МАГНЕТИЗМ ЗВЕЗД С КОНВЕКТИВНЫМИ ОБОЛОЧКАМИ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

С. И. Плачинда

Крымская астрофизическая обсерватория
98409, Научный, Крым, Украина
e-mail: psi@crao.crimea.ua

"Какова природа общего магнитного поля Солнца как звезды?" Это один из актуальных вопросов современной физики Солнца, требующий ответа в связи с интенсивным изучением глобальных магнитных полей звезд с развитыми конвективными оболочками.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле играет фундаментальную роль в физике явлений активности, которые наблюдаются у Солнца и других звезд с развитыми конвективными оболочками. Сложная, зависящая от времени крупномасштабная структура магнитного поля на Солнце является результатом взаимодействия магнитного поля, дифференциального вращения и конвекции. В рамках феноменологической магнито-кинематической модели Бэбкока–Лейтона и $\alpha - \Omega$ динамо теории существуют только два крупномасштабных компонента поля на Солнце: тороидальное и осесимметричное полоидальное. Оба поля изменяют свою полярность с периодом, близким 22 годам. Эти представления о крупномасштабных составляющих магнитного поля Солнца сложились до обнаружения и установления характера поведения общего магнитного поля Солнца как звезды.

Впервые успешные измерения магнитного поля Солнца как звезды были выполнены в Крыму [1]. На сегодня существует достаточно длинный 40-летний ряд измерений, выполненных в Крымской астрофизической обсерватории (с 1968 г. по настоящее время, Украина), обсерватории Маунт Вилсон (1970–1982 гг., США), Стенфордской солнечной обсерватории им. Вилкокса (с 1975 г. по настоящее время, США), а также на Саянской обсерватории (с 1982 г. по настоящее время, Россия). На рис. 1 представлены нормированные к единой системе отсчета наблюдения трех обсерваторий (КрАО, МВО, ССОВ). Магнитное поле Солнца как звезды получило название общего магнитного поля – ОМП (General Magnetic Field of the Sun as a Star – GMFSS). ОМП Солнца является результатом осреднения продольного компонента магнитного поля всех магнитных структур по видимой поверхности.

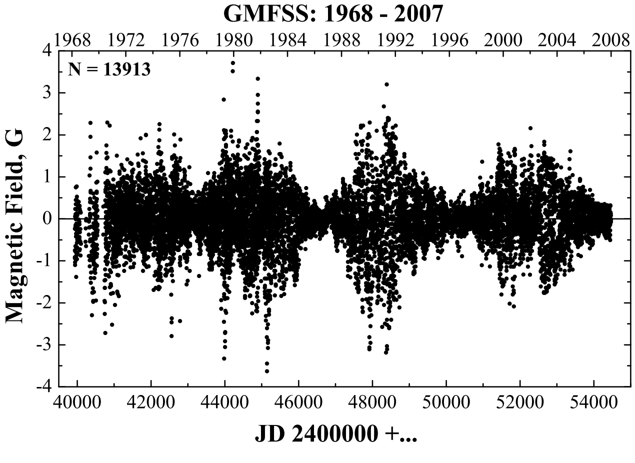

Рис. 1. ОМП Солнца как звезды. По оси Y отложены значения поля в гауссах, верхняя временная ось X показана в годах, а нижняя – в шкале юлианских дат

Как видно из рисунка, амплитуда изменения ОМП Солнца с периодом осевого вращения зависит от фазы 11-летней активности. В максимуме активности напряженность может достигать ± 2 Гс, а в минимуме активности напряженность падает до нескольких десятых гаусса. Это главное свойство ОМП Солнца впервые было описано в [2]. Частотный анализ всей совокупности данных показывает сложный спектр периодов в области "основного периода", близкого $\sim$26.9 дня. Характер кривой переменности ОМП с периодом осевого вращения характеризуется доминированием дипольной составляющей при, временами, значительной квадрупольной составляющей. Рис. 2 иллюстрирует поведение ОМП в минимуме и максимуме активности. Хорошо видно наличие как квадрупольной составляющей, так и переменность кривых изменения поля от периода к периоду.

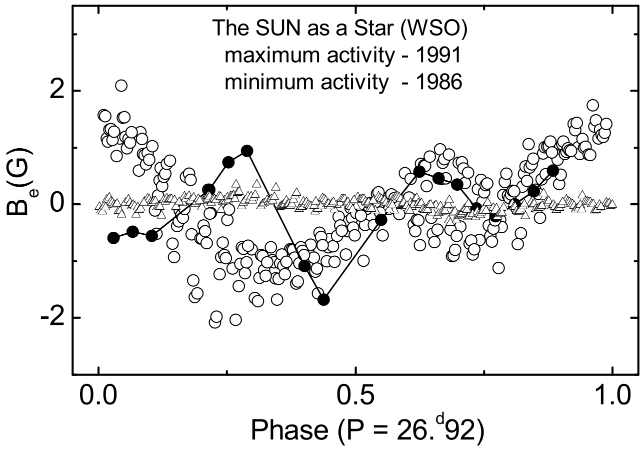

Рис. 2. ОМП Солнца как звезды по наблюдениям в Стенфорде. Открытыми кружками отмечены наблюдения в 1991 г., открытыми треугольниками отмечены наблюдения в 1986 г. Закрытыми кружками, соединенными прямой линией, отмечены наблюдения в течение одного периода в 1991 г., демонстрирующие свойство ОМП менять характер поведения на короткой шкале времен. Кривая поведения ОМП в минимуме активности построена после учета переменного сезонного вклада продольной составляющей осесимметричного диполя

ОБЩЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗВЕЗД С РАЗВИТОЙ КОНВЕКЦИЕЙ

На начало нового тысячелетия в ряде обзорных работ, выполненных на 2.6-м телескопе КрАО, факт существования ОМП был установлен для двух десятков звезд с развитой конвекцией всех классов светимостей. Поле могло достигать нескольких десятков гаусс у ряда гигантов [3]. Для двух звезд солнечного типа ξ Boo A (Sp G8 V) и 61 Cyg A (Sp K5 V) было установлено для эпохи наблюдений поведение ОМП с известными для них периодами осевого вращения [4, 5, 6]. По измерениям ОМП на 61 Cyg A было несколько раз зарегистрировано явление всплывания активных областей ($\sim 10^{23} \div 10^{24}$ Мкс), на порядок превосходящих по магнитному потоку наиболее мощные солнечные ($\sim 10^{22}$ Мкс). За последние пять лет, благодаря наблюдениям на ESPaDOnS и NARVAL (телескопы CFHT (Гавайи) и TBL (Франция)), количество опубликованных измерений ОМП у звезд с развитыми конвективными оболочками резко возросло. Отметим факт установления переменности ОМП с периодом вращения 589.64 дня у позднего одиночного гиганта Поллукса (Sp K0 III). У этого гиганта была зарегистрирована переменность ОМП с периодом осевого вращения от -1.40 до -0.12 Гс с характерной ошибкой измерений в пределах 0.11–0.35 Гс [7]. Эта точность уже близка точности измерений ОМП Солнца как звезды. В связи со сказанным, на первое место выходит вопрос о природе ОМП Солнца как звезды. Без ответа на этот вопрос интерпретация наблюдений ОМП у звезд с конвективными оболочками повисает в воздухе.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Природа ОМП на сегодня не установлена и это одна из глобальных загадок физики Солнца, которой посвящена достаточно обширная библиография. В литературе озвучены три точки зрения на природу ОМП:

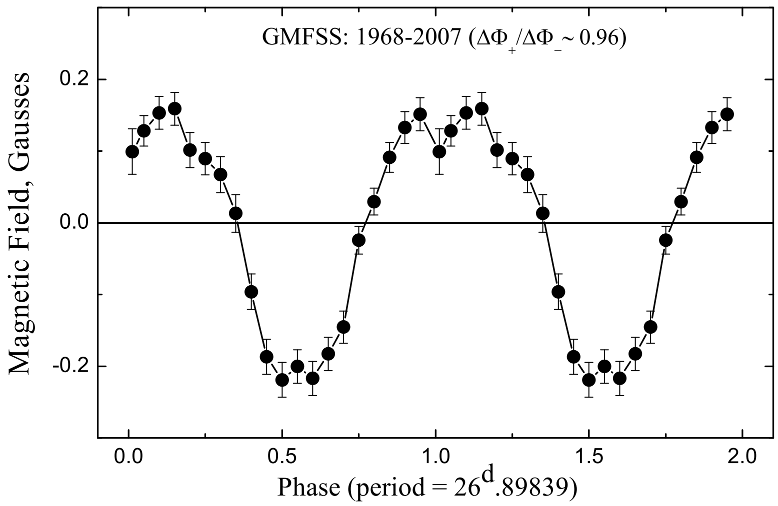

Рис. 3. Усредненное ОМП Солнца как звезды за сорок лет наблюдений

1. ОМП – результат "разбаланса" магнитного поля Солнца [8];
2. ОМП, наряду с известными тороидальным и полоидальным полями, может быть третьей крупномасштабной составляющей магнитного поля Солнца, формируемой в результате проникновения на поверхность глобального магнитного поля из лучевой зоны [5];
3. ОМП – продукт работы динамо механизмов [9].

Если ОМП является только результатом усреднения поверхностных полей, принадлежащих периодически меняющимся полоидальному диполю и тороидальной конфигурации, лежащей в основании конвективной оболочки, то мы могли бы наблюдать ту или иную картину циклической переменности ОМП с 11-летним или 22-летним периодом. Такой переменностью, например, может быть наблюдаемое изменение амплитуды переменности ОМП с 11-летним циклом. Но, с другой стороны, эту же величину цикла можно получить и из биения двух самых мощных частот в спектре мощности ОМП Солнца: "The beat period of the first two periodicities, 26.92^d and 27.13^d, equals 9.5 ± 1.1 yr and therefore might be physically connected with the 11 yr cycle. (Notice that an actual length of this cycle during the 20th century, determined by sunspot activity, is close to 10.5 yr.)" [2].

Необходимо отметить также следующий факт. Как сегодня известно благодаря гелиосейсмологическим исследованиям, радиативная часть Солнца вращается твердотельно. Для этого необходимо, чтобы лучевая зона была замагничена глобальным магнитным полем всего в несколько гаусс [10]. Т. е. радиативная часть Солнца представляет собой магнитную звезду со слабым магнитным полем. Проникает ли это поле на поверхность Солнца? Является ли оно затравочным полем для работы динамо? Не является ли это поле материнским для ОМП? Эти и ряд других вопросов, наряду со сложной картиной поведения ОМП, демонстрируют трудности в интерпретации природы ОМП.

Если ОМП не является реальной крупномасштабной конфигурацией, то при достаточно длительных наблюдениях оно должно осредняться и быть равным нулю. В действительности же ОМП не осредняется за 40 лет наблюдений, что равно по длительности двум магнитным циклам активности Солнца (рис. 3). Причем отношение положительного и отрицательного потоков близко к единице, как того и требует замкнутая магнитная конфигурация. Этот факт является прямым экспериментальным подтверждением того, что ОМП может быть еще одной глобальной конфигурацией магнитного поля Солнца наряду с известными полоидальным и тороидальным крупномасштабными полями [5].

На рис. 4 показано смещение в высокочастотную область всего спектра периодов ОМП, определенных по сорокалетним наблюдениям. Причем, самые мощные в спектре периоды короче периода экваториального вращения Солнца. Т. е. переменность ОМП характеризуют периоды, которые не наблюдаются в дифференциальном вращении Солнца ни земным наблюдателем по движению тех или иных поверхностных плазменных образований, ни методами гелиосейсмологии, которые дают картину поверхностного дифференциального вращения Солнца, совпадающую с результатами земных наблюдений. Наблюдаемые по измерениям ОМП дополнительные скорости значительно превышают скорости торсионных колебаний. Этот экспериментальный факт пока также не нашел своего объяснения [11].

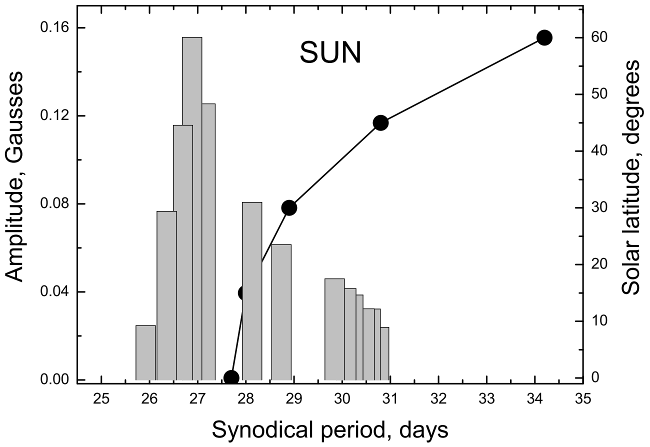

Рис. 4. Барами представлены значения синодических (в системе отсчета, связанной с земным наблюдателем) периодов в спектре мощности ОМП Солнца как звезды. Для них на левой оси Y отложены значения амплитуды пиков спектра мощности в гауссах. Соединенные линиями заполненные кружки показывают значения величин синодического периода осевого вращения Солнца для разных широт, значения которых нанесены на правой оси Y. По оси X отложены величины синодического периода для Солнца в днях

Вероятно, свет на природу ОМП Солнца как звезды помогут пролить измерения слабых магнитных полей внутри грануляционных ячеек, где вещество поднимается на поверхность из недр Солнца, и на границах этих ячеек, где остывшее вещество опускается. Такие измерения начаты в 2006 году при достаточно высоком пространственном разрешении ($\sim 0.2''$) на космическом телескопе HINODE.

Автор благодарен Государственному фонду фундаментальных исследований Украины за поддержку выполненных исследований (гранты: Ф25.2/074 и M/364).

[1] *Severny A.* Is the Sun a Magnetic Rotator? // Nature. – 1969. – **224**. – P. 53–54.

[2] *Kotov V. A., Scherrer R. H., Howard R. F., Haneychuk V. I.* Magnetic Field of the Sun as a Star: The Mount Wilson Observatory Catalog 1970–1982 // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1998. – **116**. – P. 103–117.

[3] *Plachinda S. I.* Measurements of general magnetic fields on stars with vigorous convective zones using high-accuracy spectropolarimetry // NATO Science Series. – 2004. – **161**. – P. 351–367.

[4] *Plachinda S. I.* Magnetic field of the Sun as a star and two solar-like stars ξ Boo A and 61 Cyg A // In: Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity. 2004. IAU Symp. N 223 – 2004. – P. 689–690.

[5] *Plachinda S. I., Tarasova T. N.* Magnetic Field Variations with a Rotational Period on Solar-like Star ξ Bootis A // Astrophys. J. – 2000. – **533**. – P. 1016–1022.

[6] *Petit P., Donati J.-F., Auriere M., et al.* Large-scale magnetic field of the G8 dwarf ξ Bootis A // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2005. – **361**. – P. 837–849.

[7] *Auriere M., Wade G. A., Konstantinova-Antova R., et al.* Discovery of a weak magnetic field in the photosphere of the single giant Pollux // Astron. and Astrophys. – 2009. – **504**. – P. 231–237.

[8] *Haneychuk V. I., Kotov V. A., Tsap T. T.* On stability of rotation of the mean magnetic field of the Sun // Astron. and Astrophys. – 2003. – **403**. – P. 1115–1121.

[9] *Livshits I. M., Obridko V. N.* Variations of the dipole magnetic moment of the Sun during the solar activity cycle // Astron. Rep. – 2006. – **50**. – P. 926–935.

[10] *Gough D. O., McIntyre M. E.* Inevitability of a magnetic field in the Sun's radiative interior // Nature. – 1998. – **394**. – P. 755–757.

[11] *Plachinda S., Baklanova D., Han I., et al.* General Magnetic Field of the Sun as a Star as Indicator of Massive Streams Flowing on the Sun // Odessa Astron. Publ. – 2008. – **21**. – P. 94–96.