

УДК 523.98

## Нелинейный макроскопический диамагнетизм турбулентной плазмы в солнечной конвективной зоне

*В.Н. Криводубский*

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Т. Шевченко  
04053, ул. Обсерваторная, 3, Киев-53  
e-mail: [krivod1@observ.univ.kiev.ua](mailto:krivod1@observ.univ.kiev.ua)

Вследствие быстрого магнитного всплывания сильных полей трудно обеспечить существенное усиление поля (например, механизмом динамо) и последующее удержание его в глубоких слоях солнечной конвективной зоны (СКЗ) в течение времени, сравнимого с периодом солнечного цикла. Поэтому возникает необходимость поиска механизмов “отрицательной магнитной плавучести”.

Роль одного из таких механизмов в СКЗ играет макроскопический турбулентный диамагнетизм, физическая сущность которого состоит в вытеснении крупномасштабного (усредненного) магнитного поля из областей с повышенной интенсивностью турбулентных пульсаций вдоль градиента турбулентной вязкости (Зельдович, 1956; Рэдлер, 1966). Величина эффективной скорости вытеснения усредненного поля определяется выражением  $V_{\mu} = -\nabla v_T / 2$  (Вайнштейн и др., 1980; Зельдович и др., 1983), где  $v_T \approx (1/3)v l$  – коэффициент турбулентной вязкости,  $v$  и  $l$  – эффективная скорость и характерный масштаб турбулентных пульсаций.

На основе модельных расчетов в приближении теории длины перемешивания нами установлено, что радиальный профиль турбулентной вязкости  $v_T(z)$  в СКЗ имеет вид гладкой выпуклой функции с максимумом ( $v_T \approx 10^{13}$  см<sup>2</sup>/с) на глубинах  $z \approx 120$ – $140$  тыс. км (Криводубский и др., 1994). Физические параметры при расчетах мы брали из модели СКЗ Стикса (1989). Обнаруженная радиальная неоднородность параметра  $v_T$  указывает на диамагнитные свойства турбулентной оболочки Солнца. Вблизи дна СКЗ, где интенсивность турбулентных пульсаций резко падает к нулю, диамагнитное вытеснение направлено вниз, то есть действует против магнитной плавучести. В результате снимается до определенного предела ограничение на генерацию мощных полей. Поскольку скорость магнитного всплывания зависит от величины поля  $B$ , то можно найти значение стационарного поля  $B_S$ , всплывание которого полностью компенсируется диамагнетизмом. Согласно нашим расчетам (Криводубский, 2005) величина скорости направленного вниз диамагнитного вытеснения поля в кинематическом режиме составляет  $V_{\mu} \approx (2 - 4) \cdot 10^3$  см/с. Поэтому можно полагать, что здесь в значительной мере компенсируется эффект всплывания, в результате чего создаются благоприятные условия для удержания сильных магнитных полей в глубинных слоях.

Однако следует помнить, что в реальных условиях в СКЗ магнитные процессы протекают в нелинейном режиме. Поэтому эффект турбулентного диамагнетизма в присутствии глобального магнитного поля  $B$  существенно подавляется, т. е. скорость направленного вниз магнитного потока уменьшается. Соответствующее выражение для скорости диамагнитного переноса поля приобретает вид:  $V_D(\beta) = 6 V_{\mu} \Psi_D(\beta)$  (Кичатинов и Рюдигер, 1992) (здесь  $\beta = B/B_{eq}$  – параметр нормализованного магнитного поля,  $B_{eq} \approx v (4\pi\rho)^{1/2}$  – величина равномерно распределенного

магнитного поля, возбуждаемого мелкомасштабными турбулентными пульсациями,  $v$ ,  $\rho$  – плотность солнечной плазмы). В случае магнитных полей, характерных для глубинных слоев СКЗ ( $\beta^2 \ll 1$ ), функция подавления определяется выражением  $\Psi_D(\beta) \approx [(1/6) - \beta^2/5]$ , нормализованным на  $\Psi_0 = 1/6$  в отсутствие поля ( $\beta = 0$ ). Возникают опасения, что в нелинейном режиме диамагнитный эффект может стать пренебрежимым. В связи с этим нами исследовано подавление макроскопического турбулентного диамагнетизма, обусловленное усредненным (крупномасштабным) магнитным полем  $B$  (нелинейный диамагнетизм).

Из условия баланса  $V_B(\beta_S) + V_D(\beta_S) = 0$  эффектов магнитного всплывания усредненного поля со скоростью  $V_B(\beta_S) \approx (l/H_p)(v/\gamma)\beta_S^2/15$  ( $H_p$  – шкала высот по давлению,  $\gamma = 5/3$  – показатель адиабаты) (Кичатинов и Пипин, 1993) и направленного вниз диамагнитного вытеснения поля со скоростью  $V_D(\beta_S)$  можно оценить величину заблокированного в солнечных глубинах установившегося (стационарного) магнитного поля  $B_S = \beta_S B_{eq}$ . Для физических параметров модели СКЗ Стикса (1989) мы рассчитали: самосогласованное распределение по глубине значений нормализованного установившегося поля  $\beta_S \approx \{5V_\mu / [6V_\mu - (v/3\gamma H_p)]\}^{1/2}$ ; функции подавления  $\Psi_D(\beta_S)$ ; радиальную скорость нелинейного диамагнитного переноса поля  $V_D(\beta_S) = 6V_\mu \Psi_D(\beta_S)$  и удерживаемого нелинейным диамагнетизмом в глубине СКЗ стационарного поля  $B_S = \beta_S B_{eq}$ . Полученные оценки  $\beta_S \approx 0,7 - 0,8$  и  $\Psi_D(\beta_S) \approx 0,1 - 0,2$  свидетельствуют, что вблизи дна СКЗ имеет место существенное подавление турбулентного диамагнетизма. Величина скорости направленного вниз нелинейного диамагнитного вытеснения поля  $V_D(\beta_S) \approx (3 - 4) \cdot 10^2$  см/с оказывается значительно меньшей по сравнению с ее кинематическим значением  $V_\mu \approx (2 - 4) \cdot 10^3$  см/с. Вместе с тем установлено, что нелинейный турбулентный диамагнетизм тем не менее сохраняет способность эффективно противостоять магнитной плавучести. Расчеты показали, что даже такой уменьшенной скорости диамагнитного вытеснения поля вниз достаточно, чтобы скомпенсировать всплывание сильных магнитных полей и обеспечить формирование в нижней половине СКЗ магнитного слоя мощного стационарного поля  $B_S = \beta_S B_{eq} \approx 3000 - 4000$  Гс.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Ф25.2/094 Государственного фонда фундаментальных исследований Министерства образования и науки Украины.

## Литература

- Вайнштейн С.И., Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А. // Турбулентное динамо в астрофизике. М.: 1980.
- Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ. 1956. Т. 31. С. 154.
- Зельдович Я.Б. и др. (Zel'dovich Ya.B., Ruzmaikin A.A., Sokoloff D.D.) // Magnetic fields in Astrophysics. New York. 1983.
- Кичатинов Л.Л., Пипин В.В. // Письма в Астрон. журн. 1993. Т. 19. №. 6. С. 557.
- Кичатинов Л.Л., Рюдигер Г. (Kitchatinov L.L., Rüdiger G.) // Astron. Astrophys. 1992. V. 260. P. 494.
- Криводубский В.Н. (Krivodubskij V.N.) // Astron. Nachr. 2005. V. 326. №. 1. P. 61.
- Криводубский В.Н. и др. (Krivodubskij V.N., Rüdiger G., Kitchatinov L.L.) // Вісник Київ. ун-ту. Астрономія. 1994. №. 33. С. 55.
- Рэдлер К.-Х. (Rädler K.-H.) // Zur Elektrodynamik turbulent bewegterm leitender Mediem. Thesis. Univ. Jena. 1966.
- Стикс М. (Stix M.) // The Sun. Berlin–Heidelberg–New York. 1989. P. 200.