



Модель динамо в торе для исследования магнитных полей во внешних кольцах галактик

Е.А.Михайлов

Физический факультет МГУ



Галактические магнитные поля

- В основной части большого числа спиральных галактик присутствуют магнитные поля напряженностью несколько мкГс.
- Их генерация описывается с помощью так называемого механизма динамо, основанного на совместном действии дифференциального вращения и альфа-эффекта, характеризующего турбулентные движения межзвездной среды.



Внешние кольца

- Ряд галактик обладает внешними кольцами.
- В них также присутствуют турбулентные движения, поэтому можно ожидать, что там также будут генерироваться магнитные поля (Мосс и др. 2016).

Уравнение Штеенбека – Краузе – Рэдлера

- Эволюция крупномасштабной составляющей магнитного поля $\mathbf{B}$ описывается с помощью уравнения Штеенбека – Краузе – Рэдлера:

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

где α – коэффициент, характеризующий альфа-эффект, $\mathbf{V}$ – скорость крупномасштабных движений, η – коэффициент турбулентной диффузии.



Планарное приближение

- Как правило, в случае основной части галактики используется так называемое планарное приближение (Мосс 1995).
- Оно предполагает, что галактический диск достаточно тонкий, поэтому можно считать, что магнитное поле параллельно экваториальной плоскости.
- Частные производные в направлении, перпендикулярном к диску, заменяются на алгебраические выражения.

Уравнения планарного приближения

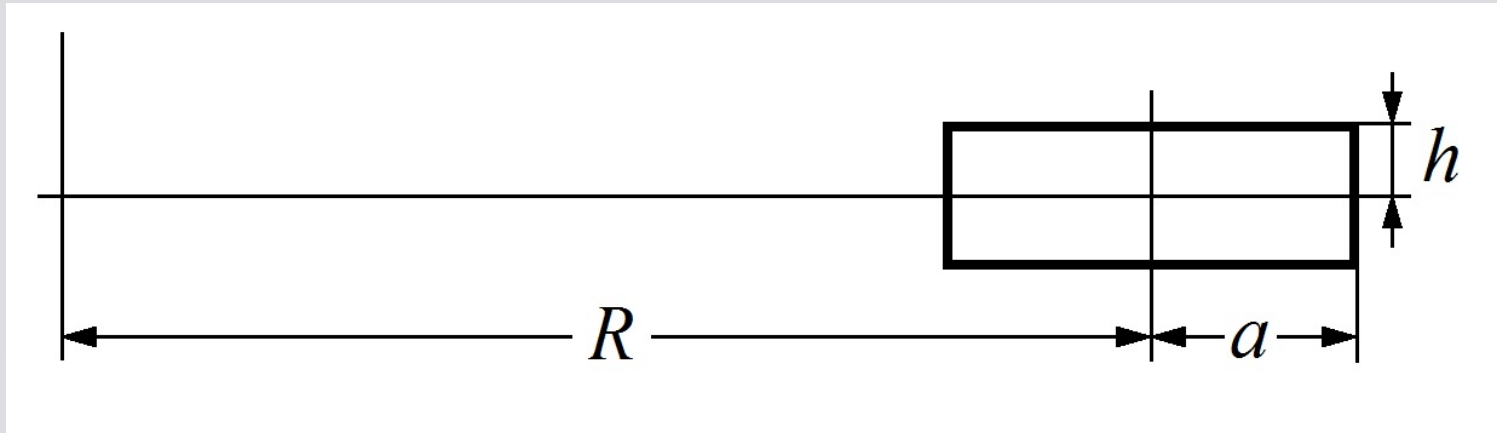
$$\frac{\partial B_r}{\partial t} = -\frac{\Omega l^2}{h^2} B_\varphi - \eta \frac{\pi^2}{4h^2} B_r + \eta \Delta_r B_r;$$

$$\frac{\partial B_\varphi}{\partial t} = -\Omega B_r - \eta \frac{\pi^2}{4h^2} B_\varphi + \eta \Delta_r B_\varphi;$$

где Ω – угловая скорость вращения галактики, h – ее полутолщина, $\eta = lv/3$ – коэффициент турбулентной диффузии (l – размер турбулентной ячейки, v – скорость турбулентных движений).

Планарное приближение для внешнего кольца

- Внешнее кольцо расположено на расстоянии R от центра галактики, имеет полуширину a и полутолщину h .



- Введем два коэффициента, характеризующие соотношения между ними:

$$k = \frac{a}{h}, \lambda = \frac{a}{R}.$$

Уравнения в безразмерном виде

- Уравнения можно записать в безразмерном виде (измеряя расстояния в R , а времена в a^2/η):

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} = -S_\alpha B_\varphi - \frac{\pi^2}{4} k^2 B_r + \lambda^2 \Delta_r B_r;$$

$$\frac{\partial B_\varphi}{\partial t} = -S_\omega B_r - \frac{\pi^2}{4} k^2 B_\varphi + \lambda^2 \Delta_r B_\varphi;$$

где $S_\alpha = \frac{3\Omega l a^2}{v h^2}$ характеризует альфа-эффект, $S_\omega = \frac{3\Omega a^2}{l v}$ - дифференциальное вращение.

Возможность генерации магнитного поля

- Можно составить безразмерное число, характеризующее возможность генерации магнитного поля:

$$Q = \frac{S_\alpha S_\omega}{(1 + k^2)^2}.$$

- Генерация магнитного поля возможна в случае, если:

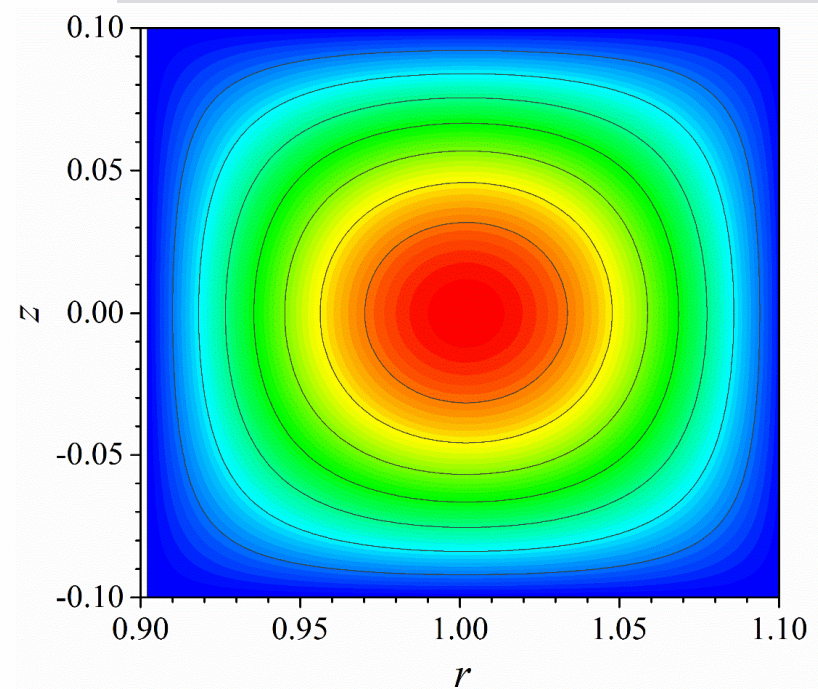
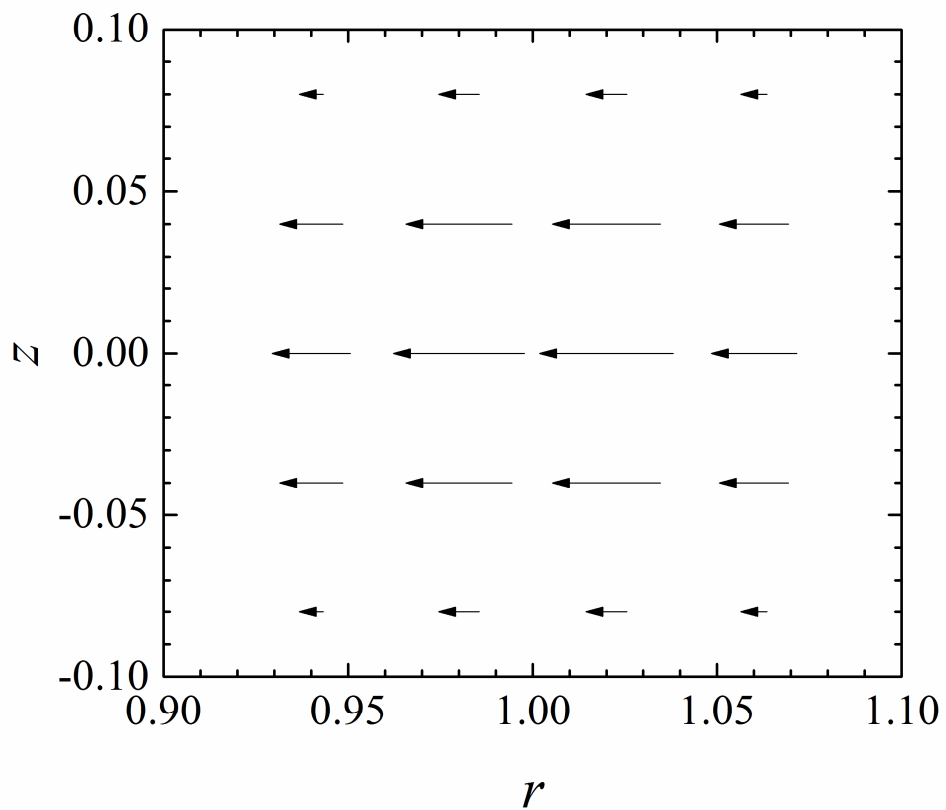
$$Q > Q_{cr} \approx 7.$$

- Так, если $k = 1$, то генерация поля возможна в случае, если

$$S_\alpha S_\omega > 28.$$

- В любом случае возможна генерация лишь квадрупольного поля.

Характерная структура магнитного поля ($S_\alpha = 2, S_\omega = 15, k = 1$).





Недостаточность планарного приближения

- Планарное приближение неявно предполагает, что полутолщина внешнего кольца заметно меньше, чем его полуширина (и случай $k \sim 1$ не вполне корректен).
- В связи с этим разумно рассмотреть модель динамо в торе, которая может описывать процесс генерации поля более аккуратно.

Основные предпосылки

- Будем искать магнитное поле в виде следующей комбинации (Дейнцер и др. 1993):

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

- Кроме этого, будем полагать для альфа-эффекта:

$$\alpha = \alpha_0 \frac{z}{a}.$$



Основные уравнения

- Основные уравнения для магнитного поля выглядят так:

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

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

Безразмерная форма уравнений

- Используя те же безразмерные единицы измерений, можно получить следующие уравнения

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

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

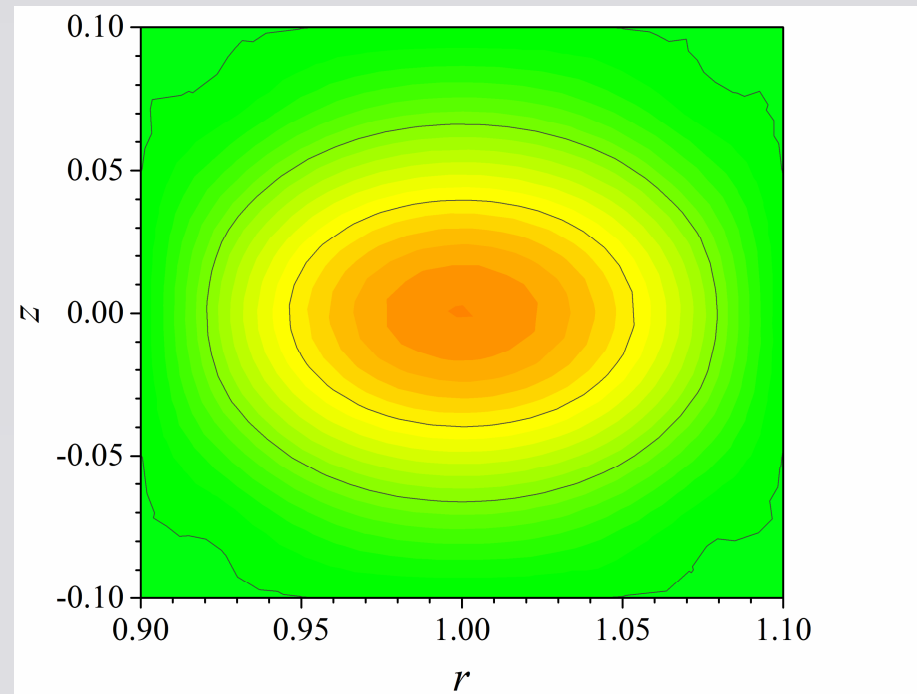
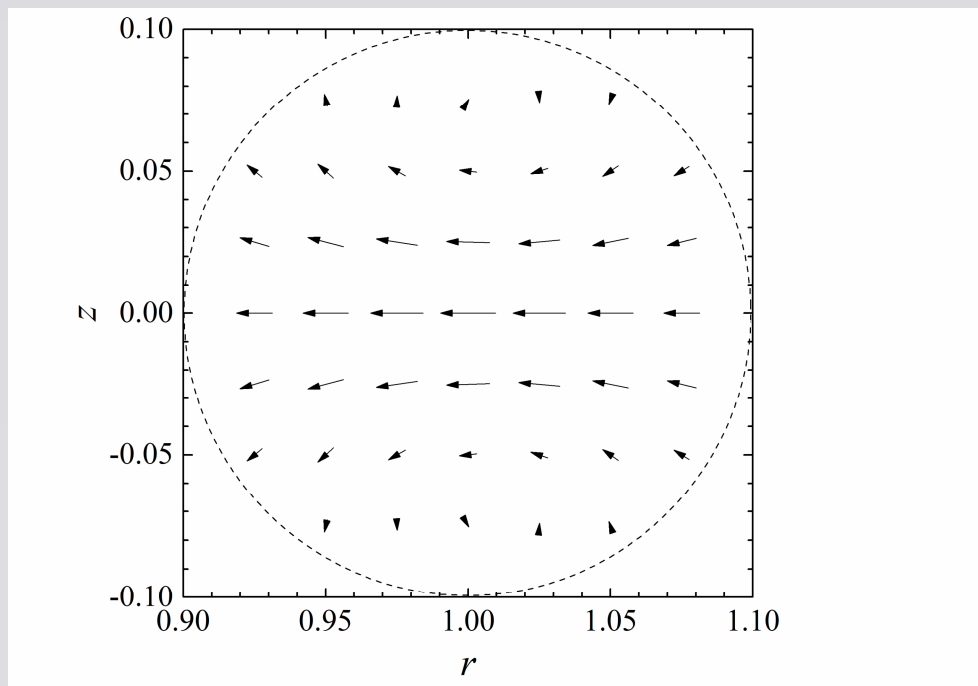
где $R_1 = \frac{3\alpha_0 a}{lv}$ характеризует альфа-эффект, $R_2 = -\frac{3(d\Omega/dr)a^2 R}{lv}$ - дифференциальное вращение.



Порог генерации магнитного поля

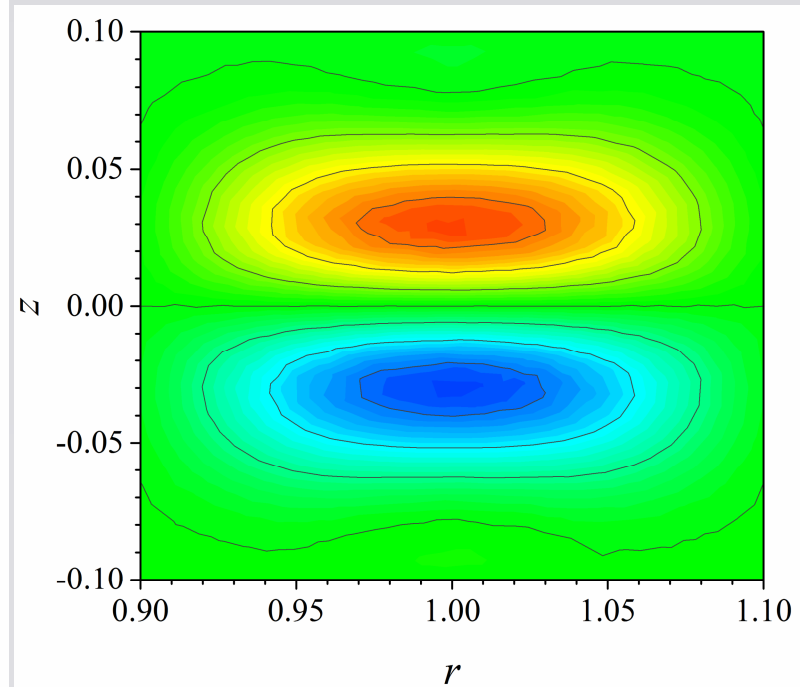
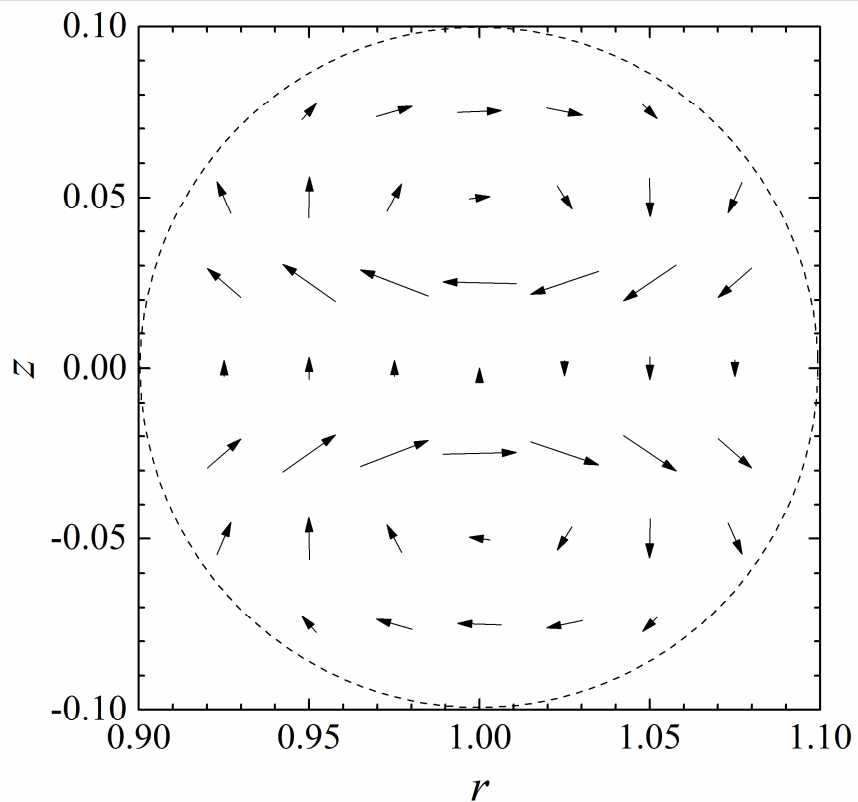
- Возможность генерации магнитного поля характеризуется числом:
$$Q = R_1 R_2.$$
- В случае положительных Q магнитное поле генерируется при $Q > 42$.
- При $Q > 1190$ может генерироваться магнитное поле как квадрупольной, так и дипольной симметрии.

Характерная структура магнитного поля ($R_1 = 3, R_2 = 30$).



(Михайлов, 2017)

Характерная структура магнитного поля ($R_1 = 3, R_2 = 400$).



(Михайлов, 2017)



Заключение

- Был исследован процесс генерации магнитных полей во внешних кольцах галактик с точки зрения двух различных моделей: планарного приближения и модели динамо в торе.
- Получены пороговые значения для управляющих параметров динамо, которые характеризуют растущие решения. Показано, в каких случаях возможна генерация магнитных полей квадрупольной, а в каких – дипольной симметрии.
- Планарное приближение удобно для описания магнитных полей в «плоских» торах, модель динамо в торе – в «толстых».



Литература

- D. Moss, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 275, 191 (1995).
- W. Deinzer, H. Grosser, and D. Schmitt, Astron. and Astrophys. 273, 405 (1993).
- D. Moss, E. Mikhailov, O. Sil'chenko, D. Sokoloff, C. Horellou, and R. Beck, Astron. and Astrophys. 592, id. A44 (2016).
- Е.А.Михайлов. Астрон. журн. (2017, в печати)



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!