

СУПЕРРОТАЦИЯ СТРУКТУР СУПЕРГРАНУЛЯЦИОННОГО ПОЛЯ В КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЕ СОЛНЦА НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ

Гетлинг А.В.¹, Косовичев А.Г.²

¹*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, A.Getling@mail.ru*

²*Технологический институт штата Нью-Джерси, Ньюарк, США*

SUPERROTATION OF THE SUPERGRANULATION-FIELD STRUCTURES AT VARIOUS DEPTHS IN THE SOLAR ACTIVITY CYCLE

Getling A.V.¹, Kosovichev A.G.²

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*New Jersey Institute of Technology, NJ 07102, USA*

The fact that the supergranulation pattern in the solar near-photospheric layers rotates faster than the solar plasma is known as the superrotation effect of supergranules. We present here some preliminary results of our analysis of the velocity field at various depth in the convection zone measured using the techniques of time-distance helioseismology based on the data of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO). The velocities of motion of supergranules as structures of the divergence field of horizontal velocities are determined using the local correlation tracking method in its one-dimensional version. Since the noise component of the field under study is enhanced with the increase of the depth, the tracking procedure is applied to both the original divergence field and the field subjected to long-wavelength spectral filtering. The results reveal the superrotation effect at different depths.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-49-52

Введение

Известно, что Солнце вращается неоднородно и, согласно большинству определений, угловая скорость его дифференциального вращения может быть аппроксимирована выражением $\Omega(\varphi) = a_0 + a_2 \sin^2 \varphi + a_4 \sin^4 \varphi$, где φ – гелиографическая широта и где значения коэффициентов несколько варьируют в зависимости от метода определения и используемых инструментов (например, согласно [1], для сидерической скорости $a_0 = 2.972$, $a_2 = -0.484$, $a_4 = -0.361$ мкрад/с). При этом, начиная с 1980 г., систематически появляются сообщения о том, что сеть супергрануляционных ячеек вращается быстрее солнечной плазмы (явление суперротации супергрануляционного поля). Этот эффект был впервые обнаружен по доплеровским определениям скорости вращения [1] и подтвержден последующими измерениями [2–4]. Суперротация была выявлена с использованием техники пространственно-временной гелиосейсмологии с использованием волн f -моды как трассеров течений [5]. Были обнаружены волновые свойства супергрануляционной структуры [6]. Делались попытки подхода к

теоретическому описанию суперротации супергранул как дрейфа конвективных ячеек во вращающемся слое жидкости [7, 8] и как волнового процесса, обусловленного возрастания угловой скорости вращения с глубиной [9, 10].

Благодаря успехам гелиосейсмологии появилась возможность исследовать структуру поля скоростей. Здесь мы рассматриваем масштабы конвективных течений на разных глубинах в конвективной зоне на основе спектральных представлений поля горизонтальных скоростей, найденного методами пространственно-временной гелиосейсмологии по наблюдениям на инструменте Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) орбитальной обсерватории солнечной динамики (Solar Dynamics Observatory – SDO) в период с мая 2010 по сентябрь 2020 г.

Данные и их обработка

Поля скоростей представлены значениями в 1026×1026 точках с шагом 0.12° по гелиографической широте и долготе ($123^\circ \times 123^\circ$) и временной каденцией 8 ч для 8 подфотосферных слоев, лежащих в интервале глубин $d = 0\text{--}19$ Мм. Толщина этих слоев меняется от 1 Мм для верхнего слоя до 4 Мм для нижнего. В дальнейшем мы будем указывать средние значения d для этих слоев.

Сферическая поверхность, соответствующая данному d , разбивается на зональные пояса шириной 4.8° . Скорость вращения вещества получается усреднением измеренных значений азимутальной компоненты скорости v_χ по зональному поясу. Скорость вращения супергрануляционного поля определяется одномерным корреляционным трассированием структур поля дивергенции горизонтальных скоростей. Для этого из пояса вырезается площадка длиной 8.4° долготы, которая смещается с шагом 2.4° по долготе и для каждого положения которой производится поиск такого ее смещения в следующий момент времени, при котором корреляция поля дивергенции в несмещенной и смещенной площадке оказывается наибольшей. По величине смещения определяется локальная скорость дрейфа структур, которая затем усредняется по всем долготам. И скорость вещества, и скорость перемещения супергрануляционных структур усредняются по всем моментам данного месяца, для которых имеются измеренные поля скоростей.

Степень зашумленности поля дивергенции быстро нарастает с глубиной, поэтому на уровнях $d > 4$ Мм результаты трассирования дрейфа супергранул становятся менее надежными. Шумовая компонента поля является преимущественно коротковолновой, поэтому для повышения надежности результатов применялась процедура длинноволновой фильтрации поля. А именно, поле разлагалось по сферическим гармоникам $Y_l^m(\theta, \phi)$ (здесь $\theta \equiv \pi/2 - \varphi$ и ϕ – гелиографические координаты широта и долгота) с $l \leq l_{\max}$, где $l_{\max} = 200$, затем отсекалась коротковолновая часть спектра $l > l_{\max}^f = 160$ (это граничное значение l приблизительно соответствует верхней границе спектра супергранул) и выполнялось обратное преобразование по сферическим гармоникам.

Результаты чувствительны к выбору длины площадки, используемой при трассировании. Предварительный их анализ показывает следующее.

На глубинах d до 4 Мм профили угловых скоростей вращения вещества и супергрануляционных структур выглядят, как показано на рис. 1 (они относятся ко времени вблизи максимума 24 цикла активности). Видно, что суперротация супергрануляционных структур уверенно прослеживается в этом интервале глубин как по фильтрованным, так и по нефильрованным полям. На глубинах $d = 0.5$ и 2 Мм фильтрация несколько увеличивала значения скоростей вращения.

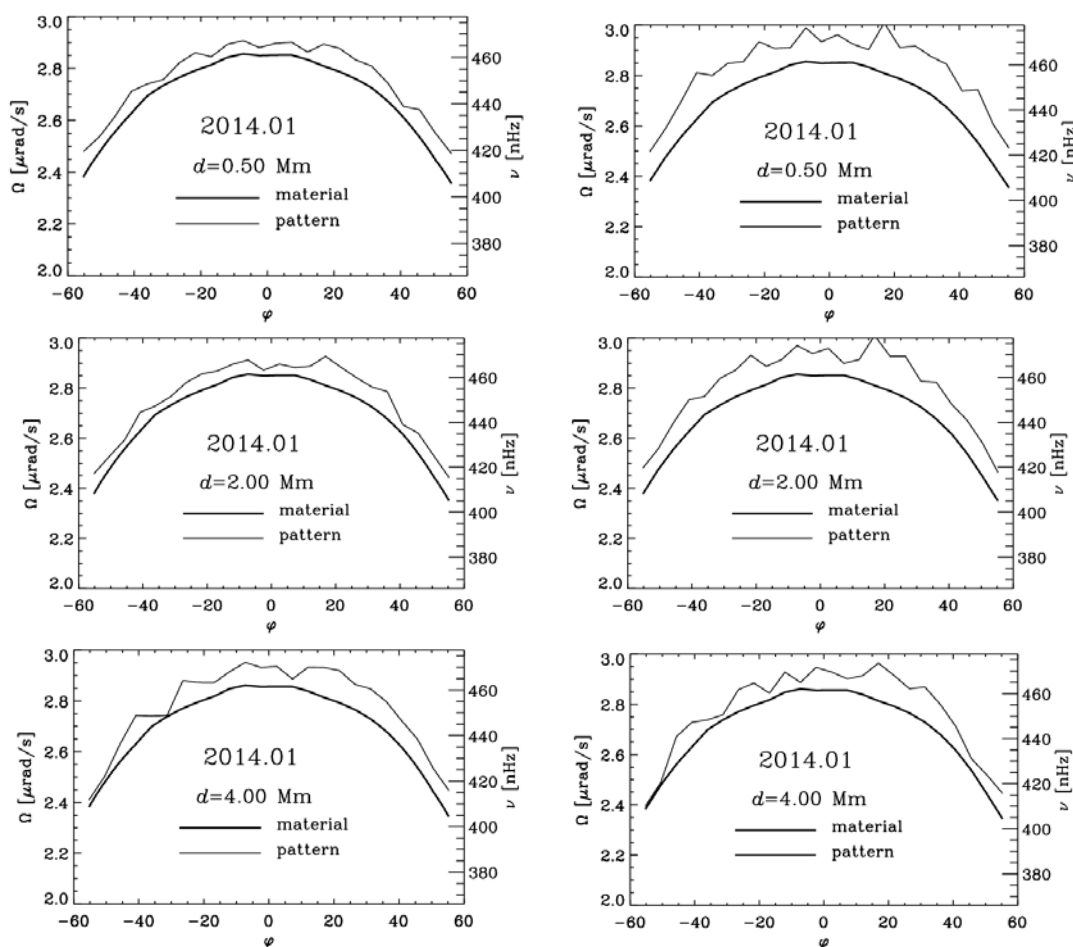


Рис. 1. Сидерические угловые скорости вращения солнечной плазмы (жирные кривые) и сети супергранул (тонкие кривые) как функции широты φ , полученные для глубин $d = 0.5, 5$ и 4 Мм по нефильрованным (левый столбец) и фильтрованным (правый столбец) полям скорости и усредненные за январь 2014 г.

Характер вращения конвективных структур в более глубоких слоях, выявляемый по фильтрованным изображениям (рис 2), также обнаруживает эффект суперротации, но отличается от показанного выше. На уровне $d = 6$ Мм вращение выглядит близким к твердотельному, особенно в период низкой активности, а на $d = 8.5$ Мм наблюдаются пониженные значения угловой скорости в экваториальной области – незначительная диф-

ференциальность вращения, обратная по знаку по сравнению с более высокими слоями.

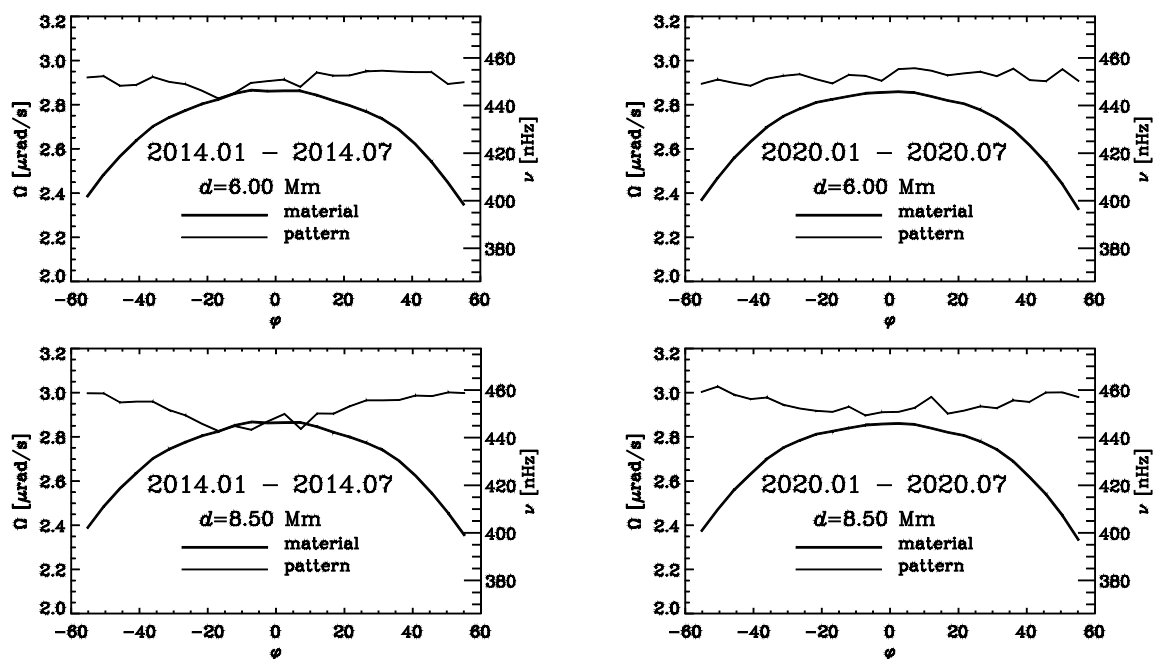


Рис. 2. Те же зависимости для фильтрованных изображений на более глубоких уровнях $d = 6$ и 8.5 Мм, усредненные за 7 месяцев в периоды высокой (левый столбец) и низкой (правый столбец) солнечной активности.

Выводы

Как мы видели, суперротация супергранул уверенно прослеживается в подповерхностных слоях конвективной зоны, по крайней мере, до глубин порядка 9 Мм. При этом скорость вращения супергрануляционного поля в верхних слоях максимальна в экваториальной зоне и спадает с широтой. В более глубоких слоях (где, согласно существующим представлениям, заканчивается слой супергранул), по-видимому, происходит переход к вращению с обратным знаком широтного градиента. Это может означать, что выявляется другой класс структур поля скоростей.

Литература

1. Duvall, T.L., J. // Solar Phys., 1980, 66, 213.
2. Snodgrass H.B., Ulrich R.K. // Atrophys. J., 1990, 351, 309.
3. Beck, J.G., Schou, J. // Solar Phys., 2000, 193, 333.
4. Meunier N., Roudier T. // Astron. Astrophys., 2007, 466, 691.
5. Duvall, T.L., J., Gizon, L. // Solar Phys., 2000, 192, 177.
6. Gizon L., Duvall T.L., Schou J. // Nature, 2003, 421, 43.
7. Busse F.H. // Phys. Rev. Lett., 2003, 91, 244501.
8. Busse F.H. // Solar Phys., 2007, 245, 27.
9. Green C.A., Kosovichev A.G. // Atrophys. J. Lett., 2006, 641, L77.
10. Green C.A., Kosovichev A.G. // Atrophys. J. Lett., 2007, 665, L75.