

УДК 524.35-337/17

## МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЕВЯТИ СР-ЗВЁЗД ПО “ТОЧНЫМ” ИЗМЕРЕНИЯМ

© 2013 Ю. В. Глаголевский\*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 13 августа 2012; принята в печать 8 ноября 2012 года

Построены дипольные модели магнитного поля девяти СР-звезд по взятым из литературы измерениям линий металлов, выполненным LSD-методом с точностью 10–80 Гс. Параметры моделей сравнены с параметрами, полученными для тех же звезд по измерениям линий водорода. Для шести из девяти звезд получились одинаковые типы структур. Некоторые параметры, например, величина поля на полюсах  $B_p$  и среднее поверхностное магнитное поле  $B_s$ , у некоторых звезд заметно различаются вследствие различий амплитуд фазовых зависимостей  $B_e(\Phi)$  и  $B_s(\Phi)$ , полученных разными авторами. Отмечается, что значительное повышение точности измерений мало влияет на моделирование крупномасштабных структур поля, важнее иметь форму фазовой зависимости по достаточно большому количеству измерений поля, равномерно распределенных по фазам периода вращения. Делается вывод о сильном влиянии методов измерения зеемановских компонент на форму фазовой зависимости и о предпочтительности измерений магнитного поля по линиям водорода для моделирования крупномасштабных структур.

Ключевые слова: звёзды: магнитное поле—звёзды: химически пекулярные

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Продолжая программу исследования крупномасштабных структур магнитного поля СР-звезд [1], в этой статье приводим результаты моделирования девяти магнитных СР-звезд, продольное магнитное поле  $B_e$  которых с высокой точностью измерено в [2] методом LSD (Least-Squares Deconvolution) по линиям металлов. Результаты моделирования трех объектов из списка [2], HD 62140, HD 71866 и HD 32633, опубликованы ранее в работах [3, 4]. Использование высокоточных измерений (порядка десятков гаусс) продольного магнитного поля  $B_e$  для моделирования магнитных структур интересно с нескольких точек зрения.

1) Важно сравнить модельные и “точные” наблюдаемые фазовые зависимости изменения магнитного поля  $B_e(\Phi)$  для оценки применимости используемого метода моделирования.

2) Интересно выяснить причины большого различия в результатах моделирования у разных авторов, которое хорошо видно из данных, собранных в работе [5].

3) Интересно выяснить, почему наблюдается большое различие фазовых изменений магнитного поля одной и той же звезды, полученных разными авторами.

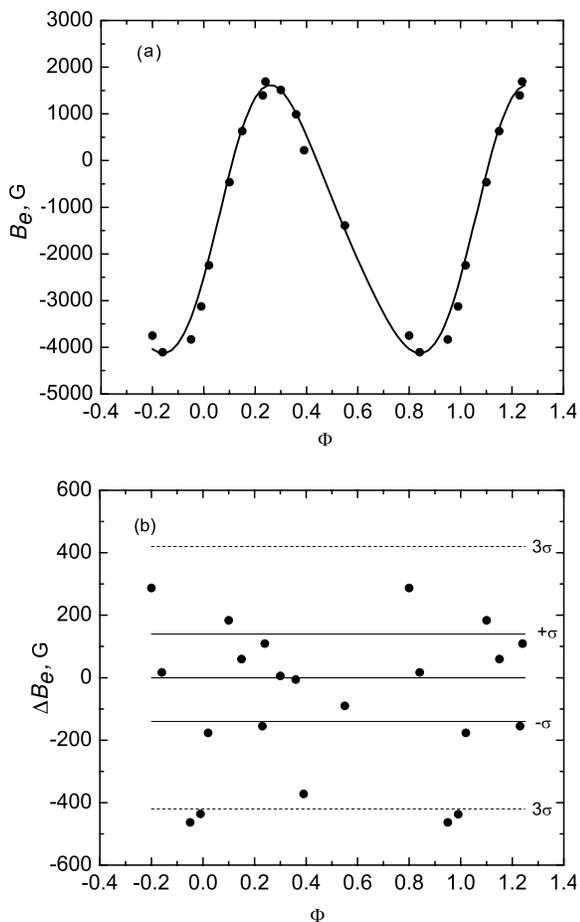
4) Предполагается выяснить, насколько надежны модели магнитных структур, определенные по измерениям, полученным по линиям водорода. “Водородные” измерения практически не подвержены влиянию неравномерного распределения химических элементов по поверхности. С другой стороны, LSD-методика фактически основана на измерениях по линиям металлов, чувствительных к неравномерности распределения по поверхности звезды. В работах [3, 4] показано, что модельные фазовые зависимости магнитного поля совпадают с наблюдаемыми в пределах ошибок, которые рекордно низки.

Рассмотрим по порядку модели всех звезд, которые измерены с высокой точностью в работе [2].

### 2. ИЗУЧЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ

*HD 32633.* Звезда уже исследовалась нами в работе [6] по усредненным измерениям нескольких авторов, в том числе работы [2]. Наблюдаемая фазовая зависимость лучше всего описывается моделью из двух диполей, отстоящих от центра звезды на  $\Delta a = 0.6R_*$ , где  $R_*$  — радиус звезды. Для выполнения поставленной задачи мы промоделировали магнитное поле звезды отдельно по LSD-измерениям. Угол наклона звезды принят  $i = 84^\circ$ , как в работе [6]. К сожалению, в области фаз  $\Phi = 0.4–0.8$  имеется только одно измерение,

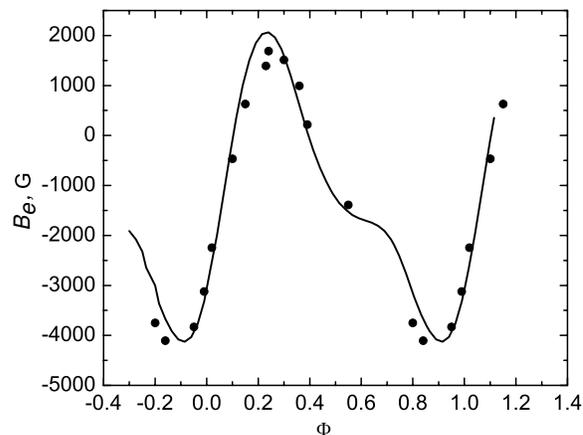
\*E-mail: glagol@sao.ru



**Рис. 1.** Сравнение модельной фазовой зависимости с наблюдениями для звезды HD 32633 при предположении смещенного поперек оси диполя. (a) точки — измерения, сплошная кривая — модель; (b) отклонения измеренных величин от модельной зависимости.

и непонятно, имеется ли на фазовой зависимости характерная “ступенька”, которая хорошо проявляется в измерениях других авторов, в том числе и по линиям водорода. Вследствие большого количества измерений можно считать форму зависимости  $B_e(\Phi)$  в работе [6] достаточно надежной. Для описания характерной “ступеньки” пришлось прибегнуть к модели с двумя диполями. В этой же работе приведена меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности.

Фазовая зависимость по LSD-измерениям выглядит проще и может быть промоделирована одним смещенным поперек оси диполем. На Рис. 1а точками отмечены измеренные величины, а сплошной кривой обозначена модельная зависимость. На Рис. 1б показаны отклонения измеренных величин поля от модельной кривой. Точки отклоняются в пределах  $3\sigma$ , что является формальным основанием принять полученную модель. Параметры модели приведены в Таблице 1. В этой таблице даны



**Рис. 2.** Сравнение модельной фазовой зависимости из [6] с наблюдениями [2] для звезды HD 32633 в предположении двухдипольной модели.

величина магнитного поля на магнитных полюсах  $B_p$ , величина среднего поверхностного магнитного поля  $B_s = (B_s(\max) + B_s(\min))/2$ , величина отклонения диполя от центра звезды  $\Delta a$  в единицах радиуса звезды, угол  $\beta$  между плоскостью, в которой находится диполь, и осью вращения, а также  $i$  — угол наклона оси вращения звезды к наблюдателю. Кроме параметров LSD-модели в таблице даны параметры для двухдипольной модели из [6]. Важнейший параметр, поверхностное поле  $B_s$ , в обоих случаях оказался практически одинаковым. Этот пример показывает, насколько качество наблюдательных данных влияет на результат моделирования. Нам представляется, что если бы на Рис. 1 в диапазоне фаз  $\Phi = 0.4-0.8$  было больше измерений, то характерная “ступенька”, возможно, проявилась бы. На Рис. 2 приведены фазовая зависимость, полученная LSD-методом, и наложенная на нее двухдипольная модельная зависимость из работы [6]. Видно, что модель с двумя диполями могла быть применима, если бы было больше измерений. Даже при точных измерениях из-за малого количества точек на фазовой зависимости мы потеряли информацию, важную для моделирования. Таким образом, достаточное количество наблюдений в сложных случаях более важно, чем точность измерений. Мы, вероятно, недоукаем много сложных структур вследствие недостаточного количества измерений.

*HD 40312 ( $\theta$  Aur).* Эта звезда уже была исследована нами по измерениям линий водорода [7]. Моделирование структуры магнитного поля этой звезды по LSD-измерениям выполнено с тем же углом  $i = 52^\circ$ . На Рис. 3а точками показаны данные измерений, а сплошная кривая — модель. Полученные модельные параметры магнитного поля приведены в Таблице 1. Наилучшее соответствие

Таблица 1. Параметры моделей магнитного поля

HD	$B_p$ , Гс	$B_s$ , Гс	$\Delta a, R_*$	$\beta$ , deg	$i$ , deg	Метод
32633	-16580	10278	0.1	40	84	LSD
	+16580		0.1			
	-42447	11500	0.6	48	84	H
	+42447		0.6			
	-19302		0.6	5		
	+19302		0.6			
40312	+388	333	-0.10	70	52	LSD
	-711					LSD
	+1420	650	-0.2	85	52	H
	-1420					
62140	+2019	1566	-0.045	90	58	LSD, H
	-2639					
65339	+6142	13110	-0.42	14	75.5	LSD
	-80240					
	+6029	13700	-0.45	13	73	H
71866	-91870					
	+5153	3470	-0.05	88	32	LSD
112185	-7017					
	+115	96	-0.1	64	50	LSD
112413	-212					
	+520	330	0.0	82	50	H
	-520					
	+2911	1040	0.20	81	45	LSD
	-858					
118022	+5300	2600	0.10	82	55	H
	-2890					
	+4907		0.05	71	50	[10]
	-1712					
137909	+8000		0.2	65	22	[13]
	-14400	5620	0.182	70	5.9	LSD
	+14400		0.182			
	-14400		0.182	75		
	+14400		0.182			
	-14400	5620	0.3	68	8	H

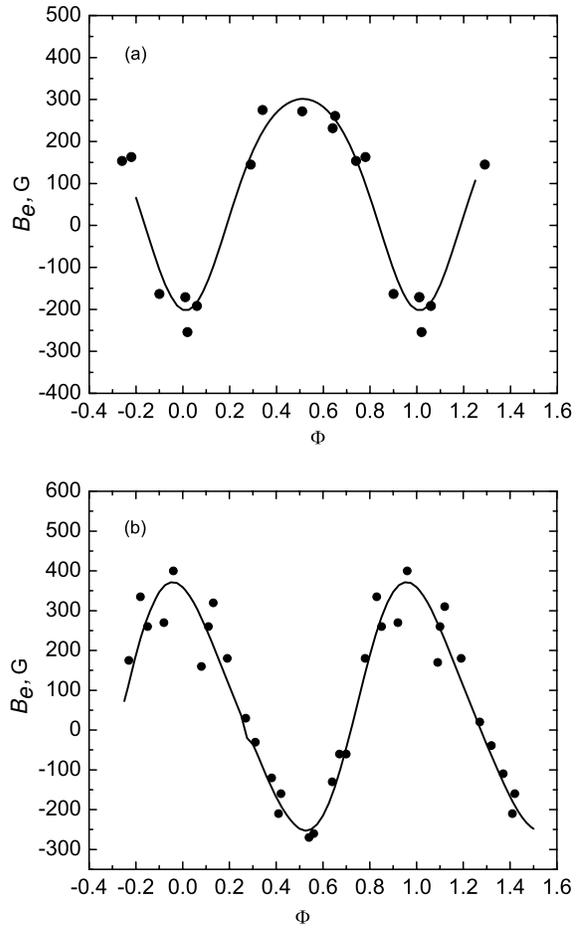


Рис. 3. Сравнение модельных фазовых зависимостей с наблюдениями для звезды HD 40312. Точки — измерения, сплошные кривые — модель  $B_e(\Phi)$ .

вычисленной фазовой зависимости  $B_e(\Phi)$  наблюдательным данным получилось при предположении модели смещенного вдоль оси диполя.

Сравним полученные параметры с теми, которые получены по водородным измерениям в [7]. В отличие от модели, полученной по LSD-измерениям, “водородная” модель получилась со смещением диполя поперек оси. Различие  $B_p$  и  $B_s$  в обеих моделях объясняется различием формы наблюдаемых фазовых зависимостей, хотя по амплитуде эти зависимости близки. Практически все отклонения измеренных LSD-величин от модельной кривой находятся в пределах ошибок. По величине разброса точек кажется, что реальная ошибка  $\sigma$  даже меньше 40 Гс, оцененных авторами. Хорошее согласие между наблюдениями и моделью позволяет предположить, что магнитная структура действительно соответствует предполагаемому магнитному диполю. В таком случае возникает проблема с “водородным” результатом, когда модельная зависимость тоже хорошо согласуется с наблюдаемой. Какой из этих методов дает

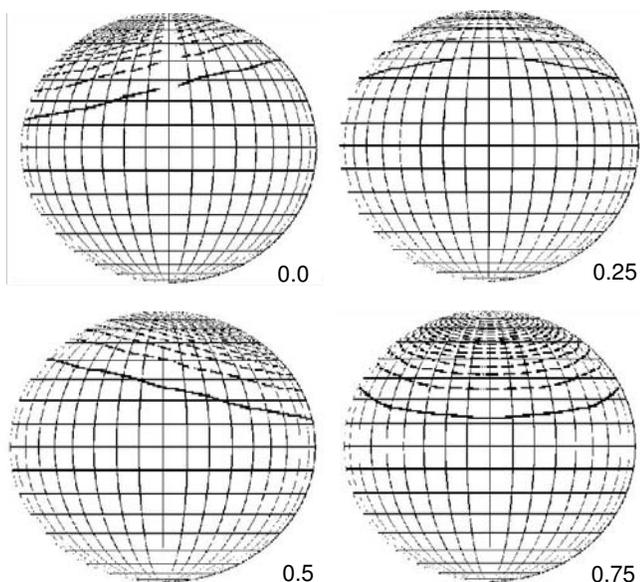


Рис. 4. Распределение магнитного поля по поверхности HD 65339. Указаны фазы периода.

искаженный результат? Это проблема. Различие между фазовыми зависимостями  $B_e(\Phi)$  видно даже на глаз. Возможно, что различие фазовых зависимостей происходит либо вследствие недостатка методик измерений, либо вследствие сильного влияния неравномерного распределения химических элементов по поверхности, которое, скорее всего, отражается на LSD-измерениях, сделанных по линиям металлов, несмотря на их высокую точность.

*HD 62140 (49 Cam)*. Модель этой звезды построена в работе [4]. Угол наклона звезды  $i = 58^\circ$ . Результаты вычислений приведены в Таблице 1. К сожалению, нет опубликованных измерений  $B_e$  по линиям водорода, но в работе [2] приведен Рис. 7, на котором нанесены одновременно LSD- и H-данные. Обе фазовые зависимости похожи по форме и по амплитуде, и можно предположить, что модели будут тоже одинаковые. Поэтому в Таблице 1 приводим одну общую для обоих вариантов строку. Измеренные LSD-данные совпадают с модельной фазовой зависимостью в пределах ошибок  $\sigma = \pm 40$  Гс, т.е. модель хорошо соответствует наблюдениям. Этот пример показывает, что бывают случаи, когда измерения разных авторов, выполненные разными методами, дают одинаковые результаты. Хорошее согласие между наблюдениями и моделью позволяет предположить, что магнитная структура действительно соответствует предполагаемому магнитному диполю.

*HD 65339 (53 Cam)*. Эта звезда одна из самых интересных по структуре поля. Кроме точных LSD-измерений  $B_e$  [2] имеются измерения среднего поверхностного магнитного поля  $B_s$  [8]. Это поз-

воляет обойтись без определений угла наклона оси вращения звезды  $i$ , которые обычно недостаточно точны. Однако в таком случае получаются два решения, с большим и малым углами  $i$ , из которых необходимо выбрать один по дополнительным данным. В результате моделирования, проведенного в данной работе, получаются два решения с углами  $i$ , равными  $75.5^\circ$  и  $20^\circ$ . В работе [9] определена величина угла  $i = 62^\circ$ . Таким образом, первый вариант,  $i = 75.5^\circ$ , оказывается предпочтительным. Параметры принятой модели приведены в Таблице 1. Диполь оказался смещенным вдоль своей оси в сторону отрицательного монополя.

В вычислениях мы стремились подобрать модель так, чтобы добиться наилучшего совпадения модельных и наблюдаемых фазовых зависимостей  $B_s(\Phi)$  и  $B_e(\Phi)$  при одних и тех же параметрах. Средняя величина ошибки измерений  $\sigma = 80$  Гс. Две точки на зависимости  $B_e(\Phi)$  отклоняются от модельной на  $9\sigma$ , две — на  $6\sigma$ , и шесть находятся в пределах  $3\sigma$ . Это говорит о том, что в отличие от предыдущих трех звезд распределение магнитного поля по поверхности не точно соответствует дипольному. Это может свидетельствовать о наличии сложного характера распределения магнитного поля по поверхности, в результате которого профили линий не столь просты, как при чисто дипольном распределении. Однако, в первом приближении, как это видно из Рис. 3, модель хорошо описывает обе наблюдаемые фазовые зависимости. Проблема в том, что модельная зависимость отклоняется от наблюдаемой больше чем на  $3\sigma$ . На Рис. 4 показано в разных фазах периода вращения распределение магнитного поля по поверхности, из которого видно, что оно слишком неравномерно вследствие сильного смещения диполя из центра звезды вдоль его оси.

Обращает на себя внимание (см. Таблицу 1) слишком большая величина  $B_p$  на полусфере с полем отрицательного знака вследствие сильного сдвига  $\Delta a$  диполя от центра звезды. Сдвиг определяется в основном большой величиной среднего значения поверхностного поля  $B_s$ . Меньший сдвиг диполя от центра и, соответственно, меньшая величина магнитного поля на полюсе  $B_p$  получились бы в случае либо большей амплитуды  $B_e(\Phi)$ , либо при уменьшении всей зависимости  $B_s(\Phi)$ , что маловероятно.

Была сделана также попытка моделирования с использованием измерений  $B_e$  по линиям водорода, которые не подвержены влиянию неравномерного распределения по поверхности [10]. Полученные параметры примерно такие же, но возникает различие наблюдаемых и модельных кривых  $B_e(\Phi)$  в фазе  $\Phi = 0.3$ , равное 1000 Гс. Таким образом, и в этом случае модель описывает обе зависимости

недостаточно точно. Очевидно некоторое отклонение магнитной структуры от дипольной.

Итак, в первом приближении получено неплохое соответствие между параметрами моделей по LSD- и H-измерениям поля. Вызывает неуверенность значительное отклонение наблюдаемых величин  $B_e$  от модельной зависимости, слишком большая величина  $B_p$  на отрицательном магнитном полюсе, а также заметное расхождение наблюдаемой “водородной” и вычисленной фазовых зависимостей на  $\Phi = 0.3$ .

Была сделана также попытка описать поточнее зависимости  $B_e(\Phi)$ . Удалось добиться разброса точек относительно модельной кривой в пределах ошибок измерения, но согласовать при этом модельную фазовую зависимость  $B_s(\Phi)$  с наблюдаемой оказалось невозможным, т.е. не удалось получить модель, описывающую обе зависимости  $B_e(\Phi)$  и  $B_s(\Phi)$  при одинаковых параметрах диполя. Средняя наблюдаемая величина  $B_s = 13\,000$  Гс. (В работе [9] удалось подобрать модельную зависимость  $B_s(\Phi)$  в среднем совпадающую с наблюдаемой, но по форме они сильно различаются).

Из полученных результатов делаем вывод, что первый вариант модели лучше соответствует наблюдаемым зависимостям и  $B_e(\Phi)$ , и  $B_s(\Phi)$ , а высокая точность измерений  $B_e$  дает возможность заметить несоответствие модели и наблюдательных данных.

Таким образом, звезда 53 Cam имеет сильно деформированную структуру магнитного поля, не вполне совпадающую со структурой смещенного диполя. Второй вывод состоит в том, что если некоторая звезда имеет сильно деформированную структуру поля с большой величиной смещения диполя от центра звезды  $\Delta a \sim 0.4-0.5$ , то для получения адекватной модели и, соответственно, правильных параметров необходимо иметь обе фазовые зависимости  $B_s(\Phi)$  и  $B_e(\Phi)$ . Таких звезд мало, как это можно видеть на Рис. 5.

*HD 71866.* Эта звезда по LSD-данным промоделирована нами в работе [11]. Параметры модели приведены в Таблице 1. Диполь слегка смещен в сторону отрицательного монополя на величину  $\Delta a = 0.05R_*$ . Отклонение измеренных величин от модельной зависимости находится в пределах средней ошибки  $\sigma = 80$  Гс, т.е. модельная фазовая зависимость и в данном случае очень хорошо соответствует наблюдательным данным. К сожалению, “водородных” измерений для этой звезды нет.

*HD 112185 ( $\epsilon$  UMa).* Параметры модели, вычисленной по LSD-измерениям, даны в Таблице 1. Параметры модели, вычисленной по “водородным”

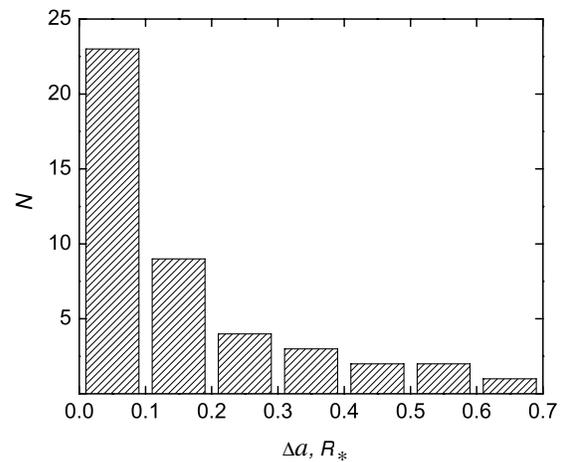


Рис. 5. Распределение магнитных звезд по величине смещения диполей  $\Delta a$ .

измерениям, и угол наклона звезды  $i = 50^\circ$  взяты из работы [3]. Заметно большое различие величин  $B_p$  и  $B_s$  между моделями, которое происходит вследствие очень большой разницы амплитуд фазовых зависимостей  $B_e(\Phi)$ , измеренных LSD-методом и по линиям водорода в работе [12]. Кроме того, LSD-зависимость явно асимметрична вследствие сильного смещения диполя в сторону отрицательного монополя на  $\Delta a = 0.1R_*$ . Видно на глаз, что положительный максимум более широкий, чем отрицательный. Форма фазовой зависимости по H-измерениям синусоидальна, т.е. соответствует модели центрального диполя. Таким образом форма фазовых зависимостей по LSD- и H-измерениям разная, как и в случае звезды HD 40312. Из общих соображений можно предположить, что на LSD-измерения повлиял эффект неравномерного распределения металлов, сконцентрированных вокруг магнитных полюсов.

Отклонения отдельных измерений от модельной фазовой зависимости в основном меньше  $\sigma$ , т.е. соответствие обеих зависимостей отличное. Из рассмотрения рассеяния точек можно сделать заключение, что реальная точность измерений не 20 Гс, а порядка 10 Гс, что удивительно. Заметим, что “водородные” измерения тоже соответствуют модели, но ошибки измерений втрое больше [13].

*HD 112413 ( $\alpha^2$  CVn).* Угол наклона звезды  $i = 55^\circ$  взят из работы [13]. Параметры рассчитанной модели даны в Таблице 1. Диполь оказался смещенным вдоль своей оси на величину  $\Delta a = +0.20R_*$ . Точность LSD-измерений  $B_e$  в среднем равна  $\sigma = 55$  Гс. Измеренные величины и модельная зависимость приведены на Рис. 6а, а отклонения измеренных величин от модельной зависимости показаны на Рис. 6б. Отклонения наблюдаемых величин от модельных находятся в

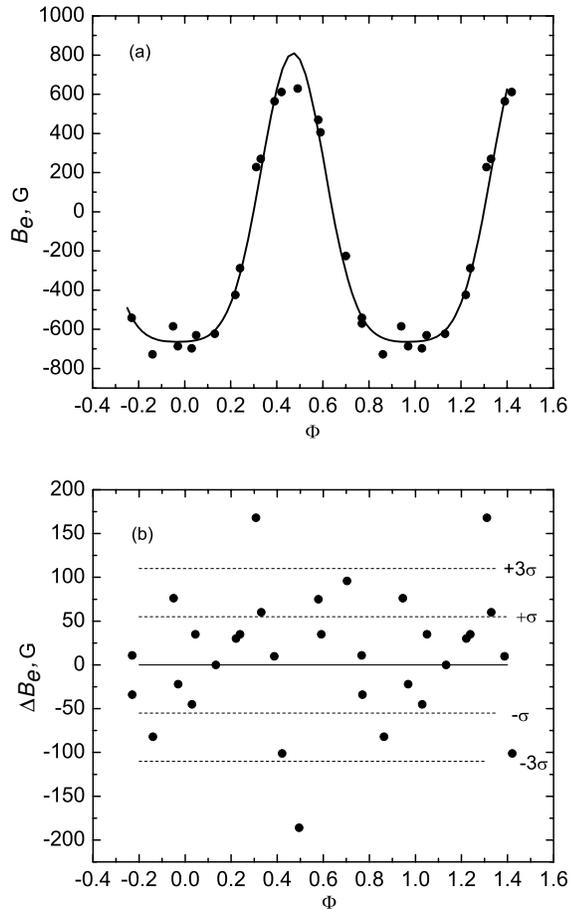


Рис. 6. Сравнение модельной фазовой зависимости с наблюдениями для звезды HD 112413. Обозначения как на Рис. 1.

пределах  $3\sigma$ , подтверждая правильность применения дипольной модели. На Рис. 6b не заметно систематических отклонений наблюдаемых данных от модельных, разброс величин  $\Delta\sigma$  носит случайный характер. Полученная здесь модель  $\alpha^2\text{CVn}$  несколько отличается от модели, полученной нами в [13] по “водородным” измерениям. Различие, возможно, обусловлено существенно меньшей амплитудой зависимости  $B_e(\Phi)$ , измеренной LSD-методом. Для сравнения приведем также результаты моделирования по измерениям линий металлов из работы [14]:

$$(B_p, B_s, \beta, i, \Delta a) = \begin{cases} (+2911 \ -858, 1040, 81, 55, +0.20), \text{ LSD}; \\ (+5300 \ -2890, 2600, 82, 55, +0.10), \text{ H [13];} \\ (+4907 \ - , - , 71, 50, +0.05), \text{ [14].} \end{cases}$$

Несмотря на то, что в работе [14] измерения поля были сделаны по линиям металлов, моделирование получено методом решения обратной задачи, т.е.

с учетом распределения металлов по поверхности. Возможно поэтому полученные параметры близки тем, которые получены по “водородным” данным.

*HD 118022 (78 Vir)*. Точность LSD-измерений находится в пределах 20–64 Гс. Необходимый для вычислений угол  $i = 22^\circ$  взят из работы [15], другие модельные параметры приведены в Таблице 1. Диполь оказался смещенным вдоль своей оси на величину  $\Delta a = -0.09R_*$ . Оказалось, что отклонения точек от модельной кривой находятся практически в пределах  $3\sigma$ , вновь показывая правильность модели.

Измерения  $B_e$  по линиям водорода были выполнены в работе [10], но здесь мы не моделировали поле по этим измерениям вследствие слишком большого разброса точек на зависимости  $B_e(\Phi)$ . Однако фазовая зависимость, полученная LSD-методом, по величине и амплитуде примерно соответствует измерениям, полученным по линиям водорода, поэтому в первом приближении мы приняли для обоих случаев одинаковые модели, показанные в первой строке:

$$(B_p, B_s, \beta, i, \Delta a) = \begin{cases} (+2781 \ -1712, 1271, 65.5, 22, +0.09), \text{ LSD,} \\ \text{H;} \\ (+8000 \ - , - , 65, 22, +0.2), \text{ [15].} \end{cases}$$

В работе [15] для сравнения показан результат моделирования звезды по линиям металлов. Обращает на себя внимание большая разница величин  $B_p$ . Очевидно, что модель по “металлическим” измерениям менее надежна, кроме того, в указанной работе применен другой метод моделирования.

*HD 137909 ( $\beta$  CrB)*. Эта звезда интересна необычной структурой магнитного поля. Кроме LSD-измерений величин  $B_e$  имеется зависимость  $B_s(\Phi)$ , полученная по измерениям расщепленных профилей в неполяризованном спектре [16]. При наличии обеих зависимостей нет необходимости определять угол наклона звезды, он получается автоматически. Измеренные данные и модельные зависимости приведены на Рис. 7a, b. Характерной особенностью этих зависимостей является то, что экстремумы кривых  $B_e(\Phi)$  и  $B_s(\Phi)$  не совпадают, в отличие от других звезд. Такая ситуация невозможна при предположении одного магнитного диполя. В работе [8] тоже отмечено, что структуру поля  $\beta$  CrB невозможно описать традиционной моделью с одним диполем. Поэтому расчет проведен при предположении двух диполей, как оказалось, смещенных от центра звезды на одинаковое расстояние  $\Delta a = 0.182R_\odot$  (Таблица 1). Расстояние между монополями  $\Delta l \approx 0.1R_*$ . Средняя величина ошибки, предельно возможная

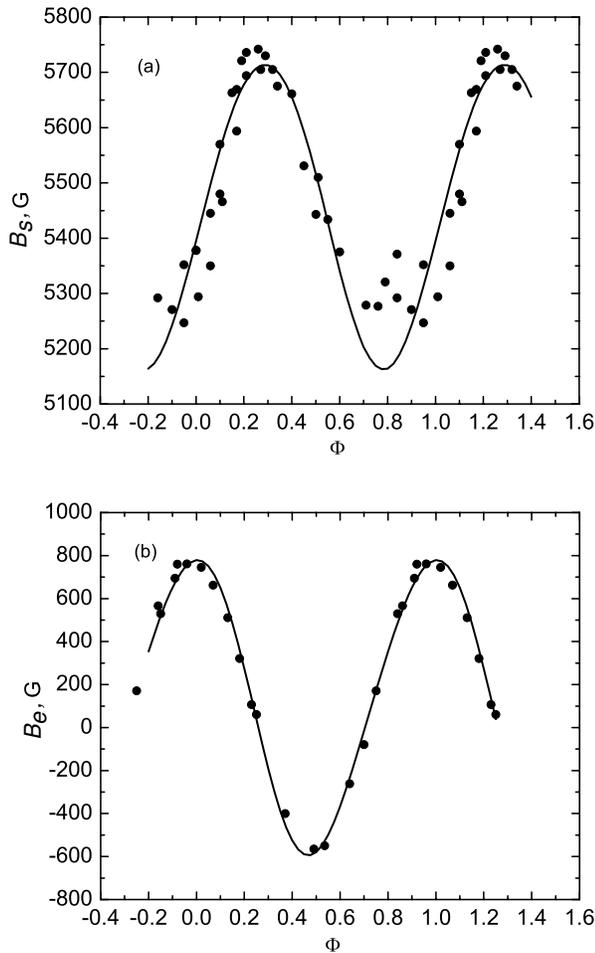


Рис. 7. Сравнение модельной фазовой зависимости с наблюдениями для звезды HD 137909. Обозначения как на Рис. 1.

на сегодняшний день,  $\sigma = 22$  Гс. Измеренные величины отклоняются менее чем на  $3\sigma$ , так что и в этом случае оправдывается предположение о правильности используемой модели. Важно отметить, что система из двух диполей хорошо описывает обе фазовые зависимости одновременно, что можно рассматривать как признак самосогласованного решения задачи. Распределение магнитного поля по поверхности показано на Рис. 8, оно имеет сложную форму.

Интересно, что конфигурация магнитного поля и ориентация звезды таковы, что даже небольшие изменения параметров приводят к существенным изменениям модельных фазовых зависимостей. Поэтому угол наклона  $i$ , координаты монополей, а также величины смещений диполя  $\Delta a$  подбирались с шагом на порядок меньшим, чем обычно. Звезда ориентирована по отношению к наблюдателю крайне невыгодно для исследования распределения поля по поверхности, потому что угол  $i = 5^\circ 9'$  и магнитные полюса находятся вблизи экватора

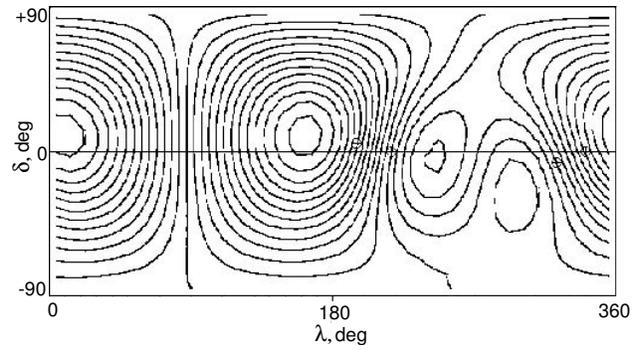


Рис. 8. Меркаторская карта распределения крупномасштабного магнитного поля по поверхности HD 137909.

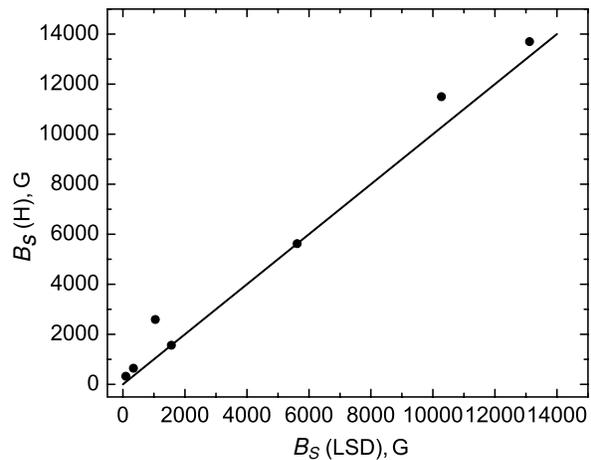


Рис. 9. Сравнение величин среднего поверхностного магнитного поля  $B_s$ , полученного по моделям с использованием LSD- и H-измерений. Прямая проведена под углом  $45^\circ$ .

вращения, т.е. они находятся на краю видимого диска.

В конце Таблицы 1 приведены модельные данные, полученные по измерениям линий водорода [17].

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уже из рассмотренных выше результатов видно, что на современном уровне измерительной техники невозможно судить о реальной точности полученных модельных параметров, а иногда и о типе модели. Магнитные звезды очень индивидуальны по своим свойствам. О величине среднего поверхностного поля  $B_s$ , например, можно говорить часто в терминах порядка величины — очень слабое, слабое, среднее и т.д. Факт значительного различия величин поля у разных авторов обсуждался уже в работе [13]. На Рис. 9, построенном по данным Таблицы 1, дано сравнение величин  $B_s(H)$ , вычисленных из моделей по H-измерениям, и, соответственно,  $B_s(LSD)$ , вычисленных по LSD-измерениям.

**Таблица 2.** Типы моделей, полученные по измерениям разными методами

HD	LSD	H	HD	LSD	H
32633	3 (или 4?)	4	112185	2	1
40312	2	3	112413	2	2
62140	2	2:	118022	2	2
65339	2	2	137909	4	4
71855	2	нет			

Видно, что в широком диапазоне значений магнитного поля эти величины практически одинаковы. Это показывает, что использование их в статистических исследованиях возможно.

Модельные фазовые кривые хорошо соответствуют наблюдаемым, измеренным LSD-методом. Из девяти рассмотренных звезд только у 53 Cam измеренные LSD величины  $B_e$  отклоняются от модельных больше чем на  $3\sigma$ , у других звезд модельные и наблюдаемые фазовые зависимости совпадают в пределах ошибок, которые рекордно малы. Однако сомнительно, что LSD-измерения [2] дают неискаженные фазовые зависимости. Методом LSD можно делать выдающиеся по точности измерения, но они, по-видимому, искажены неравномерным распределением металлов. По-прежнему измерения по водороду кажутся более реальными, т.е. дающими неискаженное распределение магнитного поля. Сильное влияние неравномерного распределения металлов по поверхности на фазовую зависимость  $B_e(\Phi)$  давно дискутируется в литературе, например в [10]. При использовании линий металлов для измерения магнитного поля поле интегрируется практически только по площадям, занимаемым этим металлом. При исследовании статистических зависимостей, связанных с магнитным полем, необходимо пользоваться параметрами, полученными по единой методике. Поэтому по-прежнему необходимо стремиться изучать глобальные магнитные конфигурации по измерениям водородных линий.

Точность измерений имеет второстепенную роль при моделировании крупномасштабных структур магнитных полей, желательно иметь прежде всего правильную форму фазовых зависимостей  $B_e(\Phi)$  и  $B_s(\Phi)$ , которая в случае малого числа измерений может быть неправильно интерпретирована.

Очень интересно, что используемый нами метод моделирования позволяет всегда, в пределах точности измерений, подобрать модельную фазовую зависимость, хотя модели могут быть разные для

одной и той же звезды, и одна из них всегда неверная. При одной и той же внутренней структуре могут получиться разные фазовые зависимости (см. Таблицу 2) только из-за неправильного измерения.

Если поле на поверхности клочковатое, но неоднородности достаточно мелкие, они интегрируются по видимой полусфере в один общий вектор, который создает эффект крупномасштабной структуры.

В Таблице 2 показаны типы моделей, которые были получены по LSD- и H-измерениям. Мы их обозначили следующим образом: центральный диполь — 1, смещенный вдоль оси диполь — 2, смещенный поперек оси диполь — 3, двухдипольная модель — 4. Хорошо видно, что оба метода позволяют описать все наблюдения и не заметно какого-либо преимущества. Это показывает, что тип модели не зависит от метода измерений, но зависит от того как наблюдатель им пользуется. У шести из восьми звезд оба метода привели к одинаковому типу моделей. Однако, бывает заметное различие в амплитуде.

На Рис. 9 также не заметно какого-либо преимущества одного из методов и различия в величине среднего поверхностного поля  $B_s$ .

Если LSD-метод дает результаты, зависящие от распределения химических элементов, то можно было бы ожидать систематическую разницу между типами моделей, получаемых разными методами. Такой разницы нет, но есть разница в амплитудах фазовых кривых, даже если они получены одним методом, но разными авторами. Создается впечатление, что на амплитуду фазовых зависимостей влияет личная методика измерений расщепления спектральных линий. Часто попадают в литературе измерения, которые систематически отличаются в большую или меньшую сторону от результатов других авторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **56**, 25 (2003).
2. G. A. Wade, J.-F. Donati, J. D. Landstreet, and S. L. S. Shorlin, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **313**, 851 (2000).
3. Yu. V. Glagolevskij, Astrophysical Bulletin **67**, 264 (2012).
4. Yu. V. Glagolevskij, Astron. Rep. **90**, 64 (2013).
5. Yu. V. Glagolevskij, Astrophysical Bulletin **66**, 144 (2011).
6. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, Astrophysical Bulletin **63**, 259 (2008).
7. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, Astrophysical Bulletin **65**, 164 (2010).
8. J. Huchra, Astrophys. J. **174**, 435 (1972).

9. E. Gerth, Yu. V. Glagolevskij, and G. Scholz, in *Proc. Int. Conf. on Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (SAO RAS, Nizhny Arkhyz, 2000), p. 158.
10. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **212**, 141 (1977).
11. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **67**, 264 (2012).
12. V. G. Shtol, V. G. Elkin, and I. I. Romanyuk, in *Proc. Int. Conf. on Stellar Magnetic Fields*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (SAO RAS, Nizhny Arkhyz, 1997), p. 207.
13. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **64**, 62 (2009).
14. Yu. V. Glagolevskij, N. E. Piskunov, and V. L. Khokhlova, *Sov. Astron. Lett.* **11**, 371 (1985).
15. E. F. Borra, *Astrophys. J.* **235**, 915 (1980).
16. G. Mathys, S. Hubrig, J. D. Landstreet, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **23**, 353 (1997).
17. Yu. V. Glagolevskij, E. Gerth, in *Proc. Int. Conf. on Magnetic Stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij, D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk (SAO RAS, Nizhny Arkhyz, 2004), p. 142.

## Magnetic Field Models of Nine CP Stars from “Accurate” Measurements

Yu. V. Glagolevskij

The dipole models of magnetic fields in nine CP stars are constructed based on the measurements of metal lines taken from the literature, and performed by the LSD method with an accuracy of 10–80 G. The model parameters are compared with the parameters obtained for the same stars from the hydrogen line measurements. For six out of nine stars the same type of structure was obtained. Some parameters, such as the field strength at the poles  $B_p$  and the average surface magnetic field  $B_s$ , differ considerably in some stars due to differences in the amplitudes of phase dependences  $B_e(\Phi)$  and  $B_s(\Phi)$ , obtained by different authors. It is noted that a significant increase in the measurement accuracy has little effect on the modelling of the large-scale structures of the field. By contrast, it is more important to construct the shape of the phase dependence based on a fairly large number of field measurements, evenly distributed by the rotation period phases. It is concluded that the Zeeman component measurement methods have a strong effect on the shape of the phase dependence, and that the measurements of the magnetic field based on the lines of hydrogen are more preferable for modelling the large-scale structures of the field.

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