

УДК 523.98

Дрейф магнитных структур и вращение Солнца

О.С. Гопасюк, С.И. Гопасюк

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 1 декабря 2005 г.

Аннотация. Показано, что вращение Солнца (звезды) сопровождается процессами центрифугирования: происходит разделение легких и тяжелых структур. Более легкие по сравнению с окружающей плазмой образования всплывают и движутся к полярным зонам, тогда как более тяжелые структуры погружаются на большую глубину и движутся к экватору. Сопоставление данных наблюдений Солнца с результатами вращения дало возможность заключить, что структуры общего магнитного поля отвечают более легким образованиям. В то же время образования с пятнами следует отнести к структурам более тяжелым. Определено различие средних плотностей в этих магнитных образованиях по отношению к окружающей плазме. Кратко обсуждается проблема длительности циклов активности Солнца и звезд.

DRIFT OF MAGNETIC STRUCTURES AND THE SOLAR ROTATION, *by O.S. Gopasyuk, S.I. Gopasyuk.* It is shown that the rotation of the Sun (star) leads to the separation of magnetic structures into lighter and heavier ones in comparison with the surrounding plasma. Lighter structures emerge and move to polar zones whereas heavier structures dip on greater depth and move to the equator. The comparison of observational data with the results following from the rotation of the Sun allowed us to conclude, that structures of the general magnetic field correspond to lighter structures. At the same time structures with sunspots should be attributed to heavier structures, in comparison with surrounding plasma. The relative differences of plasma density in these formations are calculated. The problem of duration of solar and stellar activity cycles is briefly discussed.

Ключевые слова: вращение Солнца, пятна, структуры общего магнитного поля

1 Введение

Вращение Солнца исследовалось по пятнам (Койпер, 1957; Витинский и др., 1986), волокнам (Койпер, 1957), магнитному полю (Унз, Волтер, 1969; Вилкоккс и др., 1970), лучевым скоростям (Койпер, 1957; ЛаБоне, Ховард, 1981) и данным гелиосейсмологии (Косовичев и др., 1997). Наблюдения показали, что зоны пятнообразования в течение 11-летнего цикла мигрируют к экватору (закон Шперера) со средней скоростью 2-3 м/с (Койпер, 1957). В то же время образования, связанные с общим магнитным полем (волокна, протуберанцы), и сами магнитные структуры показывают движение к полярным зонам. Средняя скорость дрейфа волокон составляет около 5 м/с (Койпер, 1957). Движение волокон к полюсам отражает дрейф к полярным зонам фоновых магнитных полей (Степанян, 1983; Макаров, 1984).

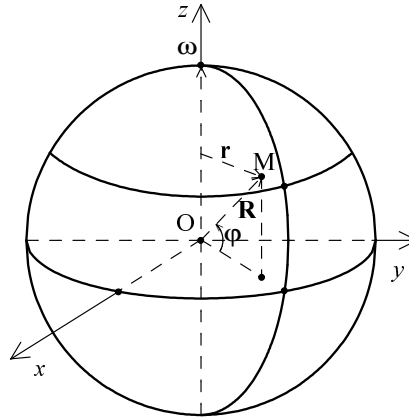


Рис. 1. Расположение принятых векторов в системе координат xyz

Целью нашей работы является выяснение влияния вращения Солнца на движение магнитных структур. Мы использовали данные о движениях пятен и волокон, которые являются в настоящее время наиболее полными и надежными.

2 Действие гидродинамических сил на магнитные структуры

Рассмотрим вращающуюся газообразную сферу, которая удерживается силами гравитации (рис. 1). Примем ось z , направленную вверх, за ось вращения сферы и точку O за центр притяжения. Возьмем внутри сферы тело в точке M . Расстояние его от начала координат $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$, а расстояние от оси вращения $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$. При этом $r = R \cdot \cos \varphi$ (φ – широта точки M). Вращение сферы принято однородным и с постоянной угловой скоростью ω , направленной по оси вращения z .

Во вращающейся плазме плотности ρ_p находится погруженное в нее тело плотности ρ_m . На тело действует сила давления. При равномерном вращении гравитирующей массы плазмы, сила давления складывается из архимедовой подъемной силы (на единицу объема тела), направленной вдоль радиуса R

$$\mathbf{F}_A = -(\rho_m - \rho_p)\text{grad}\Omega \quad (1)$$

и силы центробежной, отнесенной к единице объема

$$\mathbf{f} = (\rho_m - \rho_p)\omega^2 \mathbf{r}. \quad (2)$$

Центробежная сила \mathbf{f} имеет радиальную, вдоль радиуса Солнца, составляющую

$$f_R = (\rho_m - \rho_p)\omega^2 R \cos^2 \varphi \quad (3)$$

и меридиональную составляющую, параллельную поверхности Солнца

$$f_L = -(\rho_m - \rho_p)\omega^2 R \cos \varphi \sin \varphi. \quad (4)$$

Поскольку $|\text{grad}\Omega| = g$ (g – ускорение силы притяжения), то в результате вдоль радиуса гравитирующей массы плазмы на основании выражений (1) и (3) на единицу объема тела действует подъемная сила величиной:

$$F_R = -(\rho_m - \rho_p)(g - \omega^2 R \cos^2 \varphi). \quad (5)$$

Она состоит из архимедовой подъемной силы в неподвижной гравитирующей газовой сфере и силы, обусловленной вращением сферы. Отсюда следует хорошо известный факт: более легкие

тела всплывают, а более тяжелые – тонут. При этом центробежная сила уменьшает действие силы гравитации.

Сила f_L (выражение (4)) создает в меридиональном направлении движение тела, погруженного во вращающуюся плазму. Если плотность тела меньше плотности плазмы на данном уровне, то сила направлена от экватора к полярным зонам. Однако если плотность тела больше плотности плазмы, то сила f_L направлена в противоположную сторону и приводит к движению тела от полярных зон к экватору. Сопоставляя эти результаты с данными наблюдений дрейфа магнитных структур на Солнце (Койпер, 1957; Вилкоккс и др., 1970), находим аналогии. Магнитные структуры общего магнитного поля движутся во вращающейся газовой сфере к полярным зонам подобно движению более легких, по сравнению с окружающей плазмой, тел. В то же время, пятна движутся к экватору аналогично более тяжелым, по сравнению с окружающей плазмой, телам. Продолжая аналогию, мы приходим к выводу, что магнитные структуры общего магнитного поля являются более легкими по сравнению с окружающей плазмой, а пятна оказываются более тяжелыми образованиями.

3 Параметры плазмы в магнитных структурах

На движущееся тело действует сила сопротивления плазмы. Величина ее зависит от формы тела, а также и от состояния плазмы. В атмосфере Солнца плазма является сильно турбулентной, по крайней мере, в фотосферных слоях. На это указывает уширение спектральных линий.

В подфотосферных слоях магнитные поля обычно сконцентрированы в трубках, которые движутся под действием турбулентных движений. Для определенности примем, что сечения их круглой формы. Сила давления набегающего потока жидкости на цилиндр (сила сопротивления, испытываемая движущимся в жидкости цилиндром) (Ламб, 1947):

$$F_P \approx ah\rho_p u^2, \quad (6)$$

где u – скорость набегающего потока плазмы, обтекающей цилиндр, a – радиус сечения цилиндра и h – высота его. Сила F_P отнесена ко всему цилиндру. Примем, что сила с которой действует движущаяся плазма на магнитные структуры, определяется также выражением (6). При этом плотность плазмы по объему всей магнитной структуры принята одинаковой. После умножения выражения (4) на объем элемента магнитной петли $\pi a^2 h$, и приравнявая его выражению (6), находим:

$$\frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_p} = \frac{u^2}{\pi a \omega^2 \cos \varphi \sin \varphi}. \quad (7)$$

Для структур общего магнитного поля $\rho_p - \rho_m > 0$, а для структур с пятнами $\rho_p - \rho_m < 0$. Сила F_P , представленная выражением (6), меняет направление в соответствии с изменением знака $\rho_p - \rho_m$.

На основании условия равновесия

$$P_m + \frac{H_m^2}{8\pi} = P_p, \quad (8)$$

где P_m – давление плазмы, $H_m^2/(8\pi)$ – давление магнитного поля внутри магнитной петли, P_p – давление окружающей плазмы получаем зависимость относительной разности плотностей плазмы в магнитной петле от напряженности магнитного поля. Так как $P = kT\rho/m$, то при однородной плотности внутри петли и одинаковой температуре плазмы как внутри, так и вне магнитной структуры ($T_m = T_p$) условие (8) принимает вид:

$$\frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_p} = \frac{H_m^2}{8\pi P_p}. \quad (9)$$

Для магнитных структур с пятнами такой связи (9) не имеется. Для структур общего магнитного поля на основании выражения (9) получаем

$$H_m^2 = \frac{8P_p u^2}{a\omega^2 R \cos \varphi \sin \varphi}. \quad (10)$$

На основании выражения (7) для магнитных структур были вычислены относительные разности плотностей $(\rho_m - \rho_p)/\rho_p$. В табл. 1 представлены результаты вычислений $(\rho_m - \rho_p)/\rho_p$ для магнитных структур с пятнами и без пятен (структуры общего магнитного поля) при наблюдаемой скорости их дрейфа u . Средняя глубина расположения магнитных структур под фотосферой была взята 1000 км. Для структур общего магнитного поля была вычислена средняя напряженность магнитного поля H_m при $P_p = 1.413 \cdot 10^5$ Па, отвечающая глубине 1000 км. Значение H_m также приведено в табл. 1.

Таблица 1. Результаты вычислений

Структуры	a , км	u , м/с	φ , °	$(\rho_m - \rho_p)/\rho_p$	H_m , Гс
с пятнами	3000	2	30	$1.72 \cdot 10^{-4}$	–
без пятен	1000	5	45	$-2.79 \cdot 10^{-3}$	315

Результаты вычислений показали, что по мере увеличения плотности в магнитных структурах с пятнами скорость дрейфа быстро растет. С увеличением скорости дрейфа магнитных структур общего магнитного поля растут напряженность магнитного поля H_m в них и относительная разность плотностей $(\rho_p - \rho_m)/\rho_p$. При напряженности 1500 Гс, отвечающей появлению пятен в магнитной структуре (Стешенко, 1967), скорость дрейфа оказывается равной ~ 25 м/с, что существенно выше наблюдаемой.

4 Заключение

Вращение Солнца (звезды) сопровождается процессами центрифугирования: происходит разделение структур на легкие и тяжелые. Более легкие по сравнению с окружающей плазмой образования всплывают и движутся к полярным зонам, тогда как более тяжелые структуры погружаются на большую глубину и движутся к экватору.

Сопоставление данных наблюдений магнитных структур с результатами вращения Солнца дало возможность заключить, что структуры общего магнитного поля отвечают более легким образованиям. В то же время образования с пятнами следует отнести к структурам более тяжелым. Определено различие средних плотностей в этих магнитных образованиях по отношению к окружающей плазме. В структурах общего магнитного поля это отношение $(\rho_p - \rho_m)/\rho_p = 2.79 \cdot 10^{-3}$ соответствовало средней напряженности поля, равной примерно 315 Гс. Для структур с пятнами $(\rho_m - \rho_p)/\rho_p = 1.72 \cdot 10^{-4}$ величина очень малая, но ее оказывается достаточно, чтобы магнитная структура, как целое, двигалась в другом направлении (к экватору).

Скорость дрейфа магнитных структур зависит прямо пропорционально от угловой скорости вращения звезды. В звездах, для которых угловая скорость вращения больше солнечной, скорость дрейфа магнитных структур к экватору и, соответственно, к полярным зонам выше. По аналогии с Солнцем следует ожидать, что магнитные структуры на таких звездах должны достигать экваториальных и полярных зон за более короткое время. Вследствие чего за более короткое время должна происходить и смена полярности общего магнитного поля звезды. А это означает, что у таких звезд становится короче длительность цикла магнитной активности. На звездах со скоростью осевого вращения меньшей, чем у Солнца, длительность магнитного цикла должна быть больше. Таким образом, при всех других равных условиях получается, что чем выше скорость вращения звезды, тем меньше должна быть продолжительность цикла ее магнитной активности. Частая смена полярности магнитных полей требует их эффективной генерации. Это накладывает определенные условия на эффективность работы динамо.

Литература

- Вилкоккс и др. (Wilcox J.M., Schatten K.H., Tanenbaum A.S., Howard R.) // Solar Phys. 1970. V. 14. N. 2. P. 255.
- Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. // Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986.
- Койпер Дж.П. // Солнце. М.: Изд-во иностр. лит. 1957.
- Косовичев и др. (Kosovichev A.G., Schou J., Scherrer P.H. et al.) // Solar Phys. 1997. V. 170. N. 1. P. 43.
- ЛаБоне, Ховард (LaBonte V.J., Howard R.) // Solar Phys. 1981. V. 73. N. 1. P. 3.
- Ламб Г. // Гидродинамика. М.Л. ОГИЗ – Гостехиздат. 1947.
- Макаров В.И. // Солн. данные. 1984. N. 9. С. 52.
- Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 67. С. 59.
- Стешенко Н.В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1967. Т. 37. С. 21.
- Унз, Волтер (Unz F., Walter K.) // Solar Phys. 1969. V. 8. N. 2. P. 310.