

# О ПРОБЛЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗВЕЗД В РАЗНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

В. В. Бутковская

© 2009

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” МОН Украины  
98409 АР Крым, Научный  
e-mail: varya@crao.crimea.ua

---

Представлены результаты измерения в отдельных спектральных линиях эффективного магнитного поля классической магнитной Ар-звезды  $\beta$  Северной Короны и результаты моделирования конфигурации магнитного диполя для этой звезды. Показано, что для детального изучения топологии магнитного поля на поверхности  $\beta$  Северной Короны необходимо выполнить измерения и анализ магнитного поля по каждой спектральной линии в отдельности и только после этого отбирать подходящие линии для расчета по методу LSD и дальнейшего моделирования.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Неизученным эффектом, наблюдаемым у магнитных звезд, является тот факт, что эффективное магнитное поле, измеренное разными авторами, значительно отличается друг от друга (см., например, [7]). При этом различаются средние значения и амплитуды фазовых кривых магнитного поля, а также характер переменности.

Сегодня для измерения эффективных магнитных полей звезд с целью увеличения соотношения сигнал/шум чаще всего используют два метода:

- LSD-метод, разработанный Донати (Donati) и др. [3] и использующий для расчета магнитного поля средние профили, полученные по большому числу нормированных спектров (в эшелельных спектрах холодных звезд число выбранных линий может превышать 1000);
- расчет магнитного поля по отдельным спектральным линиям с последующим вычислением средневзвешенного магнитного поля по всем линиям.

Второй метод применяется в КрАО и, в отличие от LSD, позволяет измерять магнитные поля звезд по отдельным спектральным линиям. Тем не менее, в общем случае оба этих метода предполагают использование наборов спектральных линий, часто принадлежащих разным химическим элементам. Эти химические элементы могут пребывать в разных состояниях ионизации, или находиться в разных атмосферных слоях, или быть сосредоточенными в пятнах (в случае химически пекулярных звезд) и т.п. Поэтому в качестве одной из возможных причин наблюдаемого различия кривых магнитного поля, получаемых у магнитных звезд разными авторами, была названа неоднородность распределения химических элементов в атмосфере звезды. Систематическое различие в кривых эффективного магнитного поля, построенных по спектральным линиям различных химических элементов, подтверждено, например, в работах [6, 12]. Но следует отметить, что индивидуальные значения магнитного поля в этих работах получены с помощью LSD-метода, т.е. рассчитаны по средним профилям целого набора спектральных линий того или иного химического элемента, возможно, сформированных в разных физических условиях (в том числе, в присутствии разных по величине магнитных полей).

В работах [2, 8] показано, что в случае классической магнитной звезды  $\beta$  Северной Короны значительно отличается также эффективное магнитное поле, измеренное по отдельным спектральным линиям. При этом использованные для измерений спектральные линии могут принадлежать одному химическому элементу. Аналогичная картина наблюдается у Солнца: магнитное поле Солнца как звезды, измеренное в спектральных линиях Fe  $\lambda$  6301.5 Å и 6302.5 Å, иногда отличается не только по величине, но и по знаку. В случае Солнца различие значений магнитного поля, полученных по разным линиям, связывают с тем, что эти линии формируются на разных глубинах в солнечной атмосфере [10], но в более общем случае целесообразно говорить о различии физических условий в областях формирования линий. Детальное изучение подобных явлений позволяет более точно установить структуру магнитного поля Солнца.

В отличие от магнитного поля Солнца, исследований в отдельных спектральных линиях магнитных полей звезд практически не проводилось. Поэтому на сегодняшний день нельзя сказать, насколько физически-корректным является определение магнитных полей звезд с помощью усредненных по многим спектральным линиям профилей. Другими словами, прежде, чем перейти к усреднению, нужно знать, какие наборы спектральных линий можно использовать в одной выборке.

В данной работе выполнено измерение в отдельных спектральных линиях эффективного магнитного поля классической магнитной Ар-звезды  $\beta$  Северной Короны. На основе полученных данных изучено поведение эффективного магнитного поля с периодом вращения звезды и приведены результаты моделирования конфигурации магнитного диполя.

## НАБЛЮДЕНИЯ

Спектрополяриметрические наблюдения  $\beta$  Северной Короны в области  $\lambda 6149 \text{ \AA}$  выполнены в течение 32 ночей с 1993 по 2004 г., с использованием спектрографа, установленного в фокусе кудэ 2.6-м рефлектора им. акад. Шайна (НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”). Отношение сигнал/шум одного спектра составляло 150–350, разрешение – 30 000.

Также проведено измерение магнитного поля  $\beta$  Северной Короны по наблюдениям, выполненным в течение четырех ночей в 2007 и 2008 годах на эшелъном спектрографе BOES (Bohyunsan Optical Astronomy Observatory Echelle Spectrograph, Южная Корея) с разрешением 45 000 [5].

Эффективное магнитное поле  $\beta$  Северной Короны измерено в спектральных линиях Fe I  $\lambda 6136.615 \text{ \AA}$ , Fe I  $\lambda 6137.692 \text{ \AA}$ , Cr II  $\lambda 6138.721 \text{ \AA}$ , Ba II  $\lambda 6141.713 \text{ \AA}$ , Ce II  $\lambda 6143.376 \text{ \AA}$ , Nd III  $\lambda 6145.070 \text{ \AA}$ , Fe II  $\lambda 6147.741 \text{ \AA}$ , Cr I  $\lambda 6152.439 \text{ \AA}$ , Ca I  $\lambda 6162.173 \text{ \AA}$  с использованием методики, подробно описанной в работах [1, 8, 9].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены кривые изменения эффективного магнитного поля  $\beta$  Северной Короны с фазами периода вращения звезды. Фазы периода вращения рассчитаны согласно эфемериде, приведенной в [11]:

$$JD = 2434204.70 + 18.4868 \pm 0.0006. \quad (1)$$

Для каждой спектральной линии методом наименьших квадратов рассчитан диполь, описывающий поведение эффективного магнитного поля, измеренного в этой линии, с фазами периода вращения звезды. Рассчитанные кривые, аппроксимирующие наблюдательные данные в предположении дипольного магнитного поля, показаны на рис. 1 сплошными линиями. Из рис. 1 видно, что рассчитанные кривые хорошо описывают наблюдаемые изменения.

В первом и втором столбцах таблицы 1 приведены названия химических элементов и длины волн, в третьем – потенциалы возбуждения. Амплитуды  $B_e$  и средние значения  $B_0$  аппроксимирующих кривых

Таблица 1. Параметры кривых изменения магнитного поля с периодом вращения  $\beta$  Северной Короны и параметры магнитного диполя этой звезды

Линия	Длина волны ( $\text{\AA}$ )	Потенциал возб. (эВ)	$B_e$ (Гс)	$B_0$ (Гс)	$B_{pol}$ (Гс)	$i$ ( $^\circ$ )	$\beta$ ( $^\circ$ )	$\alpha$ ( $^\circ$ )
Fe I	6136.615	2.453	$582 \pm 36$	$23 \pm 26$	$5200 \pm 200$	$22 \pm 6$	$90 \pm 4$	$13 \pm 14$
Fe I	6137.692	2.588	$821 \pm 24$	$137 \pm 17$	$6600 \pm 155$	$23 \pm 4$	$86 \pm 3$	$-3 \pm 7$
Cr II	6138.721	6.484	$1250 \pm 49$	$159 \pm 36$	$10600 \pm 333$	$22 \pm 5$	$87 \pm 3$	$-10 \pm 9$
Ba II	6141.713	0.704	$1158 \pm 38$	$459 \pm 28$	$14000 \pm 433$	$15 \pm 3$	$84 \pm 2$	$-4 \pm 12$
Ce II	6143.376	1.696	$1221 \pm 63$	$-448 \pm 45$	$13800 \pm 400$	$16 \pm 4$	$96 \pm 3$	$-3 \pm 13$
Nd III	6145.070		$1273 \pm 74$	$-261 \pm 53$	$12400 \pm 500$	$19 \pm 4$	$94 \pm 4$	$-7 \pm 18$
Fe II	6147.741	3.889	$998 \pm 28$	$177 \pm 20$	$10800 \pm 266$	$17 \pm 3$	$87 \pm 2$	$-7 \pm 9$
Cr I	6152.439	4.207	$1100 \pm 41$	$-11 \pm 30$	$9200 \pm 333$	$22 \pm 5$	$90 \pm 4$	$1 \pm 12$
Ca I	6162.173	1.899	$774 \pm 18$	$-224 \pm 13$	$8400 \pm 133$	$17 \pm 2$	$95 \pm 2$	$-7 \pm 8$
Все линии			$855 \pm 29$	$14 \pm 21$	$7400 \pm 200$	$22 \pm 4$	$90 \pm 3$	$-6 \pm 12$
[11]			$660 \pm 10$	$109 \pm 6$	$6800 \pm 33$	$18 \pm 1$	$87 \pm 1$	$-6 \pm 3$
[4]			$500 \pm 33$	$150 \pm 27$	$5600 \pm 266$	$16 \pm 5$	$85 \pm 4$	$0 \pm 20$

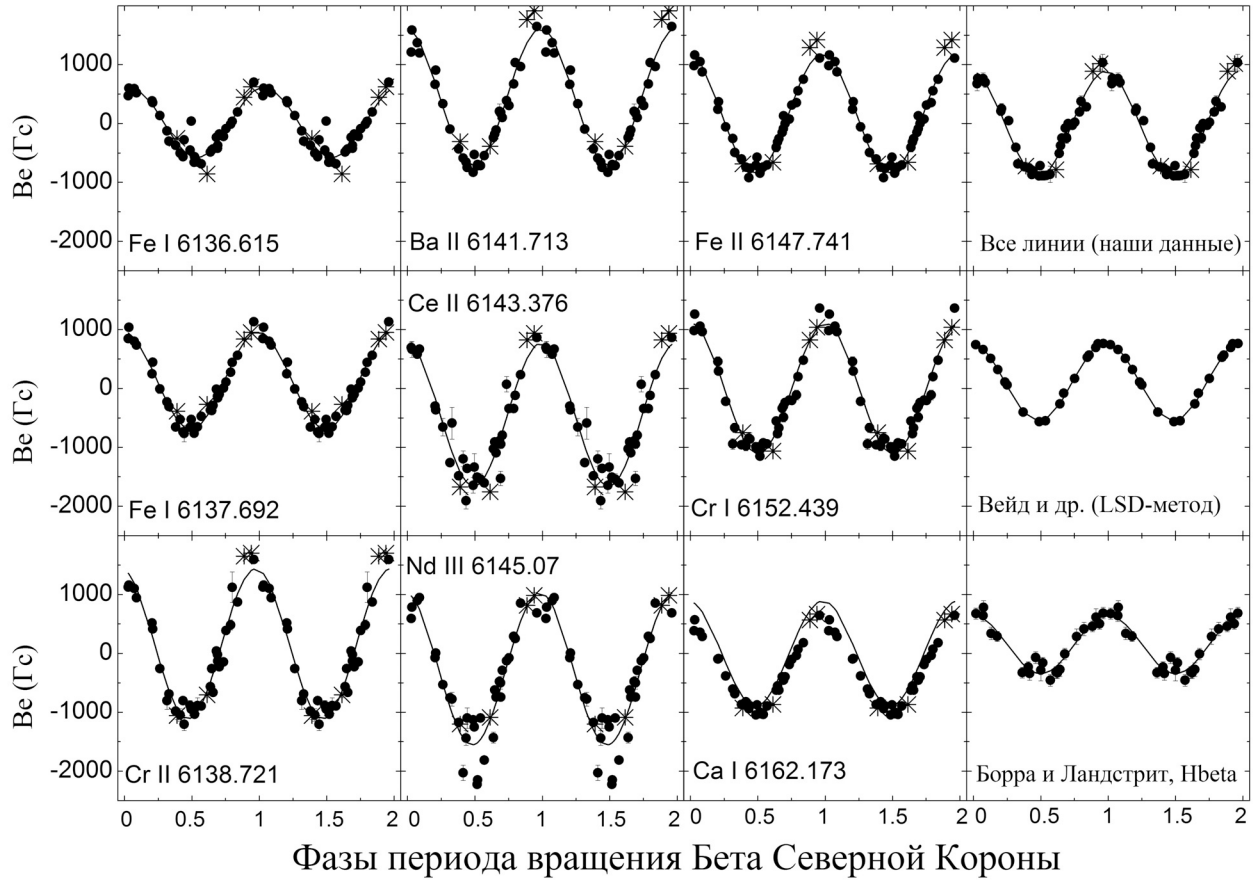


Рис. 1. Изменение эффективного магнитного поля  $\beta$  Северной Короны с фазами периода вращения звезды

приведены в четвертом и пятом столбцах таблицы 1. В четырех последних столбцах таблицы 1 приведены параметры диполей (напряженность на полюсе  $B_{pol}$ , угол между осью вращения звезды и лучом зрения  $i$ , угол между осью вращения и осью диполя  $\beta$  и сдвиг фазы максимума  $\alpha$  относительно используемой эфемериды (1)). Для сравнения в трех нижних строках таблицы 1 приведены те же параметры, рассчитанные по средневзвешенным значениям эффективного магнитного поля, рассчитанным по всем использованным нами спектральным линиям, а также по данным Вейда и др. [11] и Борры и Ландстрита [4] (линия  $H_{\beta}$ ).

Из таблицы 1 видно, что амплитуды  $B_e$  и средние значения  $B_0$  кривых эффективного магнитного поля значительно отличаются для различных спектральных линий. Влияет ли это различие на получаемые при моделировании параметры магнитного диполя? В данной работе методом наименьших квадратов были рассчитаны диполи, которые наиболее точно описывают поведение кривых на рис. 1.

Как видно из таблицы 1, углы  $i$ ,  $\beta$  и  $\alpha$  у диполей, рассчитанных с использованием разных спектральных линий, совпадают в пределах ошибок, а напряженность магнитного поля на полюсе значительно отличается. Что же касается разных спектральных линий одного и того же химического элемента, то полярные напряженности, рассчитанные по двум линиям хрома Cr II  $\lambda 6138 \text{ \AA}$  и Cr I  $\lambda 6152 \text{ \AA}$ , совпадают в пределах ошибок, тогда как полярные напряженности, рассчитанные по трем линиям железа Fe I  $\lambda 6136 \text{ \AA}$ , Fe I  $\lambda 6137 \text{ \AA}$  и Fe II  $\lambda 6147 \text{ \AA}$  значительно отличаются между собой.

Минимальную напряженность на полюсе показывают линия железа Fe I  $\lambda 6136 \text{ \AA}$  ( $5200 \pm 200 \text{ Гс}$ ) и водородная линия  $H_{\beta}$  ( $5600 \pm 266 \text{ Гс}$ ) [4], а максимальную (совпадающую в пределах ошибок) – линия Ba II  $\lambda 6141 \text{ \AA}$  ( $14000 \pm 433 \text{ Гс}$ ) и линии редкоземельных элементов Ce II  $\lambda 6143 \text{ \AA}$  ( $13800 \pm 400 \text{ Гс}$ ) и Nd III  $\lambda 6145 \text{ \AA}$  ( $12400 \pm 500 \text{ Гс}$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты этой работы показывают, что в случае  $\beta$  Северной Короны разные значения эффективного магнитного поля наблюдаются не только при его измерении по линиям различных химических элементов, но и по разным линиям одного и того же химического элемента. Подобное различие приводит к разным амплитудам и средним значениям кривых изменения эффективного магнитного поля с периодом вращения звезды. При моделировании магнитного диполя по кривым изменения магнитного поля, построенным для отдельных спектральных линий, это различие мало сказывается на параметрах  $i$ ,  $\beta$  и  $\alpha$ , но приводит к значимому различию напряженности магнитного поля на полюсе звезды.

Таким образом, для изучения топологии магнитного поля на поверхности звезды необходимо выполнить измерения и анализ магнитного поля по каждой спектральной линии в отдельности и только после этого отбирать и группировать подходящие линии для расчета по методу LSD и дальнейшего моделирования.

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

- [1] *Butkovskaya V. V., Plachinda S. I.* A study of the  $\beta$  Cephei star  $\gamma$  Pegasi: binarity, magnetic field, rotation and pulsations // *Astron. and Astrophys.* – 2007. – **469**. – P. 1069–1076.
- [2] *Butkovskaya V., Baklanova D., Han I., et al.* Rotational variation of the magnetic field of Beta CrB in different spectral lines // *Odessa Astron. Publ.* – 2008. – **21**. – P. 19–21.
- [3] *Donati J.-F., Semel M., Carter B. D., et al.* Spectropolarimetric observations of active stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 1997. – **291**. – P. 658.
- [4] *Borra E. F., Landstreet J. D.* The magnetic fields of the AP stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 1980. – **42**. – P. 421–445.
- [5] *Kim K.-M., Han I., Valyavin G., et al.* The BOES Spectropolarimeter for Zeeman Measurements of Stellar Magnetic Fields // *Publs Astron. Soc. Pacif.* – 2007. – **119**. – P. 1052–1062.
- [6] *Leone F., Catanzaro G., Catalano S.* Spectropolarimetric measurements of the mean longitudinal magnetic field of chemically peculiar stars. On the light, spectral and magnetic variability // *Astron. and Astrophys.* – 2000. – **355**. – P. 315–326.
- [7] *Leone F., Catanzano G.* Spectropolarimetric measurements of the mean longitudinal magnetic field of chemically peculiar stars. II. Phase relating the magnetic and luminosity variabilities // *Astron. and Astrophys.* – 2001. – **365**. – P. 118–127.
- [8] *Plachinda S. I., Tarasova T. N.* Precise spectropolarimetric measurements of magnetic fields on some solar-like stars // *Astrophys. J.* – 1999. – **514**. – P. 402–410.
- [9] *Plachinda S. I.* General magnetic field on convective stars // *Photopolarimetry in Remote Sensing / Eds G. Videen, Ya. S. Yatskiv, M. I. Mishchenko, Kluwer Acad. Publ., 2004.* – P. 351–368.
- [10] *Rezaei R., Schlichenmaier R., Schmidt W., Steiner O.* Opposite magnetic polarity of two photospheric lines in single spectrum of the quiet Sun // *Astron. and Astrophys.* – 2007. – **469**. – P. L9–L12.
- [11] *Wade G. A., Donati J.-F., Landstreet J. D., Shorlin S. L.* High-precision magnetic field measurements of Ap and Bp stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2000. – **313**. – P. 851–867.
- [12] *Wade G. A., Smolkin S.* Detection of nonuniform surface chemical abundance distributions on  $\beta$  Coronae Borealis // *Magnetic stars: Proc. Intern. Conf., held in the Special Astrophysical Observatory of the Russian AS, August 27–31, 2003 / Eds Yu. Glagolevskij, D. Kudryavtsev, I. Romanyuk.* – Nizhnij Arkhyz, 2003. – P. 205–209.