

УДК 537.84

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЛАСТЕЙ ИНВЕРСИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИКАХ

А. А. Быков, В. Ю. Попов

(кафедра математики)

В некоторых спиральных галактиках наблюдаются так называемые области инверсии магнитного поля, внутри которых направление поля противоположно направлению в прилегающих областях. Вследствие дифференциального вращения области инверсии должны были бы вытягиваться, истончаться и в конце концов исчезать. В настоящей работе показано, что существование стабильных областей инверсии можно объяснить модуляциями уровня насыщения генерации в спиральных рукавах.

Введение

В соответствии с современными представлениями магнитное поле в спиральных галактиках образуется из затравочного поля в процессе галактического динамо [1–3]. На поздней стадии напряженность достигает определенного уровня насыщения, который соответствует балансу энергии магнитного поля и кинетической энергии турбулентного движения вещества. В результате образуются обширные области, в которых направление магнитного поля постоянно, а напряженность близка к уровню насыщения. В некоторых спиральных галактиках, например М51 и М81, наблюдаются долгоживущие области инверсии, в которых направление магнитного поля противоположно направлению в прилегающих областях [4, 5]. Каждая область инверсии отделена узким переходным слоем (ПС), внутри которого поле меняет направление на противоположное и поэтому характеризуется большим градиентом напряженности. Возникновение областей инверсии можно объяснить случайными флуктуациями затравочного поля в момент формирования галактики или взаимодействием с другими галактиками в настоящее время. Вследствие дифференциального вращения материи область инверсии должна была бы закручиваться, вытягиваться и истончаться. В конце концов область инверсии должна разрушиться, как только ее толщина станет сравнимой с толщиной ПС.

Наша цель состоит в объяснении существования стабильных областей инверсии, которые не разрушаются дифференциальным вращением. Для этого мы используем выдвинутую в работе [5] гипотезу о том, что уровень насыщения магнитного поля в процессе галактического динамо модулируется спиральными рукавами, которые представляют собой волны плотности материи, движущиеся с постоянной угловой скоростью в плоскости диска (средняя плотность энергии турбулентного движения также изменяется, что и приводит к изменению уровня насыщения). За счет этого возникает дрейф ПС, вызванный совместным действием генерации, диффузии магнитного поля и насыщения. Область инверсии как бы захватывается спиральными рукавами и отрывается от дифференциально вращающейся материи. Схематично это изображено на рис. 1. Используемая

модель предполагает, что стабильные области инверсии могут существовать в окрестности линии коротации (окружность, на которой скорость вращения вещества совпадает со скоростью движения рукавов). При удалении от линии коротации скорость движения вещества относительно галактических рукавов по модулю возрастает, поэтому ширина области инверсии вдоль радиального направления определяется максимально возможной скоростью дрейфа ПС относительно вещества.

Эволюция области инверсии определяется в основном тремя эффектами: дрейфом ПС за счет диффузии магнитного поля, неоднородностью уровня насыщения и формой ПС. Настоящая работа продолжает работу [6], в которой были получены оценки времени жизни области инверсии для случая однородного уровня насыщения, когда разрушение происходит за счет диффузии. Мы покажем, что эффекты, связанные с неоднородностью уровня насыщения, можно исследовать в рамках одномерной модели,

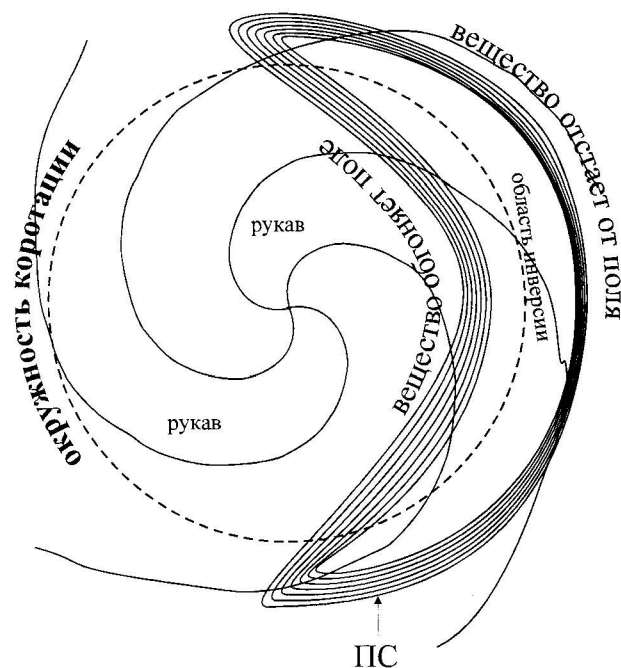


Рис. 1. Механизм образования устойчивой области инверсии магнитного поля в спиральной галактике

в которой рассматривается только дрейф ПС в направлении поперек галактических рукавов, и получим оценку максимальной относительной скорости дрейфа ПС, которая определяет максимальный размер области инверсии в направлении поперек магнитных рукавов. Эта оценка согласуется с результатами наблюдений.

1. Одномерная модель магнитного поля в спиральных галактиках

В приближении тонкого галактического диска [2] вектор магнитного поля может быть представлен в виде $\mathbf{B} = \mathbf{b}(r, z)u(r, \phi, t)$. Векторная функция $\mathbf{b}(r, z)$ задает направление магнитного поля и определяется скоростью дифференциального вращения и параметрами турбулентного движения вещества, ее можно считать известной. Скалярная функция $u(r, \phi, t)$ задает амплитуду поля и определяется из уравнения эволюции магнитного поля в галактике, представляющего собой нелинейное нестационарное уравнение диффузии с переносом, генерацией и насыщением [2]. Введем криволинейную систему координат x, y в плоскости диска, вращающуюся с угловой скоростью галактических рукавов. Выберем направление оси x поперек галактических рукавов и направление оси y вдоль рукавов (см. рис. 1), то в большей ее части, исключая области, прилегающие к двум концам (эти области в данной работе мы не рассматриваем), производными u по y можно пренебречь и записать это уравнение в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + V \frac{\partial u}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \gamma(u)u, \quad (1)$$

где λ — коэффициент диффузии, $V = V_x$ — относительная скорость вещества вдоль координаты x , член $\gamma(u)u$ описывает генерацию, $\gamma(u) = \gamma_0 [1 - (u(x, t)/U(x))^2]$, γ_0 — коэффициент генерации в приближении малого поля, $U(x, t)$ — уровень насыщения, при превышении которого генерация сменяется диссипацией. Заметим, что компонента скорости V_y в данном приближении не играет роли на удалении от концов области инверсии.

Для типичных галактик (например, M51 и M81) $\lambda \approx 0,16$ и коэффициент генерации γ_0 порядка нескольких единиц [3–6], если измерять время в миллиардах лет, а расстояние в килопарсеках. При этом характерная толщина переходного слоя $\Pi = \sqrt{\lambda/\gamma_0}$ равна примерно 0,2 кпк, что на два порядка меньше радиуса галактического диска, который для типичных галактик составляет примерно 20 кпк.

Вообще говоря, коэффициенты уравнения (1) зависят от x . При перемещении вдоль этой координаты происходит последовательное пересечение рукава — межу рукавного пространства — следующего рукава и т. д. и одновременное удаление от центра. Учитывая, что рукава магнитного поля сильно закручены (угол закрутки составляет $12^\circ \div 16^\circ$), а поперечный размер рукава в области коротации меньше радиуса

галактического диска, для описания поведения решения в окрестности области коротации можно рассмотреть задачу с периодическими функциями $u(x, t)$ и $U(x)$. Для получения простой оценки размеров области инверсии используем периодическую функцию $U(x)$ с периодом D , принимающую два значения U_a и U_b : $U(x) = U_a$, $0 < x < d$, и $U(x) = U_b$, $d \leq x \leq D$, $U(x + D) = U(x)$, $0 < d < D$. Область инверсии стабильна, если существует стационарное ($\partial/\partial t = 0$) решение уравнения (1), которое меняет свой знак на протяжении периода. Можно заметить, что для любой скорости вещества V существует знакопостоянное решение уравнения

$$V \frac{\partial u}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \gamma_0 u \left[1 - \left(\frac{u}{U} \right)^2 \right], \quad (2)$$

но знакопеременное решение существует только для достаточно малых V . Получим оценку для максимально допустимого значения V . Пусть в пределах одного периода решения находится один ПС и область инверсии занимает ровно один период U . На рис. 2 показан профиль $U(x)$ при $0 < x < 4D$ и предполагаемый вид решения задачи (2). Для получения оценки V умножим (2) на $\partial u/\partial x$ и проинтегрируем в пределах $x_{\min}^{(n)} < x < x_{\max}^{(n+2)}$. В результате получим выражение для скорости вещества:

$$V = \left[\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dx \right]^{-1} \gamma_0 \frac{U_b^2 - U_a^2}{4U_a^2 U_b^2} [u^4(D) - u^4(d)]. \quad (3)$$

Недостаток этой формулы в том, что она включает неизвестные значения $u(D)$ и $u(d)$.

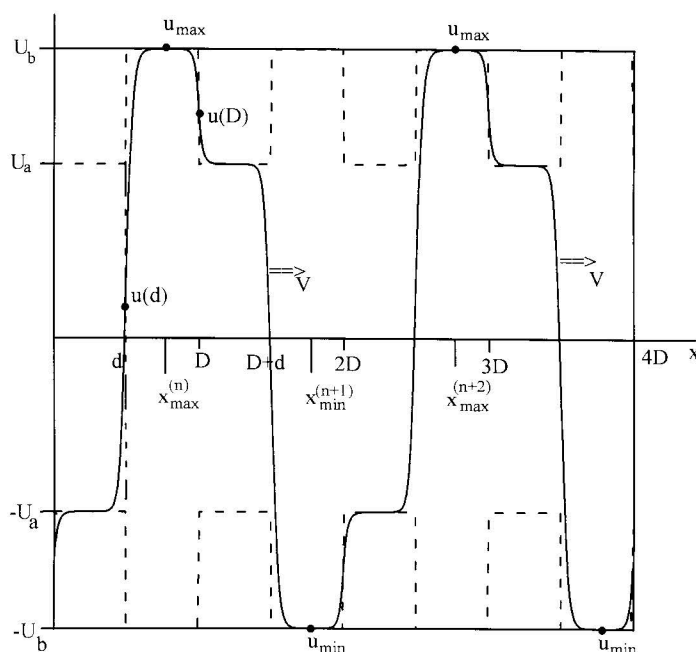


Рис. 2. График периодической функции насыщения $U(x)$ (пунктирная линия) в пределах четырех периодов, $0 < x < 4D$, и предполагаемый вид решения с областями инверсии (сплошная линия)

2. Малая глубина модуляции уровня насыщения

Получим приближенное выражение для максимальной относительной скорости при условии $h \rightarrow 0$, где $h = (U_b - U_a)/U_b$ — глубина модуляции функции насыщения. Для оценки первого сомножителя в правой части (3) при $h \rightarrow 0$ используем точное решение уравнения (2) в предельном случае $h = 0$, $V = 0$: $u(x) = U \operatorname{th}(x/\sqrt{2}\Pi)$, $U = U_a = U_b$. Отсюда $\int_{-\infty}^{\infty} (du/dx)^2 dx = \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{U^2}{\Pi}$. Теперь получим оценку максимально допустимой величины V , при которой область инверсии существует. Так как $u(D) < U_b$ (в противном случае решение (2) — неограниченная функция), то из (3) вытекает, что V не может превышать значения

$$V_{\max} = \Pi\gamma_0 \frac{3}{4\sqrt{2}} h \frac{U_b^4}{U_a^4} \approx 0,53 \cdot \Pi\gamma_0 h. \quad (4)$$

Заметим, что комбинация $\Pi\gamma_0$ — единственная, имеющая размерность скорости, так что собственно новыми здесь являются линейная зависимость максимальной скорости от глубины модуляции h и значение коэффициента $3/(4\sqrt{2}) \approx 0,53$. Теперь легко оценить возможные размеры области инверсии: если r_c — радиус коротации, p — угол закрутки рукавов в окрестности коротации (для типичных галактик равный $12^\circ \div 16^\circ$), $\omega(r)$ — угловая скорость вращения вещества галактики, то максимальная ширина области инверсии вдоль радиального направления $\Delta r = 2V_{\max} (\sin(p)r_c \cdot d\omega/dr)^{-1}$. Из результатов работы [6] следует, что область инверсии, ширина которой меньше 2Π , быстро разрушается за счет диффузии, а область с шириной больше 3Π живет длительное время. Поэтому области инверсии могут существовать при выполнении условия $0,53\gamma_0 h > 1,5 \sin(p)r_c \cdot d\omega/dr$.

3. Произвольная глубина модуляции

Для случая произвольной глубины модуляции h и произвольного профиля $U(x)$ можно использовать численное решение уравнения (1) методом конечных разностей. На рис. 3 показан профиль решения в области инверсии для глубины модуляции $h = (U_b - U_a)/U_b = 0,4$. В пределах одного периода функция насыщения — ступенчатая, с двумя уровнями (пунктирная линия). Величина периода $D = 16\Pi$, ширина обеих ступенек одинакова, $d = D/2$. В соответствии с (4) относительная скорость выбрана меньше критической: $V = 0,3\Pi\gamma_0 h$. Заметим, что при нулевой скорости V переходный слой располагается точно посередине области с минимальным значением уровня насыщения. Если теперь взять скорость переноса V больше нуля, но меньше критической скорости $V_{\max}$, то каждый ПС будет перемещаться в направлении вектора V до тех пор, пока об-

ласть с большим градиентом поля не соприкоснется с областью большого градиента уровня насыщения. В этот момент дрейф ПС замедлится, и в конце концов ПС остановится в положении, которое определяется формулой (3). Именно такое стационарное решение и показано на рис. 3. Это решение устойчиво по отношению к возмущениям профиля $U(x)$, скорости вещества V и других параметров задачи.

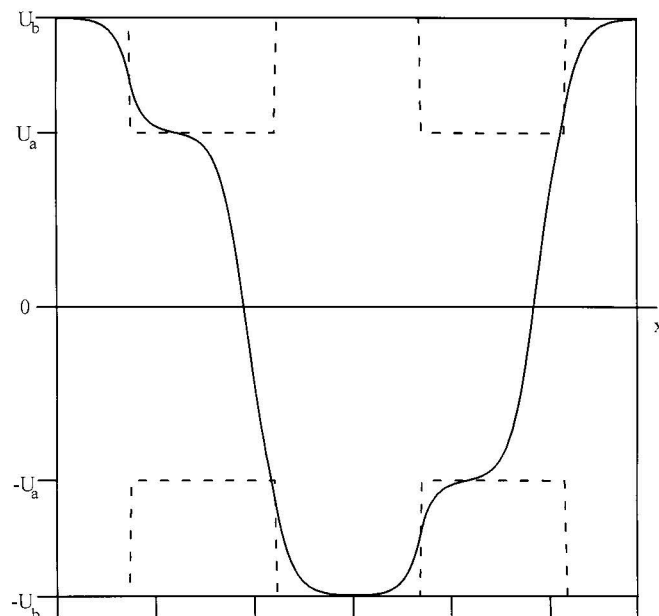


Рис. 3. Результат численного решения для глубины модуляции $h = 0,4$ и скорости вещества $V = 0,3\Pi\gamma_0 h = 0,12$. Обозначения кривых — как на рис. 2

Заметим, что описание поведения искривленного ПС в переднем и заднем концах области инверсии (см. рис. 1) требует применения двумерных моделей. Этот вопрос выходит за рамки данной работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 95-01-01284а и 98-01-00356).

Авторы благодарны А. Б. Васильевой, В. Ф. Бутызову, Д. Д. Соколову, А. Шукурову за полезные обсуждения.

Литература

1. Краузе Ф., Рэдлер К.-Х. Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо. М.: Наука, 1984.
2. Ruzmaikin A.A., Shukurov A.M., Sokoloff D.D. Magnetic Fields of Galaxies. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1988.
3. Соколов Д.Д. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 6. С. 9 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 6. P. 11).
4. Beck R., Brandenburg A., Moss D. et al. // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1996. **34**. P. 153.
5. Bykov A.A., Popov V.Yu., Shukurov A.M., Sokoloff D.D. // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1997. **292**, No. 1. P. 1.
6. Быков А.А., Попов В.Ю. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 3. С. 10 (Moscow University Phys. Bull. 1999. No. 3).

Поступила в редакцию
02.09.98