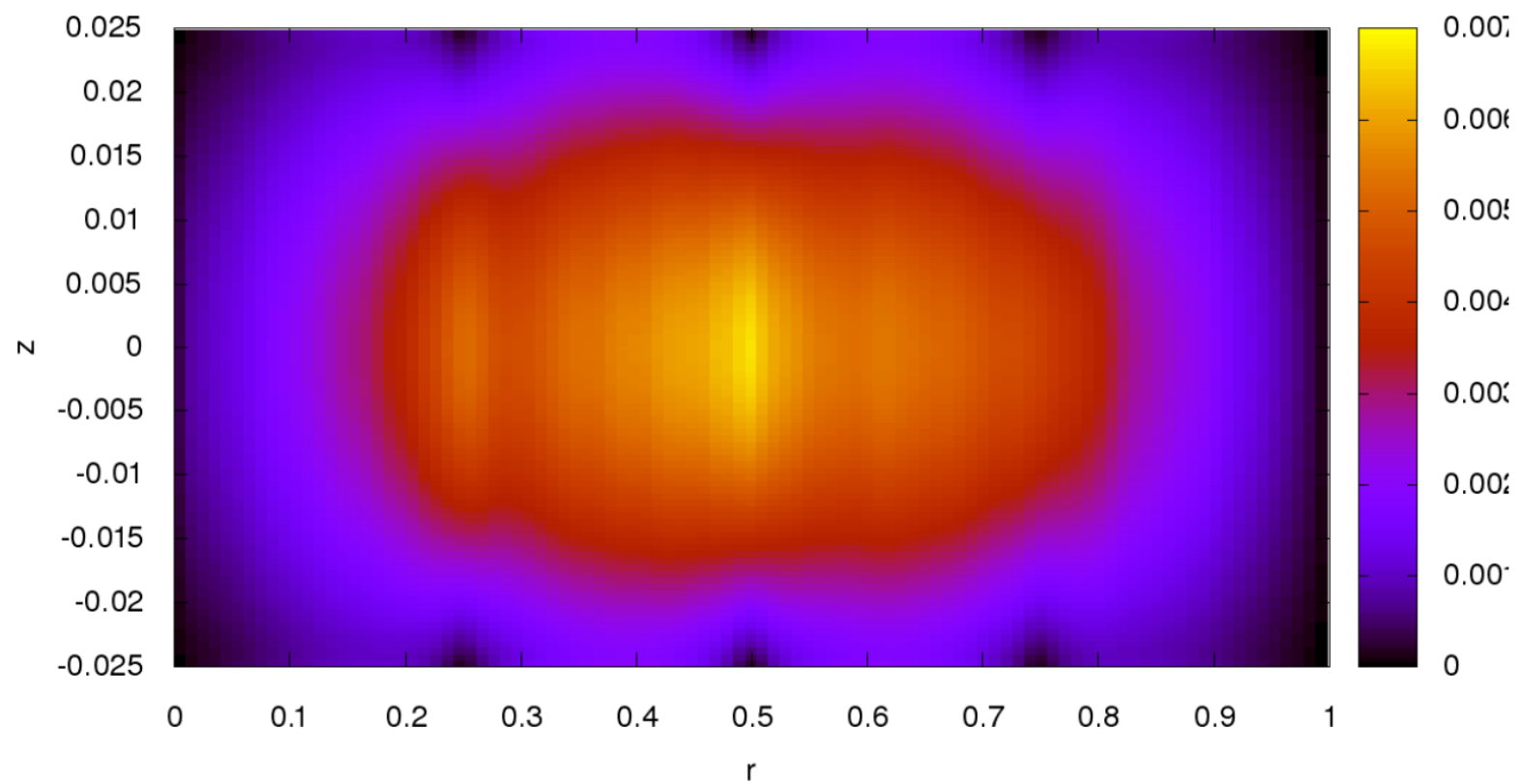
Сплошная линия показывает $D=150$, пунктирная $D=80$, штриховая - $D=5$

(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.Михайлов, V.V.Pushkarev, *PAMIR Proc.*, 1, 53 (2019).

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**