

УДК 524.35-54

СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ИЗБРАННЫХ ЗВЁЗД. II.

© 2015 Ю. В. Глаголевский*, А. Ф. Назаренко**

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 29 мая 2014 года; принята в печать 6 августа 2014 года

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

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] мы опубликовали данные из разных источников о средних поверхностных магнитных полях (mean magnetic field modulus) B_s значительного числа магнитных звезд, измеренных по спектрам и полученных по моделям, на основании данных из разных литературных источников. Работой [2] мы начали новую серию исследований магнитных структур звезд, где привели также условия моделирования и получаемые точности параметров. Данная работа является продолжением указанной серии. С использованием данных из [1] были исследованы некоторые особенности эволюции магнитных звезд [1–6]. В работе [6], например, обсуждаются главные этапы ранних периодов эволюции магнитных звезд. Там был предложен также вариант сценария их эволюции до главной последовательности (ZAMS). Была сделана попытка объяснить причину значительного различия магнитных структур, причину преимущественной ориентации магнитных диполей, предложен механизм разделения магнитных и нормальных звезд и механизм формирования химически пекулярных звезд без поля (Am, HgMn и др.), указаны также причины малой (10%) доли магнитных звезд, их медленного осевого вращения и причина отсутствия сильных полей у звезд Ae/Be Хербига. Для окончательного решения всех этих проблем необходимо сильно увеличить количество наблюдательных данных, особенно о величинах B_s , и выяснить причину того, почему у некоторых звезд измеренные величины магнитного поля в разных фазах Φ периода вращения совпадают с модельными хорошо, а у других звезд наблюдается сильное рассеяние результатов измерений.

В этой работе мы продолжаем исследовать структуры, параметры и особенности следующих

магнитных звезд: HD 3980, 8441, 10783, 25267, 55719, 81009, 149438, 166473, 170397, 178892, 318107. Параметры этих звезд и их литературный источник приведены в таблице 1. В процессе моделирования в первую очередь путем подбора параметров мы добиваемся того, чтобы модельные зависимости находились относительно измеренных величин магнитного поля в пределах 3σ . Шаг изменения долготы монополя меняется от 1° до 5° в зависимости от величины рассеяния точек на фазовой кривой. Шаг изменения широты всегда 1° . Следовательно, угол между осью диполя и плоскостью экватора вращения α определяется тоже с шагом 1° . Средняя ошибка определения величины сдвига диполя из центра звезды равна $\pm 0.05 R_*$ (R_* — радиус звезды). Труднее оценить ошибку поля на магнитных полюсах B_p и среднего поверхностного поля B_s . Она в основном зависит от ошибки определения угла наклона звезды к лучу зрения i . В литературных источниках, которыми мы пользуемся, редко даются ошибки угла i , поэтому на основании опыта моделирования 75 звезд мы принимаем для угла i среднюю ошибку $\sigma = 20\%$. Примерно такая же величина ошибки получается для B_p и B_s . Она уверенно поддерживает градацию — очень слабое поле, слабое поле, среднее поле, сильное поле, очень сильное поле, экстремально сильное поле, — которая достаточна для многих статистических исследований. Если для звезды измерены $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$, то знание угла i не нужно. В таких случаях средние измеренные величины B_s , полученные по расщеплению линий в неполяризованном спектре (метод Матиса) и по моделям, различаются в пределах 5% [1].

Далее рассматриваются магнитные структуры избранных одиннадцати звезд. Итоговые определенные параметры магнитного поля собраны в таблице 2.

*E-mail: glagol@sao.ru

**E-mail: naf@sao.ru

Таблица 1. Параметры исследованных звезд

HD	Измерения B_e	P , days	T_{eff} , К	$v \sin i$, км с $^{-1}$	M_b , mag	R/R_{\odot}	i , deg *
3980	[7]	3.952 [18]	10 200 [22]	—	—	—	60 [21]
8441	[8]	69.433 [8]	9100 [22]	—	—	2.9	20–90
10783	[8]	4.1328 [19]	10 200 [22]	20 [19]	–0.1 [22]	—	35
25267	[9]	1.2094 [9]	12 150 [22]	36 [19, 23]	–0.5 [22]	2.5	20
55719	[10, 11]	775 [20]	8950 [22]	—	—	—	3
81009	[10, 12]	33.96 [20]	9950 [22]	—	—	—	77
149438	[13]	41.003 [13]	30 000 [13]	5 [13]	—	5.2 [13]	51
166473	[12, 14]	>1168 [10]	7700 [12]	—	—	—	15
170397	[9, 15, 16]	2.191 [21]	9500 [21]	46 [9]	0.0 [22]	3.2	38
178892	[17]	8.2478 [14]	8200 [13]	—	—	—	37 [14]
318107	[10, 12]	52.374 [10]	11 800 [13]	—	—	—	10

* Если угол i приведен без ссылки на источник, то это наша оценка.

2. МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ

2.1. HD 3980 (SrCrEu)

Измерения продольного магнитного поля B_e выполнены в работе [7] по линиям металлов в шести фазах по спектрам с дисперсией 12.3 Å/мм и в двух — с дисперсией 3.3 Å/мм. Для моделирования мы воспользовались величиной угла наклона звезды к лучу зрения $i = 60^\circ$, приведенной в работе [21]. Период вращения звезды $P = 3^{\text{d}}952$ [18]. Разброс точек велик, вероятно, вследствие использования низкой дисперсии, поэтому полученные модельные параметры следует считать приблизительными. Как обычно, в такой ситуации мы используем модель центрального диполя. Параметры звезды приведены в таблице 1, а результаты моделирования — в таблице 2. В таблице 2 указаны: HD-номера звезд и обозначение метода измерений (Н — по линиям водорода, М — по линиям металлов); знак, долгота и широта монополей; величина магнитного поля на магнитных полюсах B_p ; величина среднего поверхностного магнитного поля (mean magnetic field modulus) B_s ; определенный по модели угол между осью диполя и плоскостью экватора вращения α ; величина смещения диполя из центра звезды в единицах ее радиуса. Так как звезда находится вблизи V класса светимости [22], ее возраст $t \sim 1.5 \times 10^8$ лет. Этот возраст невелик для полной релаксации магнитного поля, которая происходит у звезд такого радиуса за $t \approx 10^{10}$ лет, и возможно сохранение крупных структур магнитного поля. То, что магнитное поле описывается моделью центрального диполя, указывает, что звезда

сформировалась из однородного протозвездного облака [6]. Малый угол у этой звезды, как и у других звезд, может являться признаком того, что торможение вращения родительского протозвездного облака произошло под воздействием магнитного поля [6, 24, 25]. Протозвезда тормозится сильнее в том случае, когда силовые линии находятся в плоскости вращения. Структура магнитного поля этой звезды простая, поэтому карту распределения поля по поверхности не приводим.

2.2. HD 8441 (SrCrEu)

Измерения B_e выполнены Бэбкоком [8]. Поле у звезды слабое, оно меняется в пределах ± 400 Гс при средней ошибке измерений $\sigma = \pm 60$ Гс. Период вращения звезды равен $69^{\text{d}}433$. К сожалению, для этой звезды неизвестна величина $v \sin i$, поэтому пришлось вычислять модели для нескольких величин угла i . В результате оказалось, что в наиболее вероятных пределах $i = 20\text{--}90^\circ$ среднее поверхностное поле B_s может быть от 240 до 700 Гс. Это очень слабое поле среди магнитных звезд, обладающих полями до 34 000 Гс. Для статистических исследований достаточно использовать среднюю величину $B_s = 470$ Гс. Полученные для звезды параметры магнитного поля приведены в таблице 2. Структура магнитного поля этой звезды простая, поэтому карту распределения поля по поверхности не приводим.

2.3. HD 10783 (Si+)

Измерения продольного поля сделаны Бэбкоком [8]. Разброс точек вокруг расчетной кривой,

Таблица 2. Параметры моделей магнитного поля исследованных звезд

HD	Знак монополя	Долгота монополя	Широта монополя	B_p , G	B_s , G	α , deg	Δa , R_*	
3980 M	+	0	0	+2000 :	1863:	0	0	
	-	180	0	-2000 :			0	
8441 M	+	180	0		470:	0	0	
	-	0	0				0	
10783 M	+	80	+25	+4856	2244	25	0.07	
	-	355	-25	-3604			0.07	
	+	190	0				0	0.50
	-	170	0				0.50	
25267 H	+	280	-7	+15 403	4879	7	0.37	
	-	310	+7	-15 318			0.37	
55719*	+	0	-5	+5873	6555	5	0.23	
	-	180	+5	-24 177			0.23	
81009*	+	180	+69	+17 208	8488	69	0.10	
	-	0	-69	-9358			0.10	
149438 M	+	185	-2.0	+221	63	0	0.40	
	-	140	-1.6	-181			0.40	
	+	285	0				2.5	0.40
	-	255	-5				0.40	
	+	70	+5				5	0.40
	-	355	-5				0.40	
166473*	+	180	-15	+4956	7072	15	0.28	
	-	0	+15	-26 384			0.28	
170397 HM	+	20	+5	+1914	1156	5	0	
	-	200	-5	-1914			0	
178892 M	+	0	+35	+9972	8928	35	0.15	
	-	180	-35	+24 800			0.15	
318107*	+	0	+5	+33 568	14 345	5	0.11	
	-	180	-5	-19 462			0.11	

* Звезды, отмеченные звездочкой, промоделированы с использованием величин B_e и B_s . Полученные параметры при этом более точные.

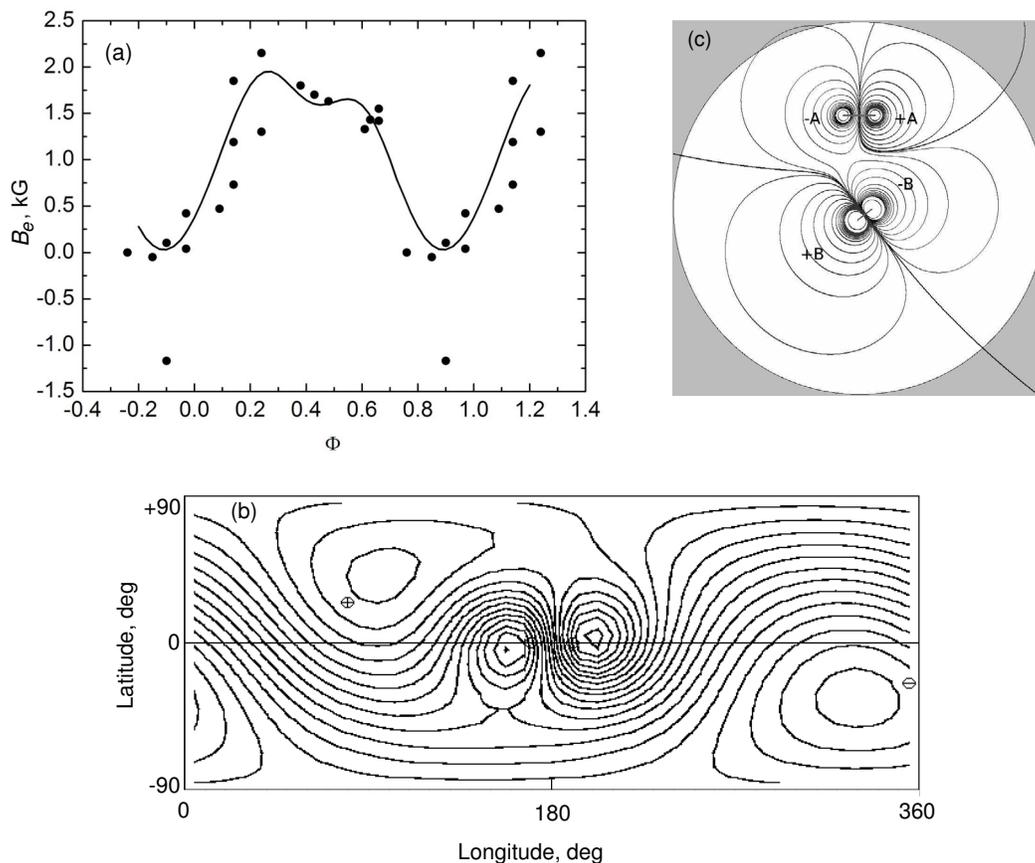


Рис. 1. Структура магнитного поля звезды HD 10783: (а) изменение магнитного поля с фазой (точки — наблюдения, сплошная линия — модель); (б) распределение магнитного поля по поверхности звезды; (с) схема расположения диполей внутри звезды.

как это видно из рис. 1а, значительный, тем не менее, уверенно заметна ангармоничность переменности. Необходимый для моделирования угол наклона звезды определен по данным, приведенным в таблице 1. Температура звезды $T_{\text{eff}} = 10\,200$ К и абсолютная болометрическая величина звезды $M_b = -0.1$ взяты из [21]. Из этих данных получаем радиус звезды $R/R_{\odot} = 2.9$. Период вращения звезды $P = 4^{\text{d}}.13281$ и скорость вращения $v \sin i = 20 \text{ км с}^{-1}$ взяты из [19]. По этим данным получаем угол $i = 35^{\circ}$. Модель магнитного поля хорошо описывает наблюдаемую фазовую зависимость при предположении двух диполей. Параметры полученной модели магнитного поля приведены в таблице 2. Измеренные точки отличаются от модельной зависимости в пределах σ , за исключением одного измерения на фазе $\Phi = 0.9$ (-1170 Гс). Следует отметить, что второй, более слабый, диполь пришлось поместить на значительном расстоянии от центра $\Delta a = 0.5 R_*$: только при таких условиях второй максимум на $\Phi = 0.6$ выделяется достаточно четко. Величина заряда монополей слабого диполя в 3.7 раза меньше, чем у основного диполя.

Структура поля может вызвать интерес, поэтому на рис. 1б показана меркаторская карта распределения поля по поверхности, а на рис. 1с дана схема расположения магнитных диполей внутри звезды и распределение магнитного поля в проекции на плоскость экватора вращения. Такая сложная конфигурация может быть следствием того, что родительское протозвездное облако имело два сильно намагниченных фрагмента, которые в результате гравитационного сжатия привели к появлению двух отдельных намагниченных областей внутри звезды. Следует пояснить, что на некотором расстоянии от области с максимальной напряженностью магнитного поля реальное распределение магнитного поля такое же, как у теоретического магнитного диполя. Но вблизи предполагаемых монополей реальная структура поля отличается от модельной. На основании многих примеров моделирования показано, что это свойство на результатах практически не сказывается (см. ниже описание HD 149438). На рис. 1с показано распределение магнитного поля в плоскости экватора вращения. Для получения этой схемы стандартная вычислительная методика была усовершенствована. Вычисление распределения

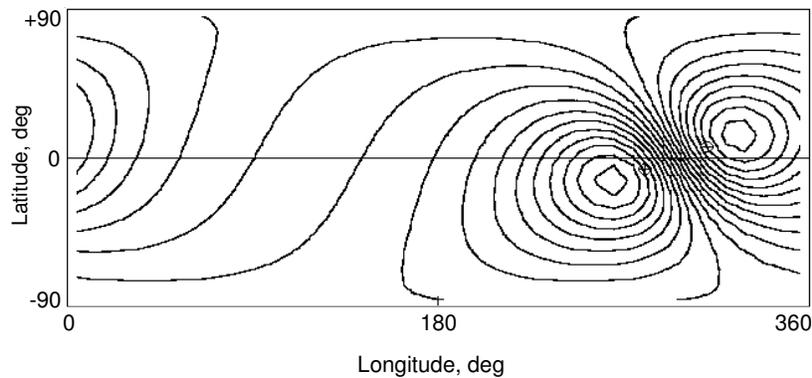


Рис. 2. Меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности звезды HD 25267. Распределение типично для звезд со смещенным поперек оси диполем.

магнитного поля осуществлялось с использованием известной формулы диполя $B = q \times l/r^2$, где q — магнитный заряд, l — расстояние между зарядами, r — расстояние, на котором рассматривается магнитное поле.

2.4. HD 25267 (Si)

Измерения B_e выполнены в работе [9]. Период вращения $P = 5^{\text{d}}954$, приведенный в этой работе, ошибочный. Правильным является период $P = 1^{\text{d}}2094$ из работы [23]. Температура и абсолютная болометрическая величина звезды $T_{\text{eff}} = 12150$ К, $M_b = -0.5$ [22], откуда радиус звезды $R = 2.5 R_{\odot}$. В работе [9] дана величина $v \sin i = 39$ км с⁻¹, в каталоге [20] $v \sin i = 34$ км с⁻¹, это дает угол $i = 20^\circ$. В работе [9] выполнено всего семь измерений, но все они хорошо ложатся на модельную зависимость. Магнитная структура описывается диполем, магнитные монополи которого смещены на $\Delta a = 0.37 R_*$. Столь сильное смещение можно объяснить тем, что звезда сформировалась из протозвездного облака с сильно неоднородным магнитным полем [6], имевшим градиент напряженности поперек силовых линий. Распределение магнитного поля по поверхности звезды является характерным для случаев смещения диполя поперек оси (оно показано на рис. 2), когда магнитные полюса располагаются близко друг к другу.

2.5. HD 55719 (SrCrEu)

Для моделирования этой звезды использованы измерения среднего поверхностного магнитного поля B_s , выполненные в работе [10], и продольного магнитного поля B_e из работы [11]. Благодаря двум фазовым зависимостям можно получить более точные модельные данные, чем при использовании

угла наклона звезды i . Период вращения звезды $P = 36^{\text{d}}5$, приведенный в каталоге [12], совершенно не подходит для этой звезды, поэтому мы приняли $P = 775^{\text{d}}$, из работы [10]. Обращают на себя внимание очень маленькие амплитуды изменения продольного B_e и среднего поверхностного B_s полей, а также сильный разброс измеренных величин (рис. 3а и 3б) на фазовых зависимостях. Модель должна описывать обе зависимости при одних и тех же параметрах. В случае использования обеих фазовых зависимостей $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$ получается два решения — с малым углом i и большим. Модель с малым углом дает одну величину $i = 3^\circ$ для обеих кривых. Для описания зависимости $B_s(\Phi)$ во втором случае необходим угол $i = 86^\circ$ а для $B_e(\Phi)$ — другой: $i = 89^\circ$. Разница невелика, но она есть. В случае варианта малого угла смещение диполя из центра звезды одинаковое: $\Delta a = 0.23 R_*$, а в случае большого угла $\Delta a = 0.27 R_*$ и $0.15 R_*$ для разных кривых. Таким образом, вариант с малым углом i получается более уверенно, вследствие чего мы выбрали этот вариант как окончательное решение. Из полученной модели видно, что магнитные полюса находятся на краю видимого диска (звезда видна с полюса вращения, а магнитные полюса располагаются практически на экваторе), поэтому в спектральных линиях содержатся зеемановские смещения обоих знаков. Это приводит к большим ошибкам измерений и большому разбросу точек на фазовых зависимостях, а также уменьшает точность моделирования. Ось диполя находится практически в плоскости экватора вращения. Как уже говорилось выше, это является признаком сильного магнитного торможения вращения родительского протозвездного облака на ранних стадиях эволюции [6]. Возраст звезды $t = 6 \times 10^8$ лет невелик для полной релаксации магнитного поля. При таком возрасте возможно сохранение крупных неоднородных реликтовых структур магнитного поля, которое мы и наблюдаем в этой звезде.

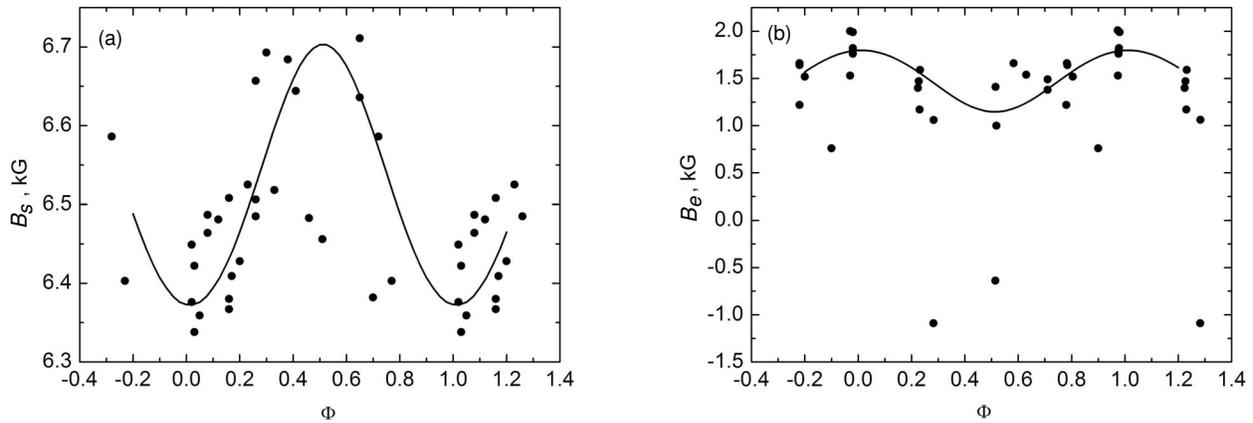


Рис. 3. Фазовые зависимости $B_s(\Phi)$ (слева) и $B_e(\Phi)$ (справа) для звезды HD 55719.

2.6. HD 81009 (SrCrEu)

Единственная величина продольного поля $B_e = 1909 \pm 200$ Гс ($\Phi = 0.706$) получена в работе [12]. Фазовая зависимость $B_s(\Phi)$ взята из [10]. Период вращения звезды приведен в этой же работе $P = 33^d.96$. Наличие фазовой зависимости $B_s(\Phi)$ и единственной оценки величины B_e позволяет промоделировать звезду без знания угла i , но получаются два решения — с большим и малым углом i . Надежность модели определяется надежностью оценки величины B_e . Из двух решений наилучшее совпадение модельной и наблюдаемой фазовой зависимости получается при большом угле $i = 77^\circ$ и смещении диполя вдоль его оси на величину $\Delta a = 0.1 R_*$. Звезда отличается нетипично большим углом наклона оси диполя к плоскости экватора вращения (таблица 1). Как показано в [6], это значит, что звезда медленно вращалась изначально и не подвергалась значительному торможению с участием магнитного поля. На рис. 4 кружками показаны наблюдательные данные, а сплошной линией модельная зависимость $B_s(\Phi)$. Отклонение наблюдаемой величины B_e от модельной зависимости несколько превышает 3σ . Вследствие небольшого смещения диполя из центра звезды положительный магнитный полюс сильнее отрицательного. Распределение магнитного поля по поверхности имеет простой вид, поэтому меркаторскую карту его распределения не приводим.

2.7. HD 149438 (O)

Эта звезда пока не отнесена к химически peculiarным звездам, вероятно, вследствие слишком высокой температуры $T_{\text{eff}} = 30\,000$ К [13], но структура ее магнитного поля типична для магнитных звезд. Поэтому звезда представляет для нас особый интерес. Магнитное поле измерено с

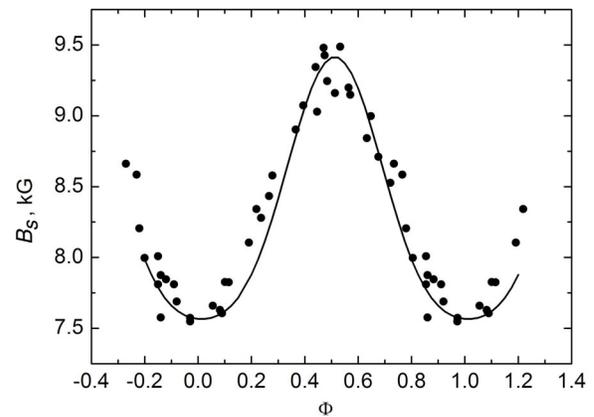


Рис. 4. Фазовая зависимость $B_s(\Phi)$ для звезды HD 81009.

рекордной точностью — в среднем $\sigma = 5.2$ Гс. Поэтому интересно проверить на этой звезде границы применимости дипольных моделей [26], которые мы используем в течение длительного времени. Так как звезда медленно вращается, для нее нет достаточно точных измерений $v \sin i$. В работе [13] приводятся три величины $v \sin i = 19, 13$ и 5 км с $^{-1}$, радиус звезды $R = 5.2 R_\odot$ и период вращения $P = 41^d.003$. По этим данным получается, что первые две величины $v \sin i$ приводят к $\sin i > 1$. Последняя величина приводит к $i = 51^\circ$.

На рис. 5а точками показана измеренная фазовая зависимость $B_e(\Phi)$ и сплошной кривой — модельная. Уже по общему виду зависимости можно предположить, что мы имеем дело с тремя магнитными диполями внутри звезды. Аналогом такого объекта может служить звезда HD 37776 [27]. Сильный диполь образует отрицательное поле B_e на $\Phi = 0.35$ и положительное на $\Phi = 0.60$, более слабый диполь — соответственно на $\Phi = 0.0$ и

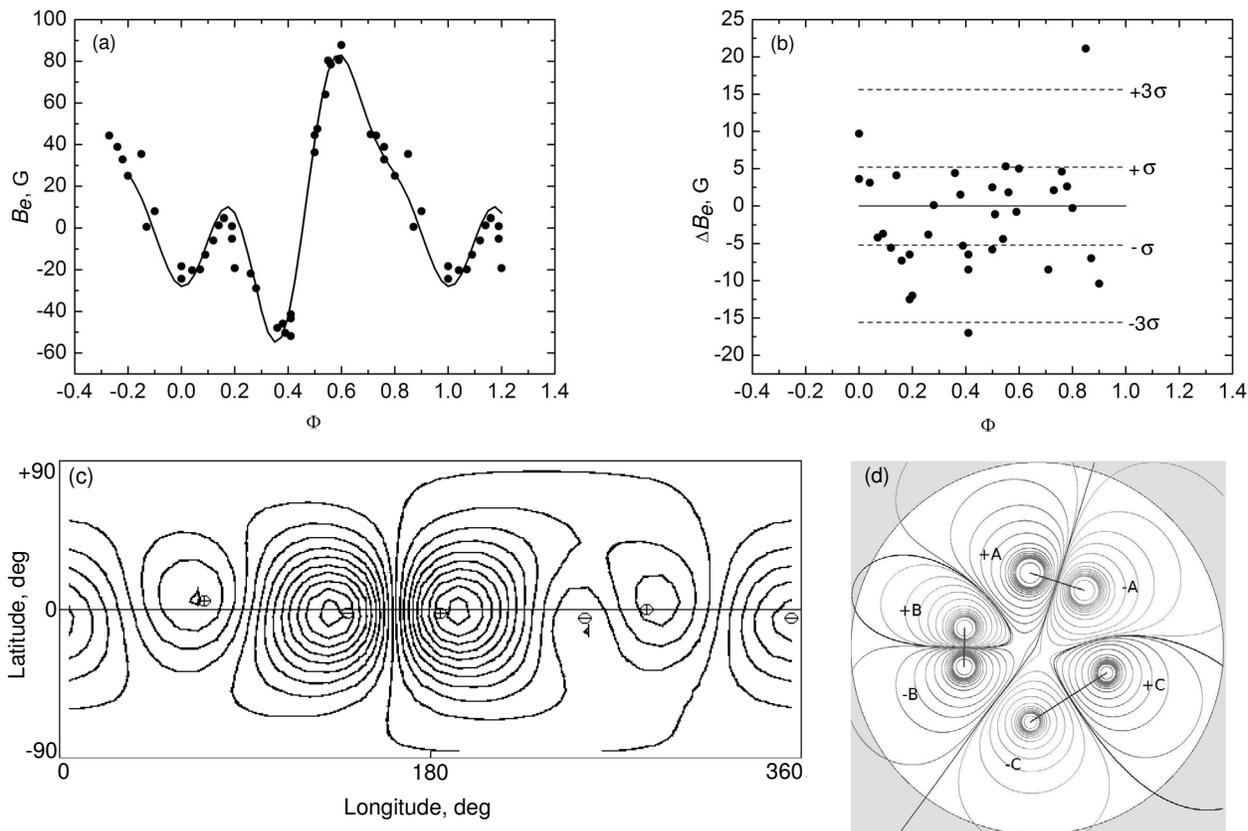


Рис. 5. Структура магнитного поля звезды HD 149438: (а) фазовая зависимость $B_e(\Phi)$ (точки — наблюдения, сплошная линия — модель); (б) отличие ΔB_e измеренных величин от модельных; (с) распределение магнитного поля по поверхности звезды; (д) распределение магнитного поля внутри звезды (проекция на плоскость экватора вращения).

$\Phi = 0.15$. Третий, слабый, диполь только слегка деформирует фазовую зависимость на $\Phi = 0.80$.

Необходимая детализация фазовой зависимости достигается подбором расстояний монополей из центра Δa : она усиливается, когда магнитные диполи приближаются к поверхности. Эта величина позволяет получить представление о роли подповерхностных структур в формировании магнитных структур на поверхности. В нашем случае наилучшее соответствие наблюдений и модельной зависимости получается при предположении одинаковых смещений $\Delta a = 0.4 \pm 0.05$ для всех монополей вдоль радиусов, соответствующих их широте. Если поместить диполи вблизи центра звезды, то модельная фазовая зависимость по форме получается близкой к синусоиде, что не похоже на наблюдаемую зависимость на рис. 5а. Наблюдаемая и модельная зависимости отлично соответствуют друг другу. Большинство величин B_e отличается от модельной кривой на $\Delta B_e = 1-1.5\sigma$ (рис. 5б). Меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности представлена на рис. 5с, а распределение диполей внутри звезды показано на рис. 5д. Величина магнитных зарядов относится как $1:0.64:0.38$.

Расстояние между зарядами соответственно равно $l = 0.32 R_* : 0.14 R_* : 0.52 R_*$. Практика моделирования показывает, что большинство магнитных звезд имеют не «точечные» диполи, когда силовые линии сходятся в малом объеме, а диполи с большим l , когда силовые линии сходятся в двух сингулярных точках, далеко отстоящих друг от друга. Из этого следует, что при гравитационном сжатии протозвездных облаков магнитное поле не сжимается в «точечном» объеме, а занимает довольно обширную область. В случаях моделей с центральным диполем это может происходить вследствие наличия конвективного ядра.

На меркаторской карте распределения магнитного поля по поверхности звезды в центре хорошо видны магнитные полюса от «сильного» диполя и слева от самого слабого.

Оси диполей у HD 149438, как и в случае сложных конфигураций других звезд, преимущественно смещены поперек оси и вытянуты по кругу. Можно предположить, что такая ориентация происходит вследствие «вытягивания» силовых линий вращением протозвездных облаков. Пример звезды HD 149438 показывает, что сложные структуры поверхностного поля проявляются только тогда,

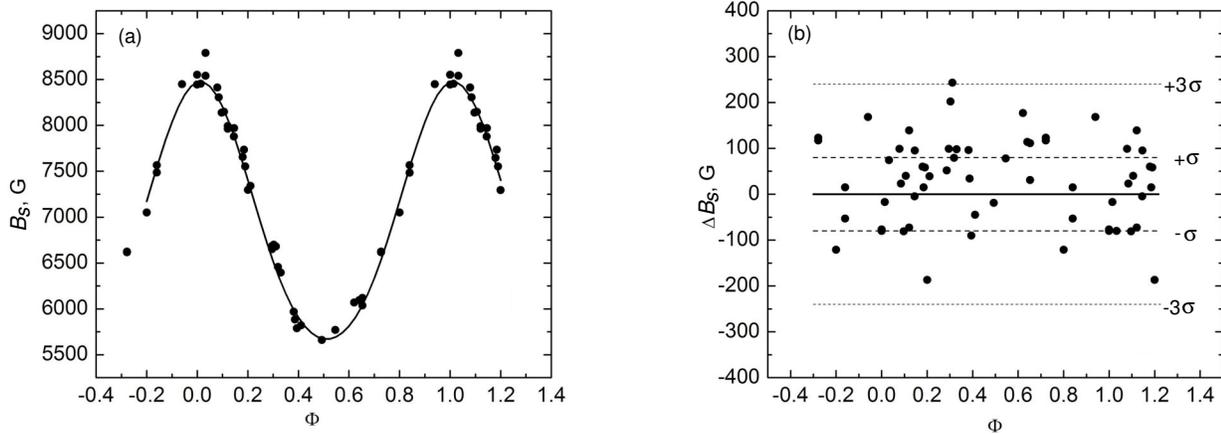


Рис. 6. Звезда HD 166473: (а) фазовая зависимость $B_s(\Phi)$; (б) отклонения ΔB_s наблюдаемых величин от модельных.

когда они происходят в подповерхностных слоях. По форме фазовой зависимости $B_e(\Phi)$ и структуре магнитного поля звезду HD 149438 следует отнести к классическим магнитным звездам.

2.8. HD 166473 (SrCrEu)

Для моделирования этой звезды использованы измерения средних поверхностных величин магнитного поля B_s из работы [14]. Для этой звезды в работе [12] есть три измерения продольного поля B_e в фазах 0.000, 0.015 и 0.016. Средняя величина поля для этих фаз $B_e = -2146$ Гс. Наличие фазовой зависимости $B_s(\Phi)$ и величины B_e , как и в случае звезды HD 81009, позволяют вычислить точную величину угла наклона звезды к лучу зрения i . Данная методика дает два решения — с большим и малым значением угла наклона. Оказалось, что при малом угле $i = 15^\circ$ модельные фазовые зависимости лучше соответствуют наблюдательным данным. На рис. 6а показаны точками наблюдаемые фазовые зависимости $B_s(\Phi)$, а сплошной линией — модельная зависимость. В пределах 3σ они соответствуют друг другу (рис. 6б). Единственная оценка B_e хорошо легла на теоретическую фазовую кривую. Моделирование показало, что диполь смещен из центра звезды на значительную величину $\Delta a = 0.28 R_*$ в сторону отрицательного монополя, а его ось наклонена к плоскости экватора вращения на угол 15° , поэтому велико различие напряженности магнитного поля на полюсах. Распределение магнитного поля по поверхности имеет простой вид, поэтому меркаторскую карту не представляем.

2.9. HD 170397 (Si)

Для этой звезды имеется всего одиннадцать измерений, однако они хорошо ложатся на фазовой

зависимости $B_e(\Phi)$, и можно надеяться получить достаточно уверенную модель. Источники использованных данных — это [9, 15, 16]. Начальная фаза принята равной $\text{JD } 2442613.800 + 2^{\text{d}}1915$. В этих же работах даны $T_{\text{eff}} = 9500$ К и $v \sin i = 46$ км с $^{-1}$. Период вращения $P = 2^{\text{d}}191$ определен в [20]. В каталоге [21] приведены $M_b = 0.0$ и $\lg g = 3.7$, откуда получаем радиус звезды $R = 3.2 R_\odot$. Из этих данных получаем угол наклона звезды к лучу зрения $i = 38^\circ$, что находится в середине найденного Болендером [16] диапазона $i = 90-24^\circ$.

Структура магнитного поля соответствует модели центрального диполя, причем ось диполя находится практически в плоскости экватора вращения. Долгота монополей и фаза экстремумов сдвинуты на $+20^\circ$ в соответствии с выбранной начальной фазой. Отличие измеренных величин от модельной зависимости находится в пределах 3σ . Распределение магнитного поля по поверхности имеет простой вид, поэтому карту не представляем.

2.10. HD 178892 (SrCrEu)

Измерения продольного поля B_e взяты из работы [17]. Там же приведена необходимая для вычислений начальная фаза эфемериды $\text{JD } 2452708.562 + 8^{\text{d}}2478$ и угол $i = 37^\circ$. Модельная фазовая зависимость $B_e(\Phi)$ получена с параметрами, приведенными в таблице 1. Это диполь, смещенный из центра вдоль оси на величину $\Delta a = 0.15 R_*$. В отличие от большинства звезд диполь наклонен к плоскости экватора на значительный угол $\alpha = 35^\circ$. Распределение магнитного поля по поверхности имеет простой вид, поэтому его не приводим. Отклонения отдельных измерений от модельной зависимости преимущественно меньше 3σ . Структура магнитного поля похожа на структуру HD 166473, но смещение диполя у нее

меньше, а величина α больше. Большой угол α может указывать на то, что степень потери момента вращения вследствие магнитного торможения родительского протозвездного облака невелика.

2.11. HD 318107 (Si+)

Измерения среднего поверхностного магнитного поля B_s выполнены в работе [10]. Для этой звезды нет достаточно точных данных о величине $v \sin i$, поэтому для определения необходимого угла i использовано единственное определение продольного поля $B_e = 1985 \pm 230$ Гс (8.6σ), приведенное в работе [12]. Применена такая же методика моделирования, как в случае звезд HD 81009 и 166473. За нулевую фазу принят момент первого измерения B_s JD 2448841.606 + 52^d.374. Разброс точек на зависимости $B_s(\Phi)$ оказался чрезвычайно большим, хотя точность измерений в среднем оценена авторами как $\sigma = 300$ Гс. Единственная измеренная величина B_e оказалась в фазе 0.095. Задача моделирования заключалась в том, чтобы подобрать такие параметры, при которых амплитуда и положение вычисленной зависимости $B_s(\Phi)$ совпадали бы с наблюдаемой кривой, а вычисленная зависимость $B_e(\Phi)$ должна проходить через измеренную точку. Полученные параметры звезды приведены в таблице 1, угол наклона оси вращения оказался равным $i = 10^\circ$, а угол $\alpha = 5^\circ$. Отсюда видно, что звезда ориентирована к наблюдателю под очень невыгодным углом для измерений магнитного поля. Звезда видна со стороны полюса вращения, а магнитные полюса находятся практически на краях видимого диска, вследствие чего спектральные линии содержат магнитное поле разного знака. Это приводит к значительной неопределенности измерений. Тем не менее, мы получили достаточно уверенное представление о структуре магнитного поля звезды. Звезда молодая, ее радиус вследствие эволюционного движения поперек полюсы главной последовательности вырос всего на 0.1, т.е. $R/R_z = 1.1$ [3] (R_z — радиус звезды на ZAMS). Небольшое смещение диполя из центра звезды показывает, что звезда сформировалась из относительно однородного протозвездного облака [6].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам данной и предыдущей [2] работ сделаем несколько замечаний. В 1997 г. был разработан метод моделирования магнитных структур химически пекулярных CP-звезд [26], который вначале назывался «метод магнитных зарядов», а сейчас — «метод магнитных диполей». Как оказалось, форма фазовых зависимостей магнитного поля зависит только от положения и ориентации

диполя внутри звезды. Для моделирования можно использовать фазовые зависимости либо продольного поля $B_e(\Phi)$, либо среднего поверхностного поля $B_s(\Phi)$, но лучше обе вместе. В последнем случае точность получаемых параметров оказывается существенно выше, так как исключается использование обычно недостаточно точных величин $v \sin i$. При расчетах физические параметры подбираются так, чтобы модельные зависимости отличались от измеренных величин магнитного поля в пределах ошибок измерений 3σ . Действительно, среди изученных 75 звезд не было ни одного случая, чтобы это условие не соблюдалось. Поэтому мы делаем вывод, что применяемый метод правильно описывает распределение магнитного поля по поверхности и в глубину (кроме области с максимальным магнитным полем).

Протозвездные неоднородно намагниченные облака, сжимаясь, образуют область с максимальной напряженностью магнитного поля внутри звезды, часто не совпадающую с центром звезды. Моделирование показывает, что силовые линии от такого фрагмента ведут себя так же, как и силовые линии воображаемого магнитного диполя. Теоретически рассчитать процесс формирования такого намагниченного фрагмента в настоящее время невозможно вследствие сложности математических уравнений. В результате того, что протозвездные родительские облака имеют сильную неоднородность по плотности и магнитному полю, формирующиеся магнитные звезды обладают значительным диапазоном величин и структур магнитного поля. Около 20% звезд имеют структуры, описываемые двумя или тремя диполями. Используемая методика с успехом описывает магнитные структуры даже тогда, когда были выполнены прецизионные измерения. Примером этого является модель звезды HD 149438. Результат моделирования этой звезды показывает, что дипольное представление структур магнитного поля достаточно для практического использования в широком диапазоне задач. Серия наших работ по моделированию структур магнитных полей показывает [27, 28], что наблюдается чрезвычайно большое разнообразие свойств магнитных звезд. Фактически нет двух звезд с одинаковыми параметрами магнитных полей. Это обстоятельство подтверждает предположение, что они формировались из протозвездных молекулярных облаков с сильно неоднородным магнитным полем, неоднородной плотностью и разными моментами вращения. У многих звезд структура магнитного поля описывается не «точечным» диполем (HD 10783), а «длинным» диполем. Это может свидетельствовать о том, что магнитные фрагменты на ранних стадиях эволюции не сжимаются в одну

точку. Максимально намагниченная область имеет вытянутую форму.

Из таблицы 2 видно, что семь звезд имеют малые углы наклона оси диполя к плоскости экватора вращения α , и только у трех звезд эти углы большие. Малыми углами мы считаем $\alpha < 20^\circ$; именно в этих пределах заключены углы наибольшего числа звезд. В работах [6, 24, 25] показано, что звезды с малым углом α сильно заторможены магнитным полем на начальных стадиях коллапса; у звезд с большим углом $\alpha > 20^\circ$ торможение было существенно меньше, а их малые скорости вращения, характерные для магнитных звезд, «достались» из «хвоста» распределения скоростей вращения протозвездных облаков. Кроме этого фактора действует, по-видимому, еще один: в протозвездных облаках имеет место дифференциальное вращение, когда внутренние слои вращаются быстрее внешних. Это приводит к тому, что силовые линии вытягиваются вдоль экватора. Вследствие этих двух факторов практически у всех звезд оси смещенных диполей вытянуты по кругу.

Как мы сказали, смещение диполей из центра Δa можно попытаться объяснить [6] неравномерным распределением магнитного поля в протозвездных облаках, из которых сформировались эти звезды. В случае двух и более диполей магнитные поля родительских протозвездных облаков были мелкомасштабными (HD 10783, 149438). Из таблицы 2 видно, что смещение диполей достигает $\Delta a = 0.4 R_*$. Маловероятно, что такие глобальные искажения могли произойти на более поздней нестационарной фазе эволюции или в еще более поздних стадиях, когда уже сформировалась молодая звезда на горизонтальном участке эволюционного трека. Скорее всего, глобальные структуры формируются в начальный период гравитационного коллапса.

В старых работах, когда применяли модели центрального диполя, вычислялись углы β между осью диполя и осью вращения. Теперь, когда стало ясно, что звезд с центральным диполем мало, оказалось правильнее иметь дело с углами α . Нулевая величина угла является признаком того, что вращение родительского протозвездного облака было заторможено магнитным полем [6]. Только при такой ориентации магнитных силовых линий торможение максимально. Если угол α большой, то торможение вращения практически не происходит. В случае быстрого вращения звезды, превышающего некоторую критическую величину v_c , магнитное поле принимает тороидальную форму [6, 24, 25] (или «размазывается» вследствие дифференциального вращения, т.к. внутренние слои вращаются быстрее внешних).

У звезд HD 55719, 318107 наблюдается большой разброс точек на фазовых кривых. Такое свойство отмечено и у многих других звезд. Моделиро-

вание, выполненное выше, показало, что это связано с невыгодной ориентацией магнитного поля по отношению к наблюдателю, когда одновременно видны области с магнитным полем разного знака. В такой ситуации наблюдаются спектральные линии с противоположным зеемановским смещением, что затрудняет измерения.

Диполь в центре имеют три звезды из десяти исследованных, что составляет 30% от общего числа исследованных в данной работе объектов. Это согласуется со средней величиной 27% для всех известных звезд. Такие звезды сформировались из однородных по магнитному полю протозвездных облаков [5], поэтому максимальная напряженность магнитного поля совпадает с максимальной плотностью. Следовательно, основная часть магнитных звезд сформировалась из неоднородных протозвездных облаков.

Звезда HD 25267 оказалась единственной в нашей выборке, у которой диполь смещен поперек оси. Таких звезд мало, вероятно, потому, что коллапс протозвездных облаков поперек силовых линий происходит труднее, чем вдоль них.

Интересен факт чередования знаков в сложных магнитных конфигурациях, например, у звезд HD 10783 и 149438, который следует изучить специально. Интересен также факт, что чем глубже магнитные фрагменты, тем фазовая зависимость ближе к синусоиде. Сложные структуры — поверхностное явление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56**, 173 (2013).
2. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **69**, 305 (2014).
3. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56**, 407 (2013).
4. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57**, 204 (2014).
5. Yu. V. Glagolevskij, *Astronomy Reports* (in press).
6. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57**, 315 (2014).
7. H. M. Maitzen, W. W. Weiss, and H. J. Wood, *Astron. and Astrophys.* **81**, 323 (1980).
8. H. W. Babcock, *Astrophys. J. Suppl.* **141**, 1 (1958).
9. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **42**, 421 (1980).
10. G. Mathys, S. Hubrig, J. D. Landstreet, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **123**, 353 (1997).
11. W. K. Bonsack, *Astrophys. J.* **209**, 160 (1976).
12. G. Mathys and S. Hubrig, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 475 (1997).
13. J.-F. Donati, I. D. Howarth, M. M. Jardine, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **370**, 629 (2006).
14. G. Mathys, D. W. Kurtz, and V. E. Elkin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **380**, 181 (2007).
15. G. Mathys, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **89**, 121 (1991).
16. D. A. Bohlender, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson, *Astron. and Astrophys.* **269**, 355 (1993).

17. T. A. Ryabchikova, O. P. Kochukhov, D. O. Kudryavtsev, et al., *Astron. and Astrophys.* **445**, L47 (2006).
18. F. F. Catalano and P. Renson, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **127**, 421 (1998).
19. Yu. Yu. Balega, V. V. Dyachenko, A. F. Maksimov, et al., *Astrophysical Bulletin* **67**, 44 (2012).
20. A. Uesugi and I. Fucuda, *Contr. Inst. Astrophys. and Kwasan Obs.*, № 189 (1970).
21. N. Nesvacil, T. Luftinger, D. Shulyak, et al., *Astron. and Astrophys.* **537**, 151 (2012).
22. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 33 (2002).
23. H. Hensberge, G. Deridder, C. Doom, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **46**, 151 (1981).
24. Т. Ч. Мусховиас, в *Протозвезды и планеты*, Ред. В. И. Мороз (Мир, Москва, 1982), сс. 236–273.
25. T. Ch. Mouschovias and E. V. Paleologou, *Astrophys. J.* **230**, 204 (1979).
26. E. Gerth, Yu. V. Glagolevskij, and G. Scholz, in: *Stellar Magnetic Fields*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (Nauka, Moscow, 1997), p. 67.
27. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **66**, 144 (2011).
28. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68**, 338 (2013).

Magnetic Field Structure and Evolution Features of Selected Stars. II.

Yu. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko

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