

УДК 523.98:533.951

УСТОЙЧИВОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ЗОНЫ ДИНАМО

В.А. Романов, Д.В. Романов, К.В. Романов, И.В. Семенов, Н.М. Ничкова, Е.В. Шалагина

MAGNETIC FIELD STABILITY IN EQUATORIAL PLANE OF DYNAMO ZONE

V.A. Romanov, D.V. Romanov, K.V. Romanov, I.V. Semeonov, N.M. Nichkova, E.V. Shalagina

В работе исследуется влияние дифференциального вращения на устойчивость нулевой моды колебаний тонкой магнитной трубки на различных глубинах зоны динамо. Вращение стабилизирует колебания и при достижении критических частот магнитные поля запираются в зоне динамо: сброс магнитных полей в солнечную атмосферу прекращается.

An influence of differential rotation on magnetic field stability is studied with focus on axisymmetric modes of thin magnetic tube oscillations. The tube is confined in the equatorial plane and it is shown that differential rotation is able to completely suppress field's instability which leads to capturing of the field within Dynamo zone.

Математическая постановка задачи

Исследуется нулевая мода линейных колебаний тонкой магнитной трубки, замкнутой в кольцо, расположенное в экваториальной плоскости Солнца (подробнее о постановке см. [1]). В работе [2] выведена линеаризованная система уравнений в сферической системе координат, условием существования решения которой является дисперсионное уравнение четвертой степени на ω :

$$\omega^4 + \omega^2(\alpha - \mu - 2\Omega^2) + \omega(i4\Omega\beta) + (\Omega^2 + \alpha)(\Omega^2 - \mu) + \beta^2 = 0,$$

где Ω обозначает начальную угловую скорость вращения трубки вокруг оси звезды, а коэффициенты уравнения записываются как комбинации квадратов характерных скоростей – $C_S^2 = \gamma p / \rho$ (скорость звука), $V_A^2 = 2H^2 / \rho$ (скорость Альфвена), $V_{SL}^2 = V_A^2 C_S^2 / (V_A^2 + C_S^2)$ (медленная, или касповая, скорость):

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\rho_{ext}}{\rho} \frac{g}{C_S^2} V_{SL}^2 \left(\frac{\rho_{ext}}{\rho} \frac{g}{V_A^2} - \frac{1}{r} \right) + \left(1 - \frac{\rho_{ext}}{\rho} \right) g'(r) - m^2 \frac{V_A^2}{r^2} - \\ - g \frac{\rho'_{ext}}{\rho} - \frac{V_{SL}^2}{r} \left(\frac{1}{r} + \frac{\rho_{ext}}{\rho} \frac{g}{C_S^2} \right), \\ \beta = i \frac{m}{r} \left[\frac{1}{r} (V_{SL}^2 + V_A^2) + V_{SL}^2 \frac{\rho_{ext}}{\rho} \frac{g}{C_S^2} \right], \\ \mu = \frac{1}{r} (V_A^2 + m^2 V_{SL}^2) + \left(\frac{\rho_{ext}}{\rho} - 1 \right) \frac{g}{r}. \end{cases}$$

Устойчивость нулевой моды колебаний в отсутствие вращения ($\Omega=0$)

Предварительные расчеты показывают, что ниже конвективной зоны для быстрых волн наименее устойчива нулевая мода колебаний $m=0$ [2]. Поэтому эта мода и исследуется отдельно в настоящей работе.

При ($\Omega=0$) дисперсионное уравнение становится биквадратным и решается явно [3]. После учета условия поперечного баланса давлений и начального равновесия остаётся только один независимый параметр плазмы трубки – напряженность магнитного поля в трубке. Замечательной особенностью зоны динамо [4] является то, что нулевая мода колебаний

устойчива при малых значениях напряженности поля. С ростом напряженности при достижении определенного критического значения (зависящего от глубины) трубка теряет устойчивость и всплывает через конвективную зону в атмосферу [5]. На рис. 1 представлены результаты расчетов $H_{kr}(r)$ – критических значений напряженности поля в зависимости от глубины в зоне динамо по данным модели внутреннего строения Солнца [6]. На этом рисунке также отмечены максимально возможные значения напряженности поля, рассчитанные из баланса давления:

$$H_{max} = \sqrt{p_{ext}}.$$

При такой напряженности давление плазмы трубки должно быть нулевым. $H_{kr}(r)$ нелинейно растет с ростом глубины и при $r=r_{kr}=4.87 \cdot 10^{10}$ см достигает уровня H_{max} . На глубинах, больших r_{kr} , магнитное поле заперто и все режимы колебаний устойчивы.

Результаты расчета на рис. 1 существенно отличаются от результатов работ [4, 5], рассчитанных по данным внутреннего строения Солнца [6]. Причина следующая: в работах [4, 5] приведены данные модели, имеющей 34 точки по глубине. В [6] число точек на два порядка больше, соответственно и точность определения разностных производных $\rho'_{ext}(r)$, $g'(r)$ существенно выше. В одинаковых точках полученные результаты совпадают с высокой точностью. Верхний край зоны динамо с высокой точностью совпадает с нижней границей конвективной зоны Солнца.

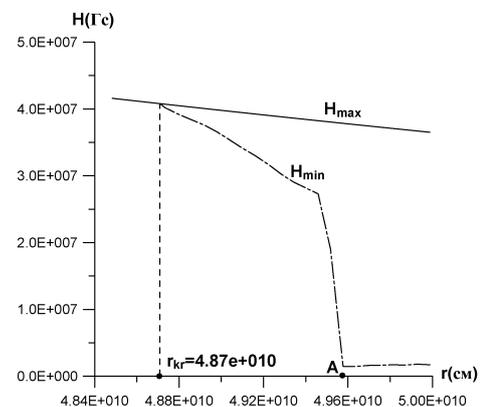


Рис. 1. Критическая напряженность магнитного поля как функция глубины.

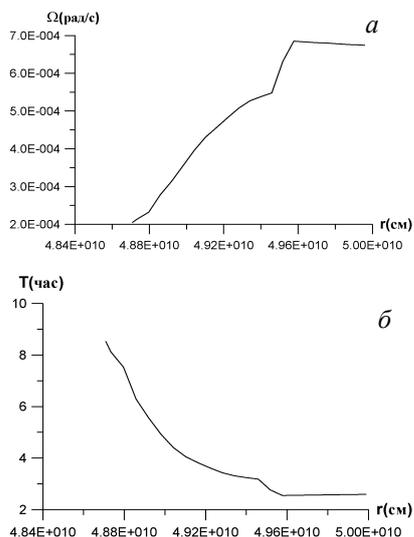


Рис. 2. Пороговые угловая частота и период вращения магнитной трубки ($H=H_{max}$).

Устойчивость нулевой моды колебаний в случае вращения ($\Omega > 0$)

В работе [2] обнаружен эффект повышения устойчивости колебаний магнитной трубки при наличии вращения вокруг центральной оси. С ростом угловой частоты Ω стабилизирующий эффект растет.

На рис. 2, а, б представлены результаты расчета частот вращения кольца и соответствующих значений периода, при которых значения $H_{kr}(r)$ поднимаются до максимально возможного $H_{max}(r)$. Зона динамо при этом запирается, так как прекращается сброс магнитных полей.

На рис. 3 представлены результаты, позволяющие понять механизм стабилизации. С ростом частоты вращения плотность газа в трубке по отношению к плотности газа снаружи растёт, и с ростом Ω может значительно превышать ρ_{ext} . Трубка становится более тяжелой и устойчивой.

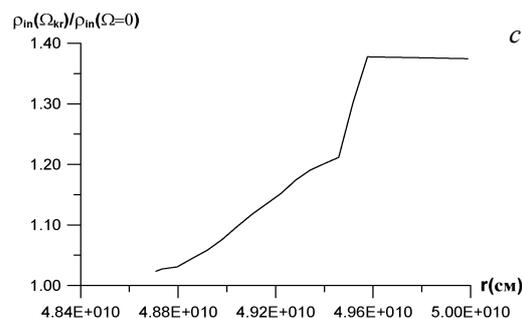
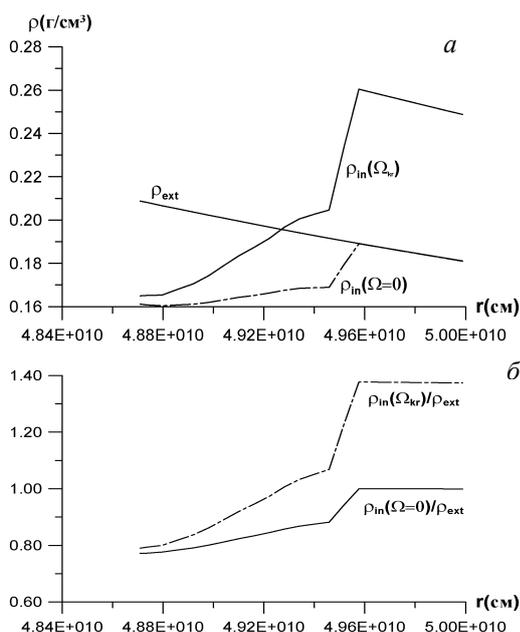


Рис. 3. Плотность газа внутри и снаружи трубки как функция Ω .

Отметим, что для запираания зоны динамо требуются очень высокие значения частот дифференциального вращения. Возможность их практической реализации может быть обоснована только по данным наблюдений [6].

Заключение

1. Дифференциальное вращение с нужной частотой способно полностью запереть магнитное поле в зоне динамо. Сброс поля при этом прекращается.
2. Верхний край зоны динамо, по данным внутреннего строения из работы [6], точно примыкает к нижней границе конвективной зоны Солнца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов В.А., Романов К.В., Семенов И.В., Романов Д.В. Временная эволюция долгопериодической части спектра глобальных осцилляций за время развития стандартного цикла солнечной активности // Труды X Международной байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2007.
2. Романов Д.В., Романов К.В., Ничкова Н.М., Шалагина Е.В. Влияние углового вращения на подъём тонкой магнитной трубки из зоны динамо // Труды IX Международной байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2006. С. 219–221.
3. Alekseenko S.V., Dudnikova G.I., Romanov V.A., Romanov D.V., Romanov K.V. Magnetic fields instabilities in the solar convective zone // Rus. J. Eng. Thermophys. 2000. V. 10. P. 243–262.
4. Романов В.А., Романов К.В. Структурный анализ зоны действия динамо // Астрономический журнал. 1993. Т. 70. С. 880–887.
5. Романов В.А., Романов Д.В., Романов К.В. Сброс магнитных полей из зоны динамо в атмосферу Солнца // Астрономический журнал. 1993. Т. 70. С. 1237–1246.
6. Christensen-Dalsgaard J., Dappen W., Ajukov S.V., Anderson E.R., et al. The current state of Solar modeling // Science. 1996. V. 272. P. 1286.
7. Spruit H.C. A model of the Solar convective zone // Solar Phys. 1974. V. 34. P. 277–290.

Красноярский институт железнодорожного транспорта
Красноярск