О ПРОБЛЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗВЕЗД В РАЗНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

В. В. Бутковская

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 β Северной Короны и результаты моделирования конфигурации магнитного диполя для этой звезды. Показано, что для детального изучения топологии магнитного поля на поверхности β 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, значимо 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 эшельных 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 β Северной Короны значимо 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 Ap-звезды β 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 β Северной Короны в области $\lambda\,6149$ Å 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 β Северной Короны по наблюдениям, выполненным в течение четырех ночей в 2007 и 2008 годах на эшельном спектрографе BOES (Bohyunsan Optical Astronomy Observatory Echelle Spectrograph, Южная Корея) с разрешением 45 000 [5].

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

РЕЗУЛЬТАТЫ

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

$$JD = 2434204.70 + 18.4868 \pm 0.0006. \tag{1}$$

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 β Северной Короны и параметры магнитного диполя этой звезды

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

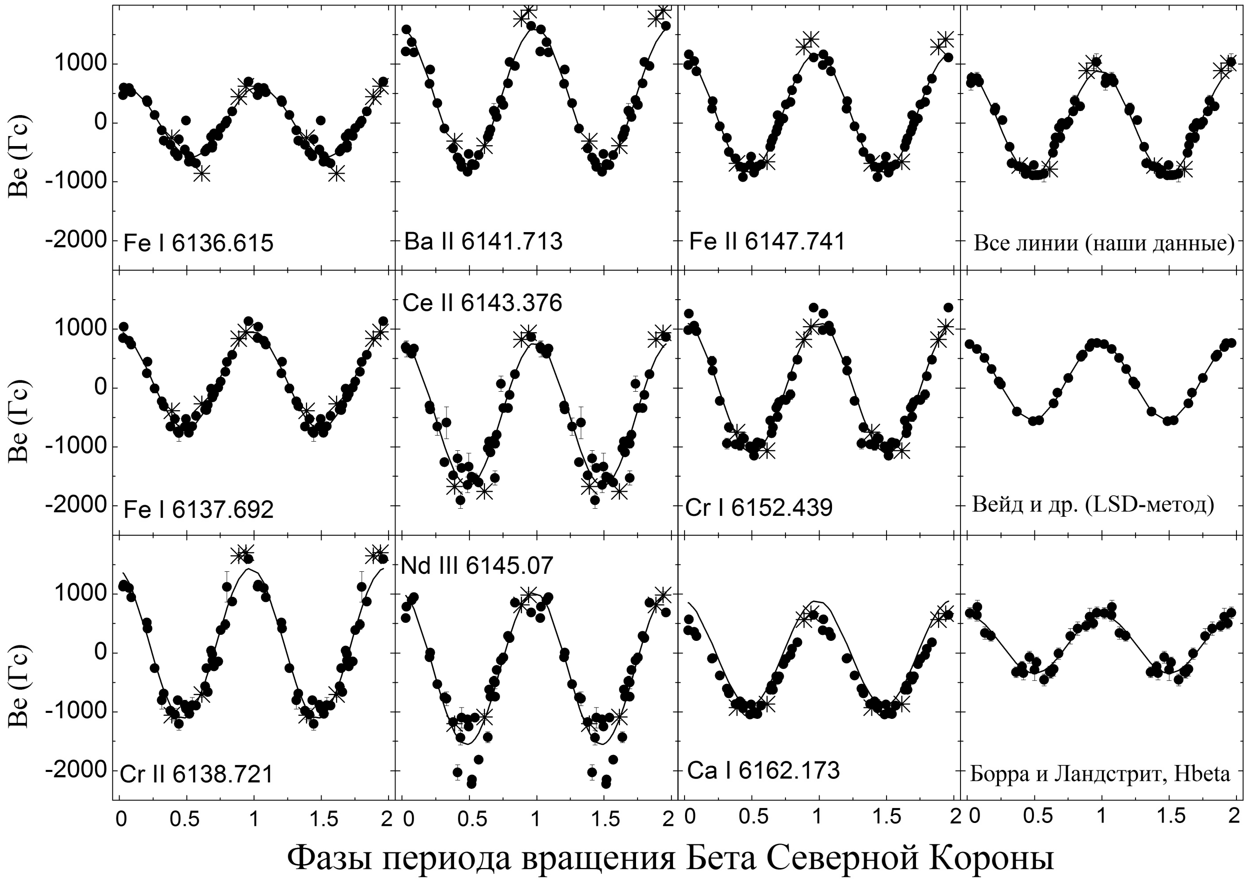

Рис. 1. Изменение эффективного магнитного поля β Северной Короны с фазами периода вращения звезды

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 β и сдвиг фазы максимума α 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_β).

Из таблицы 1 видно, что амплитуды B_e и средние значения B_0 кривых эффективного магнитного поля значимо 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, β и α у диполей, рассчитанных с использованием разных спектральных линий, совпадают в пределах ошибок, а напряженность магнитного поля на полюсе значимо отличается. Что же касается разных спектральных линий одного и того же химического элемента, то полярные напряженности, рассчитанные по двум линиям хрома Cr II λ 6138 Å и Cr I λ 6152 Å, совпадают в пределах ошибок, тогда как полярные напряженности, рассчитанные по трем линиям железа Fe I λ 6136 Å, Fe I λ 6137 Å и Fe II λ 6147 Å значимо отличаются между собой.

Минимальную напряженность на полюсе показывают линия железа Fe I λ 6136 Å (5200 ± 200 Гс) и водородная линия H_β (5600 ± 266 Гс) [4], а максимальную (совпадающую в пределах ошибок) – линия Ba II λ 6141 Å (14000 ± 433 Гс) и линии редкоземельных элементов Ce II λ 6143 Å (13800 ± 400 Гс) и Nd III λ 6145 Å (12400 ± 500 Гс).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты этой работы показывают, что в случае β 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, β и α, 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 β Cephei star γ 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 β 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.