

УДК 524.35-337

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУР МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЁЗД

© 2012 Ю. В. Глаголевский

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 26 января 2012 г.; принята в печать 11 апреля 2012 г.

Продолжена работа по программе исследования крупномасштабных структур магнитных полей химически пекулярных звезд. В данной работе исследовано восемь звезд, из которых три имеют структуру центрального диполя, три — структуру диполя, смещенного вдоль оси, и две — диполя, смещенного поперек оси. Для двух звезд, HD 62140 и HD 71866, имелись измерения с высокой точностью — $\sigma = 50$ и 80 Гс. Оказалось, что модельные фазовые зависимости совпадают с измерениями в пределах точности измерений. Этот результат показывает, что предположение дипольной структуры магнитных полей CP-звезд достаточно обосновано.

Ключевые слова: *звезды: химически пекулярные—звезды: магнитное поле*

1. ВВЕДЕНИЕ

В этой работе мы продолжаем программу исследования структур магнитных полей химически пекулярных (CP) звезд с целью выяснения основных свойств и параметров крупномасштабных магнитных конфигураций. Эти данные нужны для понимания природы магнитных CP-звезд и особенностей их эволюции, а также для исследования влияния магнитного поля на распределение химических аномалий по поверхности звезд. Предварительные результаты статистических исследований около 50 звезд обсуждались в работах [1–3]. Ценность наших исследований структур магнитных полей состоит в том, что они выполняются единой методикой. С учетом результатов данной работы число изученных объектов приближается к 60. Так как наблюдается большое разнообразие особенностей структур магнитных полей, планируется продолжение аналогичных исследований для получения по возможности полной информации о свойствах изучаемого класса объектов. Для исследования отбираются прежде всего те звезды, для которых имеется достаточное число измерений магнитного поля и известны необходимые параметры. В работах [1–3] приводится подробное описание методики моделирования и сделан ряд интересных выводов и предположений, которые были получены на основе анализа выборки около 50 магнитных звезд. Главный результат состоит в том, что все исследованные звезды оказались возможным промоделировать при предположении виртуального магнитного диполя. При этом для согласования модельной и наблюдаемой фазовых зависимостей изменения магнитного поля с фазой

периода вращения звезды достаточно было манипулировать только положением диполя внутри звезды и величиной магнитного момента, соответственно для подбора формы фазовой зависимости и ее амплитуды. Различие между измеренными величинами и модельной зависимостью практически всегда находится в пределах ошибок измерений ($\pm 1-2\sigma$). По схеме всех предыдущих публикаций по моделированию, рассматриваются поочередно параметры выбранных объектов и приводятся данные об особенностях каждой модели. По окончании цикла работ по моделированию предполагается провести статистический анализ полученных моделей и их параметров с целью приближения к разгадке природы и эволюции магнитных полей химически пекулярных звезд, а также к уточнению связи магнитного поля и диффузии химических элементов. В случае каких-либо особенностей распределения магнитного поля по поверхности в статьях всегда приводятся карты его распределения.

Ниже приводятся результаты моделирования очередной выборки магнитных звезд, изложенные по схеме, выработанной в предыдущем цикле аналогичных работ.

2. ИЗУЧЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ

a. HD 49976 (SrCrEu). Оценки магнитного поля взяты из работы [4], где оно измерялось фотографической техникой преимущественно по линиям Fe и Cr. Сильная переменность отмечается только у линий Ca II 3934 Å и Sr II 4215 Å. Линии остальных химических элементов слабо переменны, поэтому можно предположить, что магнитное

Результаты расчетов моделей

		Знак монополя	Долгота монополя	Широта монополя	B_p , Гс	B_s , Гс	β , град.	Δa , R_*
HD 49976	A	–	236	–4	± 2245	1960	86	0
		+	56	+4				
	B	–	270 ± 2	-4 ± 1	$+2525 \pm 150$	1315 ± 10	86 ± 1	0.3
		+	30 ± 2	$+4 \pm 1$	-2532 ± 150			
HD 51418	A	+	340	+11	$\pm 1912 :$	1126 :	79 :	0
		–	160	–11				
HD 54118	A ($i = 7^\circ$)	–	330	+1	$\pm 1911 :$	1055 :	89	0
		+	150	–1				
	A ($i = 14^\circ$)	–	330	+1	$\pm 9719 :$	5400 :	89	0
		+	150	–1				
HD 62140	A	+	340	+2	± 2382	1300	88	0
		–	160	–2				
	B	+	340 ± 2	0 ± 1	$+2019 \pm 200$	1566	90 ± 1	$0.045(-) \pm 0.005$
		–	160 ± 2	0 ± 1	-2639 ± 200			
HD 64740	A	+	180	–15	± 1294	841	75	0
		–	0	+15				
	B	+	180 ± 2	$+16 \pm 1$	$+1630 \pm 100$	849 ± 50	74 ± 1	$0.20(+) \pm 0.05$
		–	0 ± 2	-16 ± 1	-1200 ± 100			
HD 71866	A	+	0	+3	± 5636	3323	87	0
		–	180	–3				
	B	+	355 ± 2	$+2 \pm 1$	$+5153 \pm 300$	3470 ± 170	88 ± 1	$0.05(+) \pm 0.01$
		–	175 ± 2	-2 ± 1	-7017 ± 350			
HD 79158	A	–	0	+8	± 2998	1798	82	0
		+	180	–8				
	B	–	30 ± 2	$+2 \pm 1$	$+3168 \pm 150$	1762 ± 100	88 ± 1	0.1
		+	100 ± 2	-2 ± 1	-3178 ± 150			
HD 108662	A	–	72 ± 5	$+50 \pm 1$	$\pm 1600 \pm 150$	1040 ± 150	40 ± 1	0
		+	252 ± 5	-50 ± 1				

поле мало искажается вследствие неравномерного распределения элементов. В этой же работе даны необходимые для моделирования данные: $v \sin i = 31$ км/с, начальная фаза принята в момент $JD(\text{positive crossover}) = 2441298.76 + 2^d 976 E$, когда $B_e = 0$ Гс. По данным работы [5] $T_e = 9200$ К,

абсолютная болометрическая звездная величина $M_b = 0.9$, откуда радиус звезды $R = 2.2R_\odot$. Экваториальная скорость $v = 50.6R/P = 37$ км/с, поэтому $i = 56^\circ$.

Результаты расчетов моделей для этой и всех остальных звезд собраны в таблице. В первом

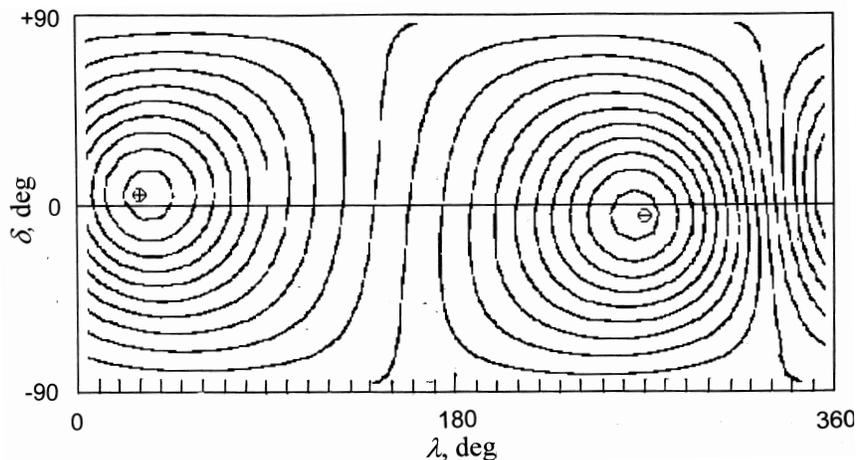


Рис. 1. Меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности HD 49976.

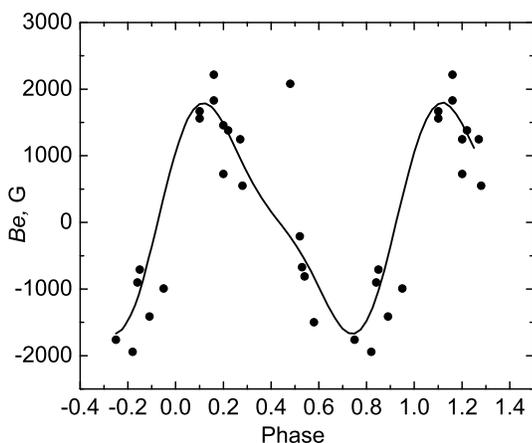


Рис. 2. Модель смещенного поперек оси диполя HD 49976.

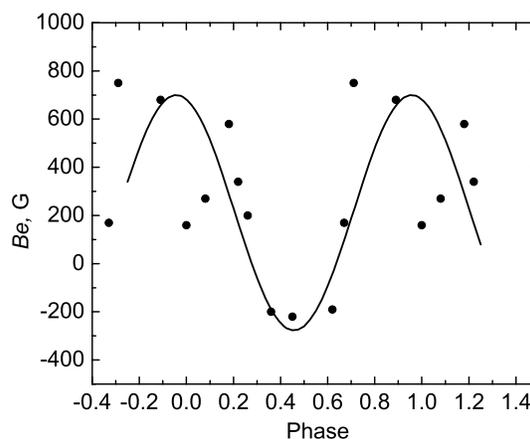


Рис. 3. Модель центрального диполя HD 51418.

столбце обозначены варианты расчетов: А — центральный диполь, В — смещенный диполь. Величина смещения Δa в долях радиуса звезды указана в последнем столбце. Знак указывает направление смещения: “+” — в сторону положительного монополя, “-” — в сторону отрицательного. B_p — величина поля на магнитных полюсах, B_s — среднее поверхностное поле $(B_s(\max) + B_s(\min))/2$, β — угол между осью диполя и осью вращения звезды.

Фазовая зависимость $B_e(\varphi)$ меняется в пределах от +2000 до -1800 Гс, это определяет широту обоих магнитных полюсов $\delta = \pm 4^\circ$, т.е. они находятся вблизи экватора вращения.

Модельная фазовая зависимость лучше соответствует наблюдениям при предположении смещенного поперек оси диполя. Меркаторская кар-

та распределения магнитного поля по поверхности показана на Рис. 1. Параметры такой модели приведены в таблице, а фазовая зависимость на Рис. 2. Монополи оказались смещенными от центра звезды на $\Delta a = 0.3R_*$, причем расстояние между монополями получилось равным $l = 0.5R_*$ (Значительная величина l наблюдается у всех звезд со смещенным поперек оси диполем). Параметр β определяется в случае модели смещенного диполя как угол между плоскостью, в которой находится диполь, и осью вращения.

Координаты магнитных полюсов в случае модели центрального или смещенного вдоль оси диполей совпадают с координатами магнитных монополей, а в случае смещения диполя поперек оси координаты магнитных полюсов другие. У звезды

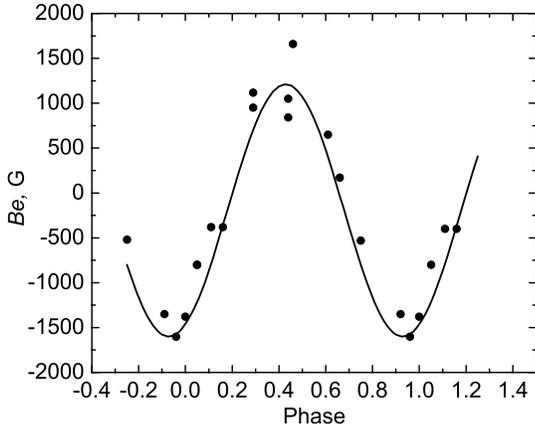


Рис. 4. Модель центрального диполя HD 54118.

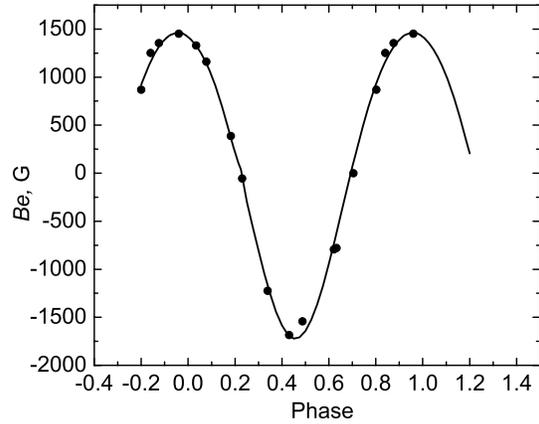


Рис. 5. Модель смещенного вдоль оси диполя HD 62140.

HD 49976 они следующие: отрицательный полюс $\lambda = 265^\circ$, $\delta = -5^\circ$; положительный полюс $\lambda = 35^\circ$, $\delta = +5^\circ$.

Точность полученных параметров зависит от точности определения угла i . Поскольку она, как правило, неизвестна, то ошибки определяются при предположении неточности, равной 5° .

b. HD 51418 (SrCrEu). Магнитное поле звезды измерялось по линиям металлов фотографическим методом в работе [6], в этой же работе сделана оценка $v \sin i = 15$ км/с. Период вращения $P = 5^{\text{d}}.4379$ определен в [7]. Температура звезды $T_e = 9500$ К, абсолютная болометрическая величина $M_b = -0.4$ [5]. Отсюда мы определили радиус звезды $R = 4R_\odot$. Далее делаем оценку $v = 37$ км/с, что дает угол наклона звезды к лучу зрения $i = 24^\circ$. Измерений магнитного поля мало и они неточны, поэтому рассчитана только модель центрального диполя, которую можно рассматривать как первое приближение. Параметры модели приведены в таблице. На Рис. 3 кружками показаны измеренные величины поля, а сплошной линией — модельная фазовая зависимость.

c. HD 54118 (Si). Магнитное поле измерено по линиям $\text{H}\alpha$ [8] и $\text{H}\beta$ [9], поэтому модель не искажена эффектом неравномерного распределения химических элементов. В этой же работе приведен момент начальной фазы $\text{JD}(\max B_e) = 2446831.251 + 3^{\text{d}}.27533 \text{ E}$. Температура звезды $T_e = 10200$ К [5], абсолютная болометрическая величина $M_b = 0.15$, откуда радиус звезды $R = 2.6R_\odot$. К сожалению, неизвестно точное значение $v \sin i$. В каталоге [10] приводится $v \sin i = 0$ км/с, что соответствует ориентации

оси звезды точно на наблюдателя. Если бы это было так, то мы не наблюдали бы переменности поля. Средняя ошибка определения $v \sin i$ обычно порядка 10 км/с, следовательно можно предположить, что реальное значение $v \sin i$ находится в пределах 0–10 км/с. Наши расчеты мы сделали для двух величин $v \sin i = 5$ и 10 км/с. Так как $v = 50.6R/P = 40$ км/с, получаем $i = 7^\circ$ и 14° . В Таблице даны параметры моделей центрального диполя для этих двух случаев.

Из полученных моделей видно, что B_p и B_s сильно различаются, однако ориентация диполя в звезде остается одинаковой. Измеренная фазовая зависимость $B_e(\varphi)$ обозначена на Рис. 4 точками, сплошной линией показана вычисленная зависимость для $i = 7^\circ$. Из данных таблицы видно, что при малых значениях угла i ошибки приводят к неуверенным результатам.

d. HD 62140 (SrCrEu). Магнитное поле измерено LSD-методом в работе [11] с высокой точностью, там же даны $v \sin i = 23$ км/с и $P = 4^{\text{d}}.28$. В каталоге [5] приведены $T_e = 10\,000$ К и абсолютная болометрическая звездная величина $M_b = 0.4$, откуда $R = 2.3R_\odot$. Экваториальная скорость $v = 27$ км/с и $i = 58^\circ$. Модель центрального и смещенного диполей получается с параметрами, приведенными в таблице. Наблюдения (точки) и модель для смещенного диполя (сплошная линия) приведены на Рис. 5. Отклонения измеренных величин от модельных оказываются в пределах ошибок измерений $\sigma = 50$ Гс, что подтверждает правильность дипольного представления магнитной конфигурации.

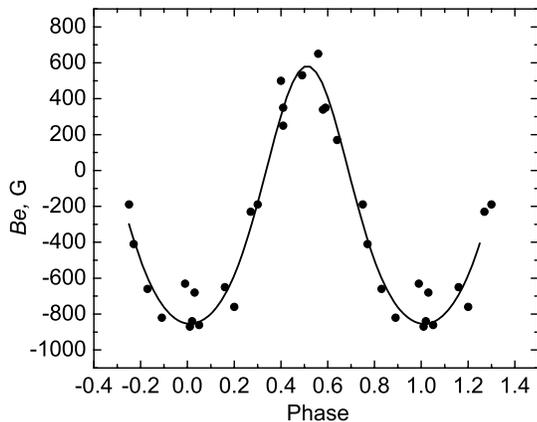


Рис. 6. Модель смещенного вдоль оси диполя HD 64740.

e. HD 64740 (He-r). Магнитное поле измерено по линии $H\beta$ в работах [12, 13] а также по линии He 5876 Å [12]. Это позволяет считать, что модель не подвержена влиянию неравномерного распределения химических элементов. Максимальная интенсивность линий He наблюдается в момент $JD\ 2444611.859 + 1^d 33026 E$ [12]. В работе [13] приведены следующие параметры звезды: $v \sin i = 160$ км/с, $R = 5R_{\odot}$, $i = 57^{\circ}$. В работе [11] $R = 3.2\text{--}6.4R_{\odot}$, $i > 41^{\circ}$, $\beta = 76^{\circ}$. В [14] $T_e = 25\ 000$ К, $R = 6.1R_{\odot}$.

В [5] $T_e = 23\ 850$ К, $M_b = -5.2$, откуда $R = 5.5R_{\odot}$, $v = 50.6R/P = 209$ км/с, а $i = 50^{\circ}$, что примерно соответствует результатам других авторов. Параметры модели центрального и смещенного вдоль оси приведены в таблице.

Много лучше модельные данные соответствуют наблюдениям при предположении смещения диполя вдоль оси в сторону положительного монополя. Поскольку диполь смещен вдоль его оси, то координаты магнитных полюсов совпадают с координатами монополей. Фазовая зависимость приведена на Рис. 6.

Зная карту распределения магнитного поля, можно сопоставить с ней фазовые изменения интенсивности линий C IV и Si IV, приведенные в [14]. Оказалось, что интенсивности линий C IV и Si IV достигают минимальной величины в областях обоих полюсов. Двойная волна максимумов интенсивностей показывает, что углерод и кремний концентрируются в виде кольца, совпадающего с магнитным экватором. В работах [15–17] утверждается, что Si должен скапливаться путем диффузии на магнитном экваторе, где магнитные силовые линии

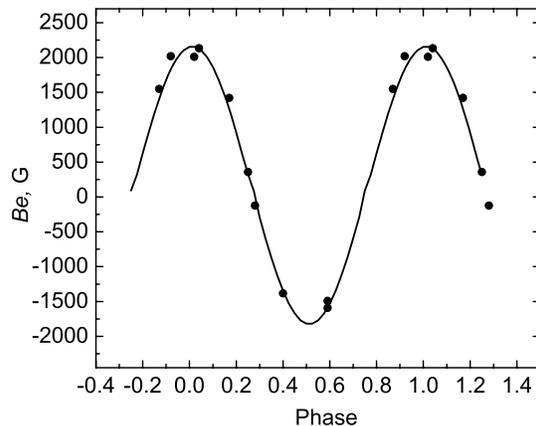


Рис. 7. Модель смещенного вдоль оси диполя HD 71866.

горизонтальны поверхности. Это было подтверждено в [18] на примере звезды HD 21699. Очевидно, что C и Si у HD 64740 тоже концентрируются под влиянием лучевого давления в областях с горизонтально направленными магнитными силовыми линиями.

f. HD 71866 (SrCrEu). В данном случае мы используем высокоточные измерения поля из [11], не подверженные влиянию неравномерного распределения химических элементов. Начальная фаза определяется из эфемериды $JD(\max\ He) = 2438297.5 + 6^d 80022 E$. Параметры $v \sin i = 14$ км/с [11], $T_e = 8650$ К и $M_b = 0.2$ из [5], откуда $R = 3.5R_{\odot}$, $v = 26$ км/с и $i = 32^{\circ}$. Две полученные модели — для центрального диполя и, более точная, для смещенного вдоль оси диполя — приведены в таблице. Фазовая зависимость $B_e(\varphi)$ для второго варианта приведена на Рис. 7. Отклонения измеренных величин поля от модельных находится в пределах ошибок, что подтверждает правильность дипольного представления магнитной конфигурации.

g. HD 79158 (He-w). Измерения магнитного поля выполнены по линиям $H\beta$ в работах [19, 20], вследствие чего эффект неравномерного распределения элементов отсутствует. Величина $T_e = 12\ 800$ К и абсолютная болометрическая звездная величина $M_b = -1.6$ взяты из [5]. Отсюда $R = 3.7R_{\odot}$, $v = 49$ км/с, $i = 32^{\circ}$. С этими данными вычисляем модель центрального и смещенного поперек оси диполя. Результаты приведены в таблице. Координаты отрицательного магнитного полюса: $\lambda = 355^{\circ}$, $\delta = +2^{\circ}$, положительного: $\lambda = 137^{\circ}$, $\delta = -2^{\circ}$, расстояние между монополями

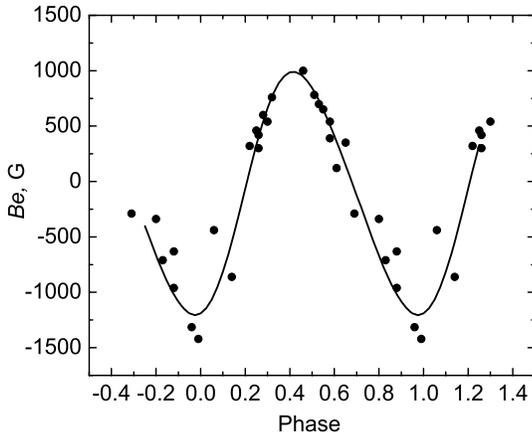


Рис. 8. Модель смещенного вдоль оси диполя HD 79158.

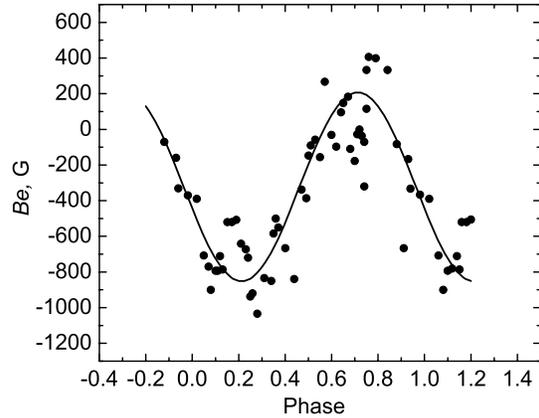


Рис. 9. Модель центрального диполя HD 108662.

$l = 0.12R_*$. Фазовая зависимость $B_e(\varphi)$ приведена на Рис. 8.

h. HD 108662 (SrCrEu). Измерения выполнены фотографическим методом по линиям металлов [21], фазы взяты там же, они вычислены для периода вращения $P = 5^d.0808$, определенного в [22]. Параметры $T_e = 9900$ К, $M_b = +0.6$, $R = 2.2R_\odot$ взяты из [5]. По $v \sin i = 19$ км/с [10] и $v = 50.6R/P = 22$ км/с определяем $i = 60^\circ$. Разброс измерений B_e велик, поэтому рассчитана только модель центрального диполя (Рис. 9).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характерной особенностью рассматриваемой серии работ является то, что измерения магнитных полей делались разными авторами с разной аппаратурой. Это, конечно, ухудшает качество получаемых моделей. Во многих случаях ошибки измерений столь велики, что невозможно определить тип структуры — центральный диполь, смещенный диполь или более сложная конструкция. В таких случаях модель строилась в предположении диполя в центре звезды, например, как в случае HD 51428. Параметры в таком случае оказываются неточными, но они обычно не отличаются в среднем больше чем на 20% от точных результатов при смещении диполя не более $0.1R_*$. Этот вывод мы делаем на основе того, что для каждой звезды вычисляем модель, наилучшим образом соответствующую наблюдениям, и модель центрального диполя, и можем видеть различия.

Из восьми исследованных звезд три промоделированы с помощью модели центрального диполя,

две звезды имеют смещенные поперек оси диполи, у трех звезд диполи смещены вдоль оси. Две звезды HD 62140 и HD 71866 были измерены с высокой точностью ($\sigma = 50$ и 80 Гс) и оказалось, что модельные фазовые зависимости согласуются с наблюдениями в таких же пределах. Этот результат еще раз подтверждает правильность предположения о дипольном характере структур магнитного поля у СР-звезд. Это означает, что распределение магнитного поля и направления силовых линий по поверхности и в глубине звезды именно такое, какое создает гипотетический магнитный диполь. Этот вывод мы делаем также по результатам исследований более 50 магнитных звезд, выполненных нами к настоящему времени. На основании данного исследования и указанных предыдущих работ видно, что для подавляющего большинства звезд форму фазовой зависимости определяет только положение диполя внутри звезды.

Сравнение фазовых зависимостей изменения интенсивности линий C IV и Si IV, приведенных в [14] для звезды HD 64740, с распределением магнитного поля показало, что углерод и кремний концентрируются на магнитном экваторе. Это подтверждает расчеты [15–17], предполагающие, что диффузия этих химических элементов происходит под действием лучевого давления в магнитном поле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, in *Proc. of Int. Conf. "Magnetic Stars", Nizhny Arkhyz, Russia, 2010* (SAO RAS, Nizhny Arkhyz, 2011), p. 147.
2. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **66**, 144 (2011).

3. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **54**, 231 (2011).
4. C. A. Pilachowski, W. K. Bonsack, and S. C. Wolff, *Astronom. and Astrophys.* **37**, 275 (1974).
5. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **35**, 33 (2002).
6. T. J. Jones, S. C. Wolff, and W. K. Bonsack, *Astrophys. J.* **190**, 579 (1974).
7. B. Musielok and J. Madey, *Astronom. and Astrophys.* **202**, 143 (1988).
8. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **87**, 961 (1975).
9. D. A. Bohlender, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson, *Astronom. and Astrophys.* **269**, 355 (1993).
10. A. Uesugi and I. Fukuda, *Contrib. from the Inst. of Astrophys. and Kwasan Obs.* **189**, 205 (1970).
11. G. A. Wade, J.-F. Donati, J. D. Landstreet, and S. L. S. Shorlin, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **313**, 851 (2000).
12. D. A. Bohlender, J. D. Landstreet, D. N. Brown, and I. B. Thompson, *Astrophys. J.* **323**, 325 (1987).
13. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **228**, 809 (1979).
14. S. N. Shore and D. N. Brown, *Astrophys. J.* **365**, 665 (1990).
15. S. Vauclair, J. Hardorp, and D. M. Pederson, *Astrophys. J.* **227**, 526 (1979).
16. G. Alecian and S. Vauclair, *Astronom. and Astrophys.* **101**, 16 (1981).
17. C. Megessier, *Astronom. and Astrophys.* **138**, 267 (1984).
18. Yu. V. Glagolevskij, A. V. Shavrina, J. Sylvestre, et al. *Astrophysical Bulletin* **64**, 166 (2009).
19. D. A. Bohlender, *IAUS* **162**, 155 (1994).
20. E. F. Borra, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson, *Astrophys. J. Suppl.* **53**, 151 (1983).
21. Yu. S. Rustamov, A. N. Khotnyanskij, *Sov. Astron. Lett.* **6**, 202 (1980).
22. G. Preston, K. Stepien and S. C. Wolff, *Astrophys. J.* **166**, 653 (1969).

Specificities of Magnetic Field Structures in Chemically Peculiar Stars

Yu.V. Glagolevskij

We continue our program of the study of large-scale structures of magnetic fields in chemically peculiar stars. In this paper we analyze eight stars, out of which three stars have the structure of a central dipole, three—the structure of a dipole shifted along the axis, and two—of a dipole shifted across the axis. High-precision measurements (with $\sigma = 50$ and 80 G) are available for two stars (HD 62140 and HD 71866, respectively). The model phase dependences agree with the measurements within the errors. This result shows that the hypothesis about the dipole structure of the magnetic fields of CP stars is well founded.

Keywords: *stars: chemically peculiar—stars: magnetic field*