

# Влияние звездообразования на крупномасштабные структуры галактического магнитного поля

В. В. Пушкарёв и Е. А. Михайлов

МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет

## Введение

При исследовании магнитных полей галактик в большинстве случаев считается, что характеристики межзвездной среды слабо различаются в пределах галактического диска и не меняются с течением времени, а потому управляющие параметры модели, описывающей генерацию магнитного поля, также считаются постоянными. Однако во многих галактиках происходят разнообразные активные процессы, такие как звездообразование, взрывы сверхновых и другие явления, сильно изменяющие свойства межзвездного газа. Наличие областей с различными характеристиками необходимо учитывать при задании управляющих параметров модели. Эволюцию магнитного поля таких галактик можно моделировать с помощью модели со случайными коэффициентами [2].

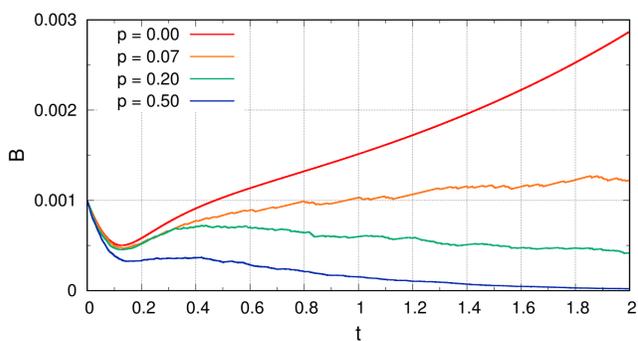


Рис. 1: Зависимость модуля напряжённости магнитного поля  $B$  от времени для различных значений вероятности  $p$

## Основные уравнения галактического динамо

Генерация крупномасштабных магнитных полей галактик может быть описана с помощью механизма динамо [1], включающего в себя три основных эффекта:

- дифференциальное вращение;
- альфа – эффект;
- турбулентная диффузия.

В общем случае поведение галактического магнитного поля описывается уравнением Штеенбека – Краузе – Рэдлера:

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

Мы использовали так называемое планарное приближение [3], в рамках которого считается, что магнитное поле лежит в экваториальной плоскости. Тогда, заменяя некоторые производные алгебраическими выражениями и учитывая, что мы рассматриваем большие расстояния до центра галактики, уравнения сводятся к следующей системе:

$$\begin{cases} \frac{\partial B_r}{\partial t} = -R_\alpha B_\varphi - k B_r + \lambda^2 \Delta B_r \\ \frac{\partial B_\varphi}{\partial t} = -R_\omega B_r - k B_\varphi + \lambda^2 \Delta B_\varphi \end{cases}$$

где  $R_\alpha$  характеризует альфа-эффект,  $R_\omega$  — дифференциальное вращение,  $\lambda$  — полутолщину диска,  $k$  — диссипацию поля в направлении, перпендикулярном к плоскости диска.

Мы считаем, что расстояния измеряются в безразмерных единицах, соответствующих радиусу галактики, а времена — в единицах  $h^2/\eta$ , где  $h$  — полутолщина галактического диска,  $\eta$  — коэффициент турбулентной вязкости. Так, для галактики с размерами Млечного Пути единица расстояния составляет 10 кпк, а единица времени —  $7 \cdot 10^8$  лет [1].

Конечно, магнитное поле зависит как от расстояния до центра галактики  $r$ , так и от азимутального угла  $\varphi$ . Тем не менее, все основные эффекты могут быть воспроизведены в пространственно-одномерном приближении, в рамках которого считается, что магнитное поле зависит только от  $r$ , а расстояние до центра галактики достаточно велико. Это обеспечивается тем, что ввиду вращения галактики все угловые неоднородности достаточно быстро размываются.

Предполагается, что коэффициент  $k$  может принимать два разных значения —  $k_1 = 7,5$  и  $k_2 = 2,5$ , которые характеризуют турбулентные движения в межзвездной среде в областях НП, соответствующих активному звездообразованию, и областях ПН, соответствующих "спокойной" межзвездной среде.

Это реализуется следующим образом. Галактика разбивается на кольца шириной 0,1 безразмерных единиц. Предполагается, что в течение короткого промежутка времени длительностью  $\Delta t = 0,01$  значение  $k$  в пределах данного кольца постоянно и описывается с помощью формулы:

$$k = \begin{cases} 7,5 & \text{с вероятностью } p; \\ 2,5 & \text{с вероятностью } (1 - p). \end{cases}$$

Затем значение  $k$  для каждого кольца обновляется.

Начальные значения задаются так:

$$B(0, r) = B_0 \sin(\pi r).$$

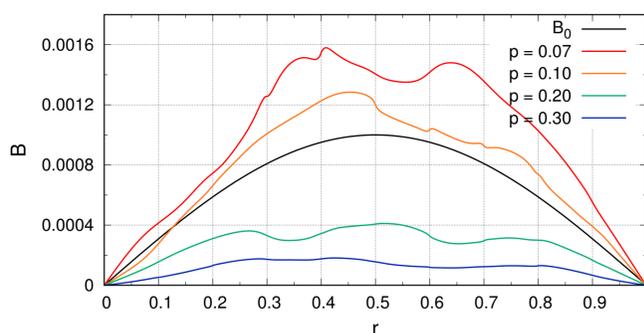


Рис. 2: Зависимость  $B$  от координаты для различных значений  $p$ ;  $t = 2,0$

$p$	$\lambda_0$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
0,0	0,660	0,660	0,660
0,1	0,157	0,160	0,161
0,2	-0,349	-0,341	-0,340
0,5	-1,85	-1,84	-1,84

Табл. 1: Скорости роста статистических моментов магнитного поля для различных значений  $p$

## Результаты моделирования

Проведены расчёты эволюции галактического магнитного поля при различных значениях вероятности  $p$  (см. рис. 1). Интересна зависимость напряжённости магнитного поля от координаты (рис. 2).

Задача демонстрирует эффект перемежаемости [4], состоящий в том, что старшие моменты решения растут быстрее младших (см. рис. 3), т.е. скорость роста среднего магнитного поля  $\lambda_1$  выше, чем скорость роста типичной реализации  $\lambda_0$ , а среднеквадратичного поля  $\lambda_2$  выше, чем среднего поля. Скорости роста при различных  $p$  приведены в таблице 1.

Установлено, что устойчивый рост магнитного поля наблюдается при  $p < 0,13$ .

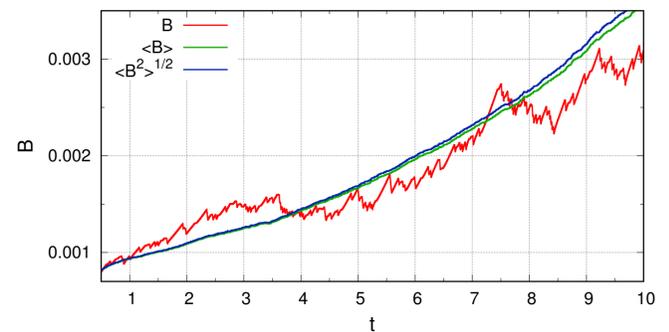


Рис. 3: Зависимость типичного решения и статистических моментов от времени при  $p = 0,1$

## Связь со звездообразованием

Построенная модель может быть использована для оценки влияния звездообразования на галактическое магнитное поле. Области звездообразования имеют относительно небольшой размер, а их расположение может считаться случайным. Вероятность  $p$ , использованную выше, можно связать с поверхностной плотностью звездообразования следующим образом [2]:

$$p \approx 12\Sigma$$

(предполагается, что интенсивность звездообразования измеряется в  $M_\odot/\text{кпк}^2 \cdot \text{год}$ ).

Таким образом, устойчивый рост магнитного поля возможен, если  $\Sigma < 0,011 M_\odot/\text{кпк}^2 \cdot \text{год}$ .

Полученный результат хорошо согласуется с предыдущими работами на рассматриваемую тему, которые основываются на более простых предположениях [2, 5].

## Заключение

Показано, что влияние флуктуаций на поведение магнитного поля имеет пороговый характер. Небольшие флуктуации (малые значения вероятности  $p$ ) только немного возмущают зависимость решения от времени, но если они превосходят определённые пороговые значения, рост сменяется затуханием.

С учетом взаимосвязи нашей модели со звездообразованием, можно заключить, что интенсивное звездообразование приводит к разрушению крупномасштабных структур магнитного поля.

## Литература

- [1] Arshakian T., Beck R., Krause M., Sokoloff D. A&A 2009, 494, 21
- [2] Mikhailov E. A., Modyaev I. I. Balt. Astron. 2015, 24, 194
- [3] Moss D. MNRAS 1995, 275, 191
- [4] Зельдович Я. Б., Молчанов С. А., Рузмайкин А. А., Соколов Д. Д. УФН 1987, 152, 1, 3
- [5] Михайлов Е. А., Пушкарёв В. В. Выч. мет. и прогр. 2016, 17, 351