

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].

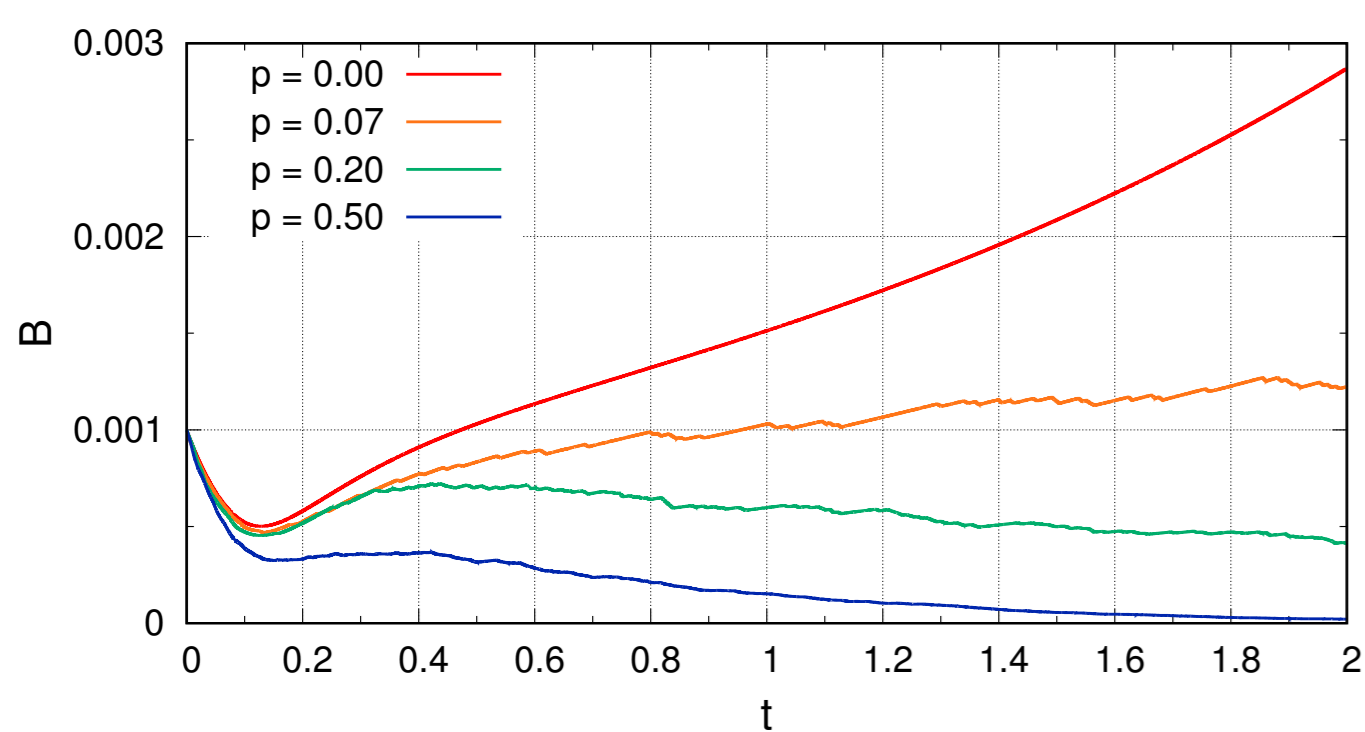


Рис. 1: Зависимость модуля напряжённости магнитного поля B от времени для различных значений вероятности p

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_α характеризует альфа-эффект, R_ω — дифференциальное вращение, λ — 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/η , где h — полутолщина галактического диска, η — 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 φ . 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:

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

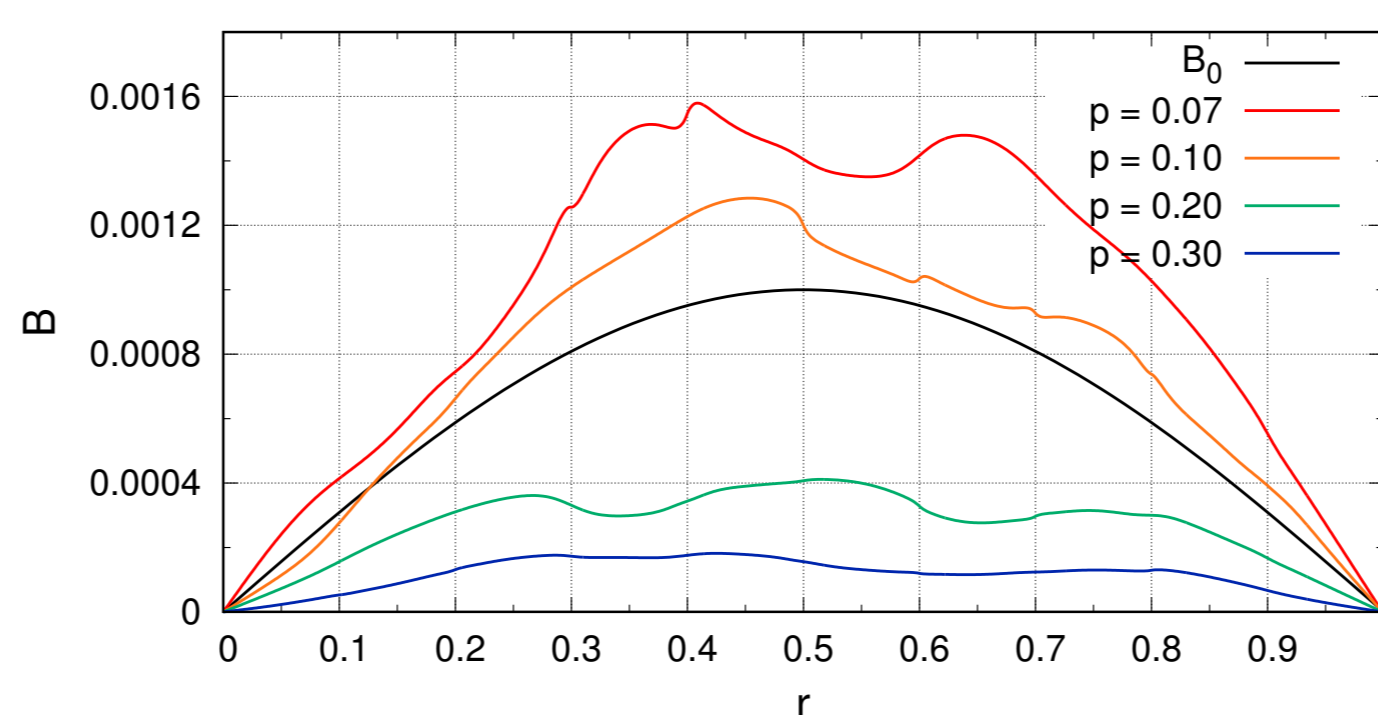


Рис. 2: Зависимость B от координаты для различных значений p ; $t = 2,0$

p	λ_0	λ_1	λ_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 λ_1 выше, чем скорость роста типичной реализации λ_0 , а среднеквадратичного поля λ_2 выше, чем среднего поля. Скорости роста при различных p приведены в таблице 1.

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

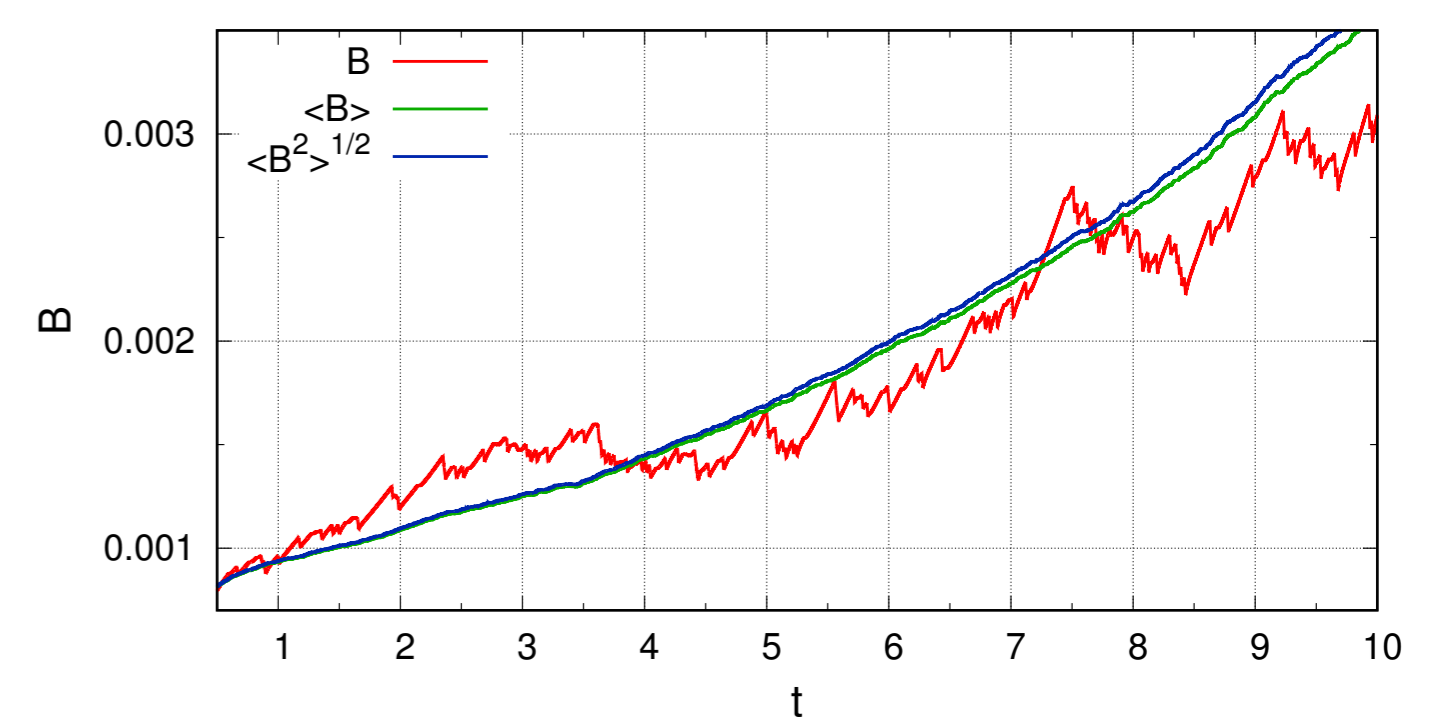


Рис. 3: Зависимость типичного решения и статистических моментов от времени при $p = 0,1$

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