

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ И МЕРИДИОНАЛЬНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Тлатова К.А., Тлатов А.Г.

Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия

DIFFERENTIAL ROTATION AND MERIDIONAL MOVEMENTS OF INDIVIDUAL SUNSPOTS

Tlatova K.A., Tlatov A.G.

Kislovodsk Mountain Astronomical Station of the Pulkovo observatory, Kislovodsk, Russia

An analysis of the longitudinal and meridional movement of individual sunspots and pores was performed based on the processing of observations from the HMI/SDO space observatory in the period 2010–2024. It was found that the rotation rate of sunspots depends on the magnetic polarity in the 22-year Hale magnetic cycle. Leading polarity sunspots rotate more than ~2% faster than trailing polarity sunspots. The meridional motion of sunspots was also analyzed. It was found that the speed of meridional movement of sunspots also depends on their magnetic polarity. The velocity of sunspots of leading polarity are directed toward the equator, and those of tail polarity are directed toward the poles.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-311-314>

Введение

Движения солнечных пятен широко используются для изучения дифференциального вращения Солнца. В работе Ньютона и Нанна [1] была найдена квадратичная зависимость сидерической скорости вращений синуса широты: $\omega(\theta) = A + B \sin^2\theta = 14.38^\circ - 2.38^\circ \cdot \sin^2\theta$ deg/day, где θ – широта. Gilman and Howard 1984, 1985 [2, 3], выполнили анализ вариаций вращения отдельных солнечных пятен по данным обсерватории Маунт-Вилсон. Они обрабатывали фотографические пластики наблюдений в белом свете за период 1917–1983. В работе [2] авторы показали, что существуют вариации вращения с фазой цикла солнечной активности. В [3] для анализа брались пятна со временем жизни не менее 2 дней. Было обнаружено, что пятна-лидеры вращаются быстрее, чем пятна-ведомые, примерно на 0,1 градуса в день, или 14 м/с.

Солнечные пятна также могут двигаться в меридиональном направлении, то есть в направлении полюсов. Анализ данных Гринвичской обсерватории 1874–1935 [4] показал, что движение групп пятен направлено к экватору на низких широтах и к полюсу на высоких широтах достигая значений 0.01 deg/day или 14 м/с.

В данном исследовании мы рассмотрим скорость долготного и меридионального перемещения отдельных солнечных пятен, сосредоточившись на различных типах солнечных пятен.

Данные и анализ данных

Для анализа мы использовали характеристики отдельных солнечных пятен. За основу взяли наблюдения обсерватории SDO/HMI серий hmi.Ic_45s и hmi.M_45s, выполненные в один и тот же момент времени. Мы брали 5 изображений за каждый день на моменты времени, близкие к 00:00, 05:00, 10:00, 15:00 и 20:00 UT. Основными данными для обработки были изображения в “белом” свете (hmi.Ic_45s), на которых выделялись солнечные пятна и ядра солнечных пятен. Для каждого пятна проводилось выделение ядер и полутени. Для определения полярности магнитного поля мы накладывали границы пятен на наблюдения магнитных полей (hmi.M_45s) и определяли максимальное, вдоль луча зрения, магнитное поле.

Солнечные пятна можно разделить по полярности магнитного поля. Для определения полярности поля мы использовали наложение границ пятен, выделенных в континууме на магнитограммы магнитного поля, выполненные на том же телескопе в тот же момент времени. Для определения знака полярности ведущих и хвостовых пятен использовался закон Хэйла. Всего было выделено ~117 тыс. пятен ведущей полярности и 95 тыс. хвостовой полярности, в которых была определена скорость долготного перемещения. На рис. 1 представлены скорости вращения пятен отдельно для ведущей и хвостовой полярности. Мы также разделили солнечные пятна по морфологии. На рис. 1a представлены скорости вращения для солнечных пор, т.е. пятен без полутени. Как правило, это пятна площадью меньше $S < 20$ мдп. На рис. 1b представлены скорости вращения солнечных пятен, то есть структур, имеющих ядра и полутени. Для сравнения пунктиром нанесена скорость вращения по формуле [1]. Можно отметить две особенности. Солнечные пятна и поры хвостовой полярности вращаются медленнее, чем пятна ведущей полярности. Также солнечные поры вращаются медленнее, чем регулярные пятна.

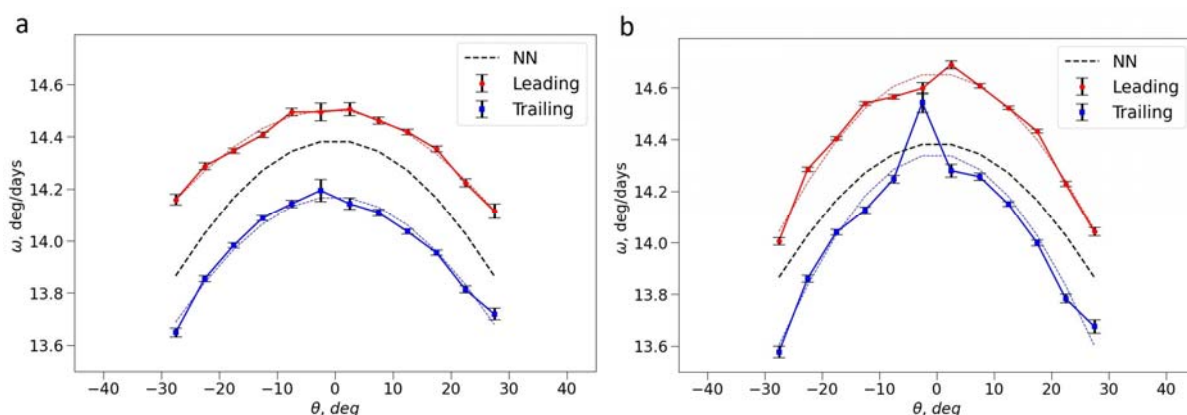


Рис. 1. Скорость вращения солнечных пятен и пор ведущей и хвостовой полярности магнитного поля. Пунктиром проведена скорость вращения NN. а) солнечные поры; б) солнечные пятна.

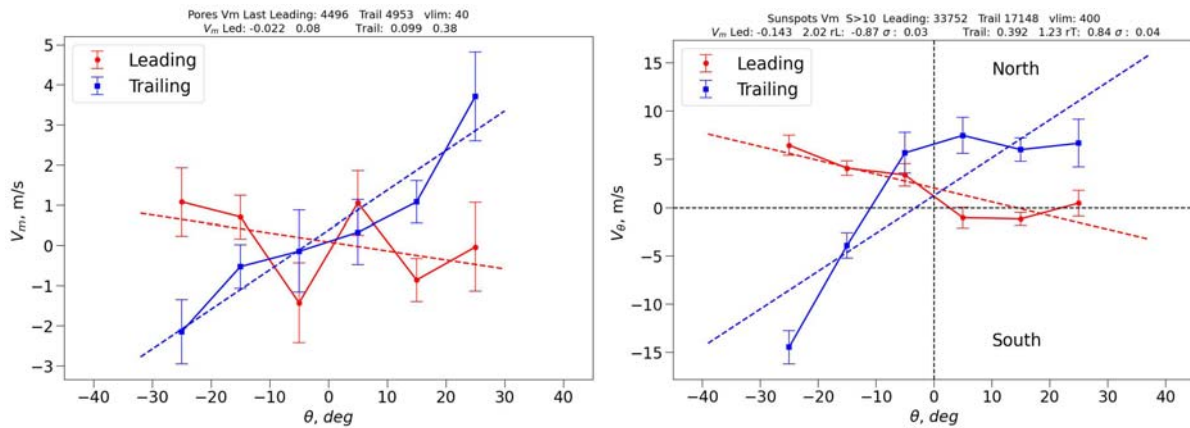


Рис. 2. Скорость меридионального смещения для солнечных пятен и пор ведущей и хвостовой полярности в зависимости от широты. Пунктиром представлены аппроксимации. Слева для солнечных пор. Справа для солнечных пятен. Отрицательные скорости перемещения соответствуют смещению в направления южного полюса, положительные к северному полюсу.

По нашим данным из положения отдельных пятен и пор можно также найти скорости меридионального перемещения, то есть перемещений в направлении полюсов Солнца. На рис. 2 представлены скорости перемещения отдельно для солнечных пор (рис. 2a) и для солнечных пятен (рис. 2b). Мы также разделили пятна обоих этих типов по знаку полярности магнитного поля. Можно отметить, что пятна хвостовой полярности, как правило, перемещаются к полюсу в каждом полушарии. А пятна ведущей полярности смещаются в направлении к экватору.

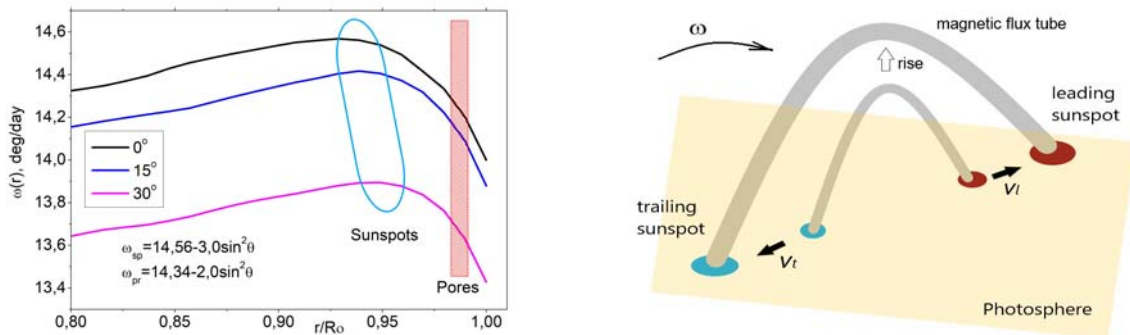


Рис. 3. Слева, схема формирования пятен и пор с глубиной Солнца. Скорость вращения с глубиной взята из [5]. Справа, схема влияния собственных движений пятен ведущей и хвостовой полярности при всплытии силовой трубки.

Выводы

Проведенный анализ показал, что солнечные поры вращаются медленнее, чем солнечные пятна. Возможно, это связано с разными глубинами “привязки” магнитных структур (рис. 3a). Поры – это мелкие структуры, на которых влияют верхние слои конвективной зоны. Регулярные солнечные пятна имеют большие глубины и потому вращаются быстрее. Также

мы получили, что регулярные солнечные пятна вращаются с большей дифференциальностью, чем солнечные поры. Возможно, это также связано с глубиной привязки солнечных пятен в области максимальных скоростей вращения под фотосферой Солнца (рис. 3). Можно сделать вывод, что, исследуя скорость вращения солнечных пятен, можно оценить скорость вращения лептоклина, или приповерхностного слоя с глубиной $r > 0.95R_{\odot}$.

На вращения пятен оказывают влияние собственные движения (рис. 3b). При вспышке силовой трубки происходит перемещение оснований. Это приводит к росту скорости вращения пятен ведущей полярности и замедлению наблюдаемой скорости вращения для хвостовых пятен. Заметим, что при распаде активной области или достижения максимальной удаленности между ведущей и хвостовой областями, пятна продолжают расходиться, то есть двигаться с различной скоростью вращения. Возможно, здесь влияет широтная удаленность пятен различной полярности, и как следствие дифференциальное вращение. Также гипотеза всплывающей магнитной трубки и существующего тилт-угла активной области может объяснить различные направления смещения в направлении север-юг для пятен ведущей и хвостовой полярности (рис. 2a,b).

Работа выполнена при частичной поддержке госзадания Минобрнауки РФ № 075-03-2024-113.

Литература

1. *Newton H.W., Nunn M.L.* // MNRAS, 1951, 111, 41.
2. *Gilman, P.A.; Howard, R.* // ApJ, 1984, 283, 385-391.
3. *Gilman, P.A.; Howard, R.* // ApJ, 1985, 295, p. 233-240.
4. *Tuominen, J.* // Z. Astrophys., 1962, 55, 110.
5. *Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al.* // Science, 2000, 287, 2456.