ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР С РАЗЛИЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

Куценко А.С.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

DIFFERENTIAL ROTATION OF MAGNETIC STRUCTURES WITH DIFFERENT TOTAL UNSIGNED MAGNETIC FLUX

Kutsenko A.S.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

Data on longitudinal magnetic field provided by SDO/HMI were used to derive the rotation rate of magnetic tracers with different total unsigned magnetic flux. Flux-weighted center coordinates of magnetic tracers were converted to Stonyhurst heliographic coordinates. Rotation rates were derived as a linear fit of the longitude vs. time curve. In all, 820 tracers were analyzed. We found that (i) rotation rate distribution shows a significant scatter; (ii) magnetic tracers with higher maximal total unsigned magnetic flux tend to rotate slower; (iii) unipolar tracers tend to rotate slower as well regardless of their comparatively weak total unsigned flux. Combining these results with that provided by helioseismology one can assume that strong magnetic tracers and unipolar spots are anchored deeper in the convection zone.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-265-268

Введение

Выделяют три основных метода для измерения дифференциального вращения Солнца [1]. Первый заключается в измерении доплеровского смещения спектральных линий. Вторым методом – использование аппарата гелиосейсмологии, что позволило, в частности, определить как изменяется скорость дифференциального вращения внутри конвективной зоны Солнца. Еще один метод – непосредственное измерение скорости вращения неких трассеров, различимых на изображениях Солнца. Такими трассерами могут быть, например, солнечные пятна, корональные яркие точки, факелы. Разные трассеры показывают разную скорость вращения, что может быть связано с высотой (глубиной) формирования трассера. Цель данной работы – сопоставить скорость дифференциального вращения магнитных структур в фотосфере с их полным магнитным потоком, что может дать информацию о глубине формирования этих структур.

Данные и методы

В работе в качестве исходных данных использовались магнитограммы полного диска продольного поля, полученные инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) орбитальной обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO) [2]. На магнитограммах вручную выделялись магнитные трассеры – активные и эфемерные области. Для каждого трассера опреде-

лялось положение его средневзвешенного центра по пикселям с абсолютной плотностью магнитного потока более 600 Мкс см^{-1} в координатах пикселей магнитограммы. С помощью библиотек SolarSoft/World Coordinate System среды IDL положение средневзвешенного центра переводилось в гелиографические координаты (Stonyhurst Heliographic). Как пример, на рис. 1 серая сплошная кривая показывает изменение гелиографической долготы АО NOAA 11066 со временем. Черная сплошная кривая на рис. 1 – полный магнитный поток трассера. Полный магнитный поток вычислялся как сумма абсолютных плотностей потоков в пикселях трассера, умноженная на площадь пикселя. Суммирование проводилось только по пикселям, плотность потока в которых превышала по модулю 18 Мкс см^{-1} . Для уменьшения эффекта проекции проводилась предварительная μ -коррекция магнитограмм (например, [3]).

Угловая скорость вращения магнитной структуры определялась как наклон прямой, аппроксимирующей зависимость долготы средневзвешенного центра трассера от времени (черная штриховая прямая на рис. 1). Для уменьшения неопределенностей измерений, аппроксимация проводилась для интервала времени от момента достижения максимального магнитного потока до уменьшения магнитного потока приблизительно в два раза по сравнению с максимальным (штриховые вертикальные серые линии на рис. 1).

Рис. 1.

Результаты

В общей сложности в работе измерены скорости вращения 820 трассеров с максимальным полным магнитным потоком от $0.5 \times 10^{21} \text{ Мкс}$ до

1×10^{23} Мкс, наблюдавшихся с 2010 по 2015 гг. Скорости вращения в зависимости от широты для всех трассеров показаны на рис. 2. Размер кружка на рисунке пропорционален максимальному полному магнитному потоку. Черная сплошная линия на рис. 2 показывает эмпирическую зависимость скорости дифференциального вращения от широты

$$\omega(\varphi) = A + B\sin^2\varphi + C\sin^4\varphi \quad (1)$$

где φ – гелиографическая широта, $A = 14.307$, $B = -1.98$, $C = -2.15$ – коэффициенты, измеряющиеся в градусах/день и полученные в работе [4].

Из визуального анализа рис. 2 видно, наблюдается большой разброс значений скорости вращения для различных трассеров. Кроме того, можно заметить, что магнитные структуры с большим магнитным потоком имеют тенденцию вращаться медленнее. Более тщательный анализ (не приведен здесь) показанного распределения математическими методами подтверждает этот вывод.

Рис. 2.

Для каждого трассера также использовалась информации о конфигурации магнитного поля в нем – класс Хейла. Все трассеры были разделены на униполярные пятна, диполи (β -конфигурация) и более сложные структуры ($\beta\gamma$ - и -конфигурации). Наиболее интересным представляются результаты для скорости вращения униполярных пятен. На рис. 3 показано распределение, аналогичное рис. 2, только все трассеры, кроме униполярных пятен, показаны серым цветом. Видно, что, хотя униполярные пятна показывают небольшой максимальный магнитный поток, скорость их вращения в среднем ниже, чем у других трассеров.

Рис. 3.

Выводы

Используя данные инструмента SDO/HMI, мы измерили скорости дифференциального вращения магнитных структур на Солнце с различным магнитным потоком. Было установлено, что магнитные трассеры с большим потоком имеют тенденцию вращаться медленнее по сравнению с более «слабыми» структурами. Предполагая, что скорость вращения магнитной структуры определяется скоростью вращения ее «корней», и учитывая данные гелиосейсмологии, можно объяснить наблюдаемые закономерности более глубоким «укоренением» крупных магнитных структур.

Особняком стоят униполярные области, которые, хоть и не показывают большой магнитный поток, также в среднем вращаются медленнее остальных магнитных трассеров. Возможно, данный факт также объясняется большой глубиной укоренения униполярных образований, что может являться одной из причин их существования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-12-00131.

Литература

1. Beck J.G. // Sol. Phys., 1999, 191, 47.
2. Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I. et al. // Sol. Phys., 2012, 275, 229.
3. Leka K.D., Barnes G., Wagner E.L. // Sol. Phys., 2017, 292, 36.
4. Snodgrass H.B. // ApJ, 1983, 270, 288.