

ПРИПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ НЕОДНОРОДНОГО ВРАЩЕНИЯ СОЛНЦА: ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ДИНАМО

Кичатинов Л.Л.^{1,2}

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

NEAR SURFACE SHEAR LAYER OF SOLAR DIFFERENTIAL ROTATION: ORIGIN AND SIGNIFICANCE FOR DYNAMO

Kitchatinov L.L.^{1,2}

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Pulkovo Astronomical Observatory, St.-Petersburg, Russia*

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-161-166>

Helioseismology discovered a sharp increase in rotation rate with depth in a thin surface layer. Normalized rotational shear in the upper (~10 Mm) part of the layer is constant with latitude. It is shown that this rotational state is a consequence of short characteristic time of near-surface convection compared to the rotation period and radial anisotropy of the convective turbulence. Differential rotation theory reproduces the seismologically detected normalized surface shear. Toroidal magnetic field generated by the surface shear is estimated to be too weak (≤ 100 G) for being important for dynamo. However, the surface shear is the main driver of the global meridional flow, which is important for the solar dynamo.

Введение

Гелиосейсмология обнаружила возрастание скорости вращения с глубиной до ~30 Мм под солнечной поверхностью [1]. Такой приповерхностный сдвиговый слой (ПСС) привлекает внимание в связи с тем, что относительно большая неоднородность вращения в нем может иметь значение для солнечного динамо [2, 3].

Обсуждения в литературе различных возможностей для объяснения ПСС [4–7] не привели к единому мнению. Данный доклад обращает внимание на то, что найденные в работе Барикет и др. [8] особенности дифференциального вращения в ПСС налагают дополнительные ограничения на предлагаемые теории. В [8] установлено, что хотя угловая скорость Ω и ее радиальная неоднородность $\partial\Omega/\partial r$ зависят от широты, их относительная величина,

$$\frac{r}{\Omega} \frac{\partial\Omega}{\partial r} \approx -1, \quad (1)$$

имеет постоянную величину в верхней части ПСС толщиной 10 Мм. Как мы увидим, это обстоятельство является следствием малого характерного времени приповерхностной конвекции по сравнению с периодом вращения Солнца и стандартного граничного условия на солнечной поверхности.

Обсуждаются также возможная роль ПСС в солнечном динамо, возможность зондирования тороидального магнитного поля по вариациям в 11-летних циклах, а также ключевая роль ПСС в формировании глобального меридионального течения.

ПСС в теории дифференциального вращения

Основная идея теории дифференциального вращения была сформулирована в пионерской работе А.И. Лебединского [9]. Было показано, что если турбулентная конвекция во вращающейся среде обладает анизотропией с различной интенсивностью перемешивания вещества вдоль радиуса и по горизонтальным направлениям, то действие турбулентности на глобальное течение не сводится к эффекту турбулентной вязкости, но присутствует недиссипативный поток углового момента, создающий неоднородность вращения. Присутствие недиссипативных потоков углового момента в конвективных зонах Солнца и звезд стали в последствии называть эффектом Лебединского, или Λ -эффектом (стр. 37 в [10]).

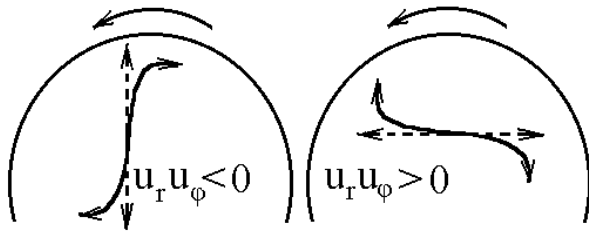


Рис. 1. Исходные (пунктир) и возмущенные силой Кориолиса смещения в экваториальной плоскости звезды. Вверху показано направление вращения. Исходные радиальные смещения (слева) переносят угловой момент к центру звезды, а горизонтальные – к поверхности.

Наглядное объяснение Λ -эффекта состоит в следующем [11]. На рис. 1 показано воздействие силы Кориолиса на конвективное перемешивание вещества в экваториальной плоскости. Смещения по радиусу отклоняются в азимутальном направлении так, что произведение радиальной и азимутальной скоростей имеет отрицательную величину для исходных смещений как вверх, так и вниз. Поэтому перемешивание по радиусу создает поток углового момента к центру звезды. Для горизонтального перемешивания, $u_\phi u_r > 0$, и угловой момент переносится к поверхности (r, θ, ϕ – обычные сферические координаты). Поэтому направление потока углового момента определяется анизотропией турбулентности.

Возмущение $\mathbf{u}'$ конвективной скорости $\mathbf{u}$ силой Кориолиса можно оценить как $\mathbf{u}' = 2\tau (\mathbf{u} \times \boldsymbol{\Omega})$, где τ – время корреляции конвективной турбулентности и $\boldsymbol{\Omega}$ – вектор угловой скорости. Для корреляции $\langle \mathbf{v}_r \mathbf{v}_\phi \rangle^\Lambda = \langle u'_r u_\phi + u'_\phi u_r \rangle^\Lambda$, определяющей перенос углового момента из-за Λ -эффекта, находим

$$\langle \mathbf{v}_r \mathbf{v}_\phi \rangle^\Lambda = 2\tau \Omega (\langle u_\phi^2 \rangle - \langle u_r^2 \rangle) \sin \theta, \quad (2)$$

где $\mathbf{v} = \mathbf{u} + \mathbf{u}'$. Для вклада турбулентной вязкости имеем оценку

$$\langle \mathbf{v}_r \mathbf{v}_\phi \rangle^v = -v_r \sin \theta r \partial \Omega / \partial r, \quad (3)$$

где $\nu_r = \tau \langle u_r^2 \rangle$ – турбулентная вязкость в радиальном направлении. Стандартное граничное условие на поверхности конвективной оболочки звезды требует обращения в ноль недиагональной компоненты

$$R_{r\phi} = -\rho \langle \nu_r \nu_\phi \rangle = -\rho (\langle \nu_r \nu_\phi \rangle^\Lambda + \langle \nu_r \nu_\phi \rangle^\nu) = 0 \quad (4)$$

тензора напряжений Рейнольдса. Эта компонента равна поверхностной плотности азимутальной силы. Граничное условие (4) означает, что дифференциальное вращение определяется процессами внутри Солнца, а не воздействием внешних сил. Подстановка (2) и (3) в граничное условие (4) приводит к следующей формуле для относительной неоднородности вращения вблизи поверхности Солнца:

$$\frac{r}{\Omega} \frac{\partial \Omega}{\partial r} = \langle u_h^2 \rangle / \langle u_r^2 \rangle - 2, \quad (5)$$

где $\langle u_h^2 \rangle = \langle u_\phi^2 \rangle + \langle u_\theta^2 \rangle = 2 \langle u_\phi^2 \rangle$ – среднеквадратичная горизонтальная скорость. Оценки (2)–(5) предполагают, что возмущения $\mathbf{u}'$ «исходной», не возмущенной вращением скорости $\mathbf{u}$, малы, случайное поле скорости $\mathbf{u}$ для «невращающейся» турбулентности изотропно в горизонтальной плоскости и его статистические свойства не зависят от широты. Это означает, что оценки (2)–(5) проведены в линейном приближении относительно числа Кориолиса

$$\Omega^* = 2\tau\Omega, \quad (6)$$

являющимся, таким образом, малым параметром теории ПСС.

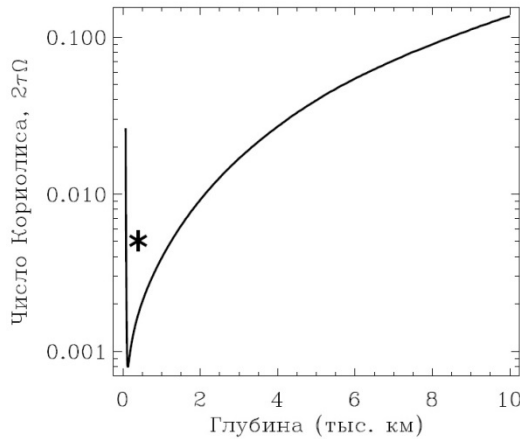


Рис. 2. Зависимость числа Кориолиса (6) от глубины вблизи поверхности Солнца. Звездочкой показана оценка для грануляции.

Как видно из рис. 2, число Кориолиса для диапазона глубин, в котором в [8] была измерена величина (1) относительной неоднородности вращения, мало. Поэтому линейное приближение относительно Ω^* оправдано. Формула (6) получена из грубых оценок. Однако детальные расчеты в квазилинейном приближении теории дифференциального вращения [5] приводят к той же формуле.

Основная трудность теории дифференциального вращения заключалась в том, что число Кориолиса (6) в глубине конвективной зоны не мало. Поэтому теория должна быть нелинейной относительно параметра Ω^* .

Дополнительные сложности создает и участие меридиональной циркуляции в переносе углового момента. Теория ПСС, являясь частью теории дифференциального вращения, относительно проста, так как меридиональная циркуляция не входит в граничное условие (4), а параметр Ω^* вблизи поверхности мал.

Относительная неоднородность вращения (5) не зависит от широты в согласии с [8]. Возрастание скорости вращения с глубиной получается для анизотропии радиального типа, то есть $\langle u_r^2 \rangle > \langle u_\phi^2 \rangle = \langle u_\theta^2 \rangle$, как и должно быть [9]. Измеренная сейсмологией величина (1) получается для $\langle u_r^2 \rangle = \langle u_h^2 \rangle = 2\langle u_\phi^2 \rangle$. Это согласуется с численным экспериментом по ПСС Китиашвили и др. [12]. Рисунок 4(b) в [12] показывает анизотропию конвекции, соответствующую приближенному равенству $\langle u_r^2 \rangle \approx \langle u_h^2 \rangle$ в конвективной зоне.

Важен ли ПСС для динамо?

Так называемый Ω -эффект генерации тороидального магнитного поля из полоидального дифференциальным вращением важен для динамо. Правая часть уравнения индукции тороидального поля,

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial t} = r \sin\theta (\mathbf{B} \cdot \nabla) \Omega \dots, \quad (7)$$

учитывает этот эффект. С учетом (1), для приповерхностного слоя имеем оценку

$$B_\phi \approx \tau_{esc} \sin\theta B_r \Omega, \quad (8)$$

где τ_{esc} – время выхода тороидального поля из ПСС. Для выхода из-за турбулентной диффузии,

$$B_\phi \approx L^2 B_r \Omega \eta_T^{-1} \approx 30 \text{ Гс}, \quad (9)$$

где $L \approx 30$ Мм – толщина ПСС, $\eta_T \approx 10^{12}$ см²/с – коэффициент турбулентной диффузии, $B_r \approx 1$ Гс и $\Omega \approx 3 \times 10^{-6}$ рад/с. Если тороидальное поле покидает ПСС из-за магнитной плавучести, то

$$B_\phi^2 \approx \sqrt{4\pi\rho} B_r L \Omega, \quad B_\phi \approx 50 \text{ Гс}, \quad (10)$$

где плотность $\rho \approx 5 \times 10^{-3}$ г/см³. В обоих случаях тороидальное поле меньше 100 Гаусс вряд ли существенно для динамо и недостаточно для формирования солнечных пятен.

Имеется, однако, другая возможность для выяснения присутствия достаточно сильных тороидальных полей в ПСС. Влияние такого поля приводит к изменению анизотропии конвекции, что в свою очередь влияет на дифференциальное вращение. Расчеты в квазилинейном приближении предсказали слабое увеличение радиальной неоднородности вращения под влиянием тороидального поля [5], после чего Барикет и др. [13] нашли вариации неоднородности вращения в ПСС на широтах ниже 30°, синфазные с активностью пятен, в 23 и 24 солнечных циклах. Такие вариации были подтверждены в [14, 15].

Вопрос о значении ПСС для генерации тороидального поля Солнца остается открытым.

ПСС как источник меридиональной циркуляции

Глобальное меридиональное течение на Солнце возникает из-за нарушения равновесия между центробежной и бароклиной силой. Это следует из уравнения для меридионального течения [16]:

$$D(V^m) = r \sin\theta \frac{\partial \Omega^2}{\partial z} - \frac{g}{rc_p} \frac{\partial S}{\partial \theta}, \quad (11)$$

левая часть которого учитывает сопротивление меридиональному течению из-за турбулентной вязкости, а первое и второе слагаемые в правой части – создание циркуляции центробежной и бароклиной силами, соответственно (подробнее смотрите в [16]). Оценки по порядку величины показывают [17], что каждый из двух источников меридионального течения, выписанных в правой части (11), больше левой части этого уравнения на четыре-пять порядков величины. Поэтому два источника в правой части (11) почти уравниваются друг друга. Полагая левую часть уравнения равной нулю, можно получить хорошо известное в астро- и геофизике уравнения термо-вращательного равновесия. Меридиональная циркуляция возникает из-за отклонения от такого равновесия.

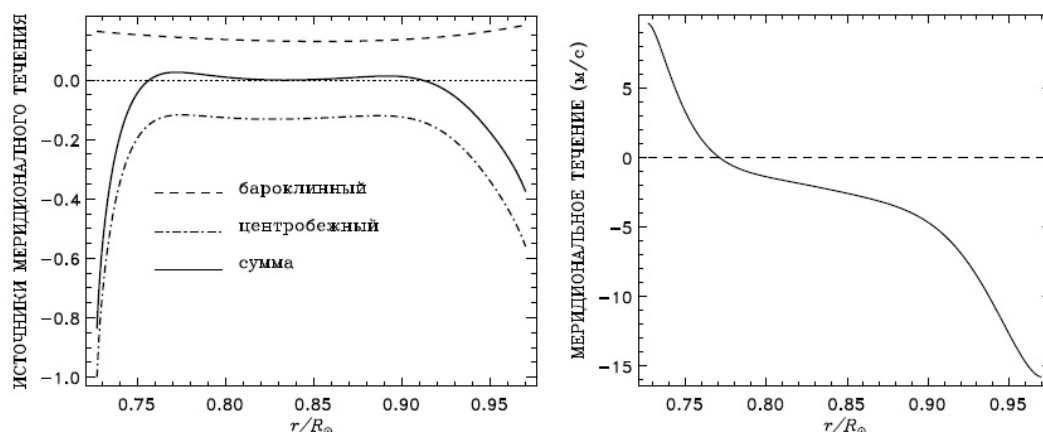


Рис. 3. Источники меридионального течения (слева) и результирующий профиль меридиональной скорости (справа) для широты 45° по результатам согласованной модели дифференциального вращения и меридиональной циркуляции [18].

На рис. 3 показаны два источника меридиональной циркуляции из правой части уравнения (11), а также их сумма, по результатам численной модели [18]. Видно, что в большей части конвективной зоны источники почти уравниваются друг друга, то есть имеет место термо-вращательное равновесие. Такое равновесие, однако, не согласуется с граничными условиями, в частности, с условием (4), из которого следует наличие ПСС. Поэтому вблизи границ формируются пограничные слои (слои Экмана), где термо-вращательное равновесие нарушается (рис.3). Отклонение от равновесия порождает меридиональное течение. Поэтому меридиональная скорость на рис.3 имеет наибольшую величину у границ конвективной зоны и уменьшается с удалением от границ. Предсказанный в [18] профиль меридиональной циркуляции согласуется с данными сейсмологии [19,20].

Итак, меридиональная циркуляция солнечного вещества по всей вероятности генерируется в ПСС. Меридиональная циркуляция важна для динамо. Считается [21,22], что меридиональное течение у основания конвективной зоны является причиной наблюдаемой миграции пятнообразования к экватору. Значение ПСС для солнечного динамо может быть опосредовано меридиональной циркуляцией.

Выводы

Приповерхностный слой неоднородного вращения Солнца является следствием радиальной анизотропии солнечной конвекции. Постоянная с широтой относительная неоднородность вращения (1) объясняется в рамках традиционной теории дифференциального вращения и связана с малым временем корреляции конвективной турбулентности по сравнению с периодом вращения Солнца.

Имеется возможность детектирования подфотосферных тороидальных полей по вариациям радиальной неоднородности вращения вблизи поверхности Солнца.

Глобальная меридиональная циркуляция на Солнце генерируется непотенциальной центробежной силой в приповерхностном слое неоднородного вращения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

1. *Schou J. et al.* // *ApJ*, 1989, **505**, 390
2. *Brandenburg A.* // *ApJ*, 2005, **625**, 539
3. *Pipin V.V., A.G. Kosovichev* // *ApJ*, 2011, **727**, L45
4. *Hotta H., M. Rempel, T. Yokoyama* // *ApJ*, 2015, **798**, 42
5. *Кучатинов Л.Л.* // Письма в АЖ, 2016, **42**, 379
6. *Gunderson L.M., A. Battacharjee* // *ApJ*, 2019, **870**, 47
7. *Jha B.K., A.R. Choudhuri* // *MNRAS*, 2021, **506**, 2189
8. *Barekat A., J. Schou, L. Gizon* // *Astron. Astrophys.*, 2014, **570**, L12
9. *Лебединский А.И.* // Астрон. журн., 1941, **18**, 10
10. *Rüdiger G.* // *Differential rotation and stellar convection: Sun and solar-type stars.* – Berlin: Akademie-Verlag, 1989
11. *Кучатинов Л.Л.* // УФН, 2005, **175**, 475
12. *Kitiashvili I.N. et al.* // *MNRAS*, 2023, **518**, 504
13. *Barekat A., J. Schou, L. Gizon* // *Astron. Astrophys.*, 2016, **570**, A8
14. *Antia H.M., S. Basu* // *ApJ*, 2022, **924**, 19
15. *Komm R.* // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2022, **9**, 428
16. *Rüdiger G., L.L. Kitchatinov, R. Hollerbach* // *Magnetic processes in astrophysics.* – Weinheim: WILEY-VCH, 2013
17. *Kitchatinov L.L.* // *Geomag. Aeronomy*, 2016, **56**, 945
18. *Kitchatinov L.L., S.V. Olemskoy* // *MNRAS*, 2011, **411**, 1059
19. *Rajaguru S.P., H.M. Antia* // *ApJ*, 2015, **813**, 114
20. *Gizon L. et al.* // *Science*, 2020, **368**, 1469
21. *Choudhuri A.R., M. Schussler, M. Dikpati* // *Astron. Astrophys.*, 1995, 303, L29
22. *Durney B.R.* // *Sol. Phys.*, **160**, 213