

УДК 524.35-337

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУР МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД. IV

© 2016 Ю. В. Глаголевский*, А. Ф. Назаренко

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 25 февраля 2016 года; принята в печать 19 августа 2016 года

Приводятся результаты моделирования выборки магнитных звезд. Получены такие важные для физики магнитных звезд параметры как среднее поверхностное магнитное поле B_s , магнитное поле на магнитных полюсах — B_p , наклон магнитных диполей к плоскости экватора вращения α и расстояние монополей от центра звезды Δa . Приводятся некоторые сведения по физике магнитных звезд, помогающие лучше понять полученные результаты.

Ключевые слова: *звезды: магнитные поля — звезды: химически пекулярные — звезды: эволюция*

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача этой работы состоит в пополнении списка звезд с известным средним поверхностным магнитным полем B_s (average magnetic field modulus), определяемым методом моделей, а также в накоплении сведений о свойствах и структурах магнитных полей звезд. Характерный вид кривых изменения продольного магнитного поля B_e с фазой периода вращения Φ привел Бэбкока [1] к предположению, что структуры магнитных полей химически пекулярных (CP) звезд приближаются к структуре теоретического магнитного диполя. Бэбкок допускал присутствие мультиполей более высоких порядков, но считал доминирующей дипольную структуру. Действительно, наша методика моделирования методом магнитных диполей [2] (раньше мы называли методом магнитных зарядов) показала, что структура основной, глобальной конфигурации близка структуре теоретического магнитного диполя. Но очевидно, что на нее накладывается более сложная структура [3], которая возникает в период ранних нестационарных стадий эволюции. К настоящему времени накоплены результаты моделирования более ста магнитных звезд. В данной работе мы продолжаем строить модели с использованием фазовых зависимостей продольного магнитного поля $B_e(\Phi)$ и/или среднего поверхностного магнитного поля $B_s(\Phi)$, полученные разными авторами. Одним из важных результатов моделирования является получение величин B_s , использование которых в статистических исследованиях более предпочтительно, чем средних

квадратических величин $\langle B_e \rangle$, часто применяемых. В настоящее время в нашем распоряжении не так много достаточно точных фазовых зависимостей изменения магнитных полей, поэтому для многих звезд приходится предполагать в качестве первого приближения модель центрального диполя. Для таких звезд невозможно выяснить какова реальная структура поля, однако практика показывает, что полученные величины магнитного поля на полюсах B_p и средних поверхностных магнитных полей B_s по порядку величины обычно близки точным величинам и они могут быть использованы в статистических исследованиях. Ниже приводятся результаты дополнительных исследований структур и параметров выборки магнитных звезд (предыдущие списки приводятся в [4–9]). Рассмотрены также особенности отдельных объектов. Модельные величины B_s вычисляются как средние из десяти равномерно распределенных точек на фазовой зависимости. Если зависимость синусоидальная, то $B_s = (B_s(max) + B_s(min))/2$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Таблица 1 содержит номер исследованных звезд по каталогу HD, эффективную температуру T_{eff} и ее литературный источник (L), затем литературный источник используемых величин магнитного поля B_e в разных фазах периода вращения, количество измерений N на фазовой зависимости и вес полученных из модели параметров. Мы приняли вес равным 1, если число измерений меньше десяти или они плохо лежат на фазовой зависимости, вес 2, если число точек больше десяти или они с небольшим разбросом лежат на фазовой зависимости.

*E-mail: glagol@sao.ru

Таблица 1. Параметры исследуемых звезд I

Звезда	Тип	T_{eff} , К	L	B_e source	N	Вес
HD 12767	Si	12 956	[10]	[12]	8	1
HD 15144	SrCrEu	8367	[10]	[13, 14]	5	1
HD 24155	S+	13 676	[10]	[15]	6	1
HD 25823	Si	12 906	[10]	[16]	17	1
HD 27309	Si+	11 907	[10]	[12]	8	1
HD 28843	He-w	14 214	[10]	[17]	5	1
HD 34736	Si?	12 600	[10]	[18]	16	2
HD 36629	He-w	20 350	[10]	[19]	8	2
HD 37022	O	39 350	[10]	[20, 21]	10	2
HD 37058	He-w	19 966	[10]	[17, 19]	8	1
HD 49333	He-w	16 522	[10]	[15]	10	1
HD 50773	SrCrEu	8300	[22]	[22]	29	2
HD 58260	He-r	18 000	[10]	[23, 24]	9	1
HD 72968	SrCrEu	9258	[10]	[13, 25]	18	1
HD 83368	SrCrEu	7833	[10]	[26]	18	2
HD 92664	Si	14 265	[10]	[15]	18	2
HD 107612	SrCrEu	8950	[10]	[27]	6	1
HD 191612	O	35 000	[28]	[28]	12	2
HD 125248	SrCrEu	9497	[10]	[12, 29]	17	2
HD 133029	Si+	10 750	[10]	[12]	16	1
HD 133652	Si	13 061	[10]	[15]	9	2
HD 148112	SrCrEu	9041	[10]	[12]	8	1
HD 148199	Si	10 309	[10]	[15, 30]	13	1
HD 151965	Si	14 528	[10]	[15]	8	2
HD 196178	Si	13 483	[10]	[31]	9	2
HD 220825	SrCrEu	8600	[10]	[12]	8	2

Чаще всего разброс большой, если звезда видна под невыгодным углом наклона оси вращения к лучу зрения $i \sim 0-10^\circ$, магнитное поле слабое или магнитные полюса находятся вблизи полюса вращения. Каталог использованных параметров [10] является результатом пополнения и уточнения данных каталога [11].

В таблице 2 приведены основные параметры звезд — период вращения P , радиус R/R_\odot , $v \sin i$,

а также литературный источник этих параметров (L). Угол наклона звезды i к лучу зрения берется из литературы или вычисляется на основе приведенных параметров с использованием формулы $v = 50.6(R/R_\odot)/P$ и величины $v \sin i$. Мы стараемся вывести величину $v \sin i$ из нескольких литературных источников, потому что они, как правило, определяются со значительными ошибками.

В таблице 3 последовательно даны номера звезд (HD), знак монополя, для которого затем следуют его координаты по широте и долготе, величины магнитного поля на полюсах B_p , и средняя величина поверхностного магнитного поля B_s . В следующих колонках даны угол наклона оси диполя к плоскости экватора вращения α и величина смещения монополя Δa от центра звезды в единицах радиуса. В тех случаях, когда структура магнитного поля в самом деле соответствует структуре центрального диполя, ставится знак **0**, это значит, что смещение диполя из центра равно нулю. Но если точность измерений низкая или разброс точек на фазовой зависимости велик, то невозможно решить, какому типу принадлежит структура. В таком случае мы применяем модель центрального диполя как первое приближение и с этой моделью получаем параметры (хотя, если бы эта звезда была измерена точно, могло оказаться, что ее структура не принадлежит центральному диполю). В таком варианте параметры могут несколько отличаться от тех, которые были бы при наличии точных измерений (см. далее замечания к HD 50773). Таким образом, 10 звезд с неопределенной структурой, в первом приближении описываемой центральным диполем, мы обозначаем их как 0, т.е. смещение диполя из центра равно нулю. В исследованной выборке, как оказалось, две звезды со смещением диполя вдоль оси имеют Δa со знаком минус, т.е. диполь смещен в сторону отрицательного монополя.

Средняя ошибка определения величины смещения Δa монополя из центра звезды оказывается равной $\pm 0.05 R_*$. Трудно оценить ошибку измерений величин магнитного поля на полюсах B_p и среднее поверхностное поле B_s в случае использования литературных данных о $v \sin i$, которые применяются для определения угла наклона i оси вращения к лучу зрения наблюдателя. Ошибки $v \sin i$ обычно неизвестны, однако опыт показывает, что средние ошибки $v \sin i$ составляют 20%. Соответственно и точность определения B_p и B_s такого же порядка. Для статистических исследований этого достаточно. Но в тех случаях, когда известны обе фазовые зависимости $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$, ошибка измерений может достигать 5%.

Таблица 2. Параметры исследуемых звезд II

Звезда	P , days	L	R/R_{\odot}	L	$v \sin i$, km s $^{-1}$	L	i , deg
HD 12767	1.89	[32]	3.51	[10]	74	[32, 33]	52
HD 15144	3.00	[20]	1.77	[10]	20	[32, 33]	42
HD 24155	2.53	[32]	4.34	[10]	43	[15, 34]	30
HD 25823	7.23	[32]	3.43	[10]	21	[33]	56
HD 27309	1.57	[32]	2.50	[10]	42	[32, 33]	32
HD 28843	1.37	[17]	2.36	[10]	60	[33]	44
HD 34736	1.08	[18]	3.98	[10]	81	[18]	26
HD 36629	5.01	[31]	2.90	[10]	8	[33, 35]	16
HD 37022	15.42	[20]	8.0	[32]	24	[33]	67
HD 37058	14.62	[20]	3.48	[10]	5	[33]	25
HD 49333	2.18	[15]	4.11	[10]	64	[15, 34, 36]	42
HD 50773	2.09	[12]	2.09	[10]	46	[12]	64
HD 58260	1.66	[37]	3.50	[10]	12	[38]	6.5
HD 72968	11.30	[39]	1.91	[10]	10	[33]	90
HD 83368	2.85	[26]	1.74	[10]	33	[26]	90
HD 92664	1.67	[32]	2.94	[10]	65	[15, 39]	47
HD 107612	1.99	[27]	2.22	[10]	37	[26]	42
HD 125248	9.29	[32]	2.05	[10]	59	[2]	90
HD 133029	2.89	[32]	2.56	[10]	25	[32, 39, 40]	34
HD 133652	2.30	[32]	1.33	[10]	57	[15, 36, 41]	> 90
HD 148112	3.04	[32]	3.30	[10]	42	[33–35, 40]	50
HD 148199	7.72	[12]	2.49	[10]	15	[15]	70
HD 151965	1.61	[12]	2.90	[10]	105	[36]	90
HD 191612	537.6	[28]	14.5	[28]	–	–	30 [11]
HD 196178	1.92	[31]	2.98	[10]	52	[32, 33]	42
HD 220825	1.14	[12]	2.05	[10]	38	[32, 33, 40]	25

Таблица 3. Параметры моделей

Звезда	Знак	Долгота, deg	Широта, deg	B_p , G	B_s , G	α , deg	Δa , R
HD 12767	+	0	0	252	159	0	0:
	–	180	0				
HD 15144	+	180	–81	± 1464	1055	81	0:
	–	0	+81				
HD 24155	+	270	+14	± 2910	1790	14	0:

Таблица 3. Продолжение

Звезда	Знак	Долгота, deg	Широта, deg	B_p , G	B_s , G	α , deg	Δa , R
	–	90	–14				
HD 25823	+	215	+55	± 1373	914	55	0:
	–	35	–55				
HD 27309	+	0	–50	± 1945	1350:	50	0:
	–	180	+50				
HD 28843	+	72	–8	± 943	580	8	0:
	–	252	+8				
HD 34736	+	180	–2	± 1416	814	2	0:
	–	0	+2				
HD 36629	+	10	–6	± 810	457	6	0:
	–	190	+6				
HD 37022	+	20	+50	± 552	361	30	0:
	–	200					
HD 37058	+	200	+5	± 4762	2665	5	0
	–	90	–5				
HD 50773	+	180	0	± 998	602	0	0
1 диполь	–	0	0				
HD 50773	+	156	0	+716	441	0	0.15
2 диполя	–	355	0	–712			0.15
	+	290	0			2.5	0.40
	–	240	+5				0.40
HD 49333	+	30	0	± 2203	1332	0	0
	–	210	0				
HD 58260	+	270	+65	4063	3063	65	0
	–	90	–65				
HD 72968	+	180	+3	± 2815	1637	3	0:
	–	0	–3				
HD 83368	+	236	0?	937	630	?	0
	–	56	0?				
HD 92664	+	144	–50	1673	1140	50	0
	–	36	+50				
HD 107612	+	0	+10	± 718	439	10	0
	–	180	–10				

Таблица 3. Продолжение

Звезда	Знак	Долгота, deg	Широта, deg	B_p , G	B_s , G	α , deg	Δa , R
HD 125248	+	20	0	3197	2172	0	0
	–	180	0				
HD 133029	+	180	+35	+5354	6157	35	–0.3
	–	0	–35	–34 473			
HD 133652	+	200	–45	3370:	2200:	50	0
	–	20	+45				
HD 148112	+	54	–45	415	277	50	0
	–	234	+45				
HD 148199	+	205	+8	2170	1350	8	0
	–	25	–8				
HD 151965	+	265	+83:	15109:	9565:	83:	0
	–	76	–83:				
HD 191612	+	180	+22	±980	600	22	0
	–	0	–22				
HD 196178	+	72	–40	+517	1847	40	–0.15
	–	252	+40	–2072			
HD 220825	+	50	–20	1168	678	11	0
	–	230	+20				

3. ЗАМЕЧАНИЯ О ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Одним из главных вопросов состоит в том, насколько правильно применяемая методика моделирования описывает внутреннюю структуру магнитного поля. Результаты моделирования более ста магнитных звезд показывают, что вычисленные модельные фазовые зависимости для всех без исключения исследованных звезд, даже измеренных с самой высокой точностью ($\sigma \sim 5$ Гс), в пределах 3σ соответствуют наблюдаемым зависимостям. Если известны обе фазовые зависимости — $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$, то модельные зависимости совпадают с наблюдениям при одинаковых параметрах. Это еще один довод в пользу правильности методики. Средние модельные величины B_s в пределах ошибок, как правило, тоже совпадают с измеренными данными, и это третий довод. Эти результаты позволяют предполагать, что модельные структуры магнитного диполя в первом приближении соответствуют распределению магнитных полей внутри звезд. Такая модель в первом приближении хорошо описывает также распределение крупномасштаб-

ной фракции магнитного поля по поверхности звезды. Природа создала такую структуру магнитного поля, которая мало отличается от структуры предполагаемого теоретического магнитного диполя. С точки зрения реликтовой гипотезы она создается в процессе гравитационного сжатия неоднородных по плотности и магнитному полю протозвездных облаков. Результаты исследований, обсуждаемых в [41], показывают, что в период нестационарной фазы Хаяши начальная полоидальная структура магнитного поля усложняется появлением мелких структур, которые в последующих фазах эволюции постепенно исчезают вследствие их неустойчивости (в основном из-за омической диссипации), но в значительной степени крупные структуры все еще сохраняются и на Главной последовательности. Измеряемое крупномасштабное продольное поле B_e у звезд Главной последовательности содержит составляющую, вызываемую структурами средней величины. Это хорошо видно из наблюдений [3]. Однако в результате того, что мелкие и средние структуры направлены произвольно, их суммарная продольная составляющая равна нулю, в то время как глобальная дипольная структура проявляется

через фазовые зависимости B_e или B_s . Мелкомасштабная структура у молодых горячих звезд должна увеличивать ширину спектральных линий, приводя к фиктивному росту $v \sin i$, у которых релаксация магнитного поля произошла в меньшей степени из-за относительной молодости. К сожалению, количественно влияние этого эффекта оценить пока трудно. Таким образом, на Главной последовательности наблюдается двухкомпонентная структура магнитного поля химически пекулярных (CP) звезд — крупномасштабная и мелко масштабная. По мере постепенного исчезновения мелкомасштабной фракции крупномасштабное поле постепенно растет [42]. Теоретическое время жизни глобального магнитного поля составляет $t = 10^{10} - 10^{11}$ лет, хотя реально максимальный возраст магнитных звезд (SrCrEu- типа) составляет 10^9 лет [43]. Это показывает, что наблюдаемые крупномасштабные структуры остаются в течение всего времени жизни звезды практически неизменными. Отсутствие крупномасштабных движений вещества внутри магнитных звезд, которые могли бы изменить наблюдаемые структуры, обсуждается в [44].

Если бы магнитное поле в протозвезде было пропорционально плотности, то в результате ее сжатия максимальная напряженность поля была бы в центре, где максимальная плотность. Однако распределение поля не связано с плотностью и максимальная напряженность не будет совпадать с центром звезды. В результате ранних работ [45, 46], а также наших [4] исследований оказалось, что магнитные структуры можно разделить на четыре основных типа: 1) поле центрального диполя, 2) поле диполя, смещенного вдоль его оси, 3) поле диполя, смещенного поперек оси и 4) поле двух и более диполей внутри звезды. В многодипольных структурах знаки монополей чередуются. Не было случаев, чтобы диполи располагались знаками в одну сторону. Скорее всего, в период сжатия протозвездных облаков такие конфигурации неустойчивы [47]. Важной проблемой внутренних структур магнитного поля является влияние конвективного ядра. Возможно, одним из признаков его влияния является факт смещенных из центра звезд диполей. Но около 20% звезд имеют структуры магнитного поля диполя, находящегося в центре звезды. Магнитные силовые линии должны обходить область, занимаемую конвективным ядром. Применение нашей методики моделирования показывает, что 3-й и 4-й типы структур имеют диполи, смещенные из центра звезды иногда на очень большое расстояние, до $\Delta a = 0.4R_*$, причем монополи разделены на значительные расстояния l . В случае структур 2-го типа уверенно определяется величина смещения диполя из центра звезды Δa , но не определяется расстояние между монополями l . В случае структур

1-го типа величина l тоже неизвестна, потому что она практически не влияет на форму фазовых зависимостей. Из общих соображений можно предположить, что монополи в конфигурациях 1-го и 2-го типов тоже располагаются вне конвективного ядра. В связи со сказанным необходимо отметить важное свойство магнитных конфигураций — они не вполне соответствуют теоретическому («точечному») диполю, у которого $l \ll R_*$. Структура магнитного поля соответствует диполю с $l \sim R_*$. Такая магнитная структура похожа на поле длинного магнита или соленоида. В таких случаях положение магнитных монополей определяется сингулярными точками, в которых сходятся силовые линии. Положение диполя определяется точкой симметрии магнитной конфигурации. На рис. 1 показаны схемы расположения диполей внутри исследованных в этой работе звезд. Это модели центрального диполя — (а), модели смещенного вдоль оси диполя — (б), и одна двухдипольная модель — (с). Следует отметить, что координаты магнитных полюсов на поверхности у звезд 3 и 4 типов не совпадают с координатами магнитных монополей.

Для объяснения некоторых свойств магнитных звезд сделаем следующее замечание. Самые массивные звезды имеют относительно слабое магнитное поле. Это хорошо видно из рис. 2, где представлена зависимость среднего магнитного поля для звезд разных типов пекулярности от их средней температуры (массы). Величины магнитного поля взяты из работ [5–9]. Слева на зависимости показаны величины B_s для трех O-звезд (HD 149438 [8], HD 37022 и HD 191612). Это одна из интересных и четких зависимостей для магнитных звезд. Одновременно сошлемся на работу [48], в которой показано, что доля магнитных звезд со слабым полем увеличивается в сторону увеличения температуры (массы). В работе [49] обсуждаются возможные причины такого хода зависимости. Наиболее вероятно, релаксация магнитного поля у массивных звезд произошла в меньшей степени вследствие их относительной молодости, и глобальная дипольная составляющая восстановилась в меньшей степени.

4. ЗАМЕЧАНИЯ ОБ ОТДЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ

Типичные магнитные звезды со структурой центрального диполя не вызывают особого интереса, но по отдельным объектам необходимы дополнительные пояснения.

4.1. HD 15144

Рассеяние измеренных величин B_e на зависимости $B_e(\Phi)$ очень большое, поэтому применена модель центрального диполя. Амплитуда тоже невелика, всего $\Delta B_e \approx 200$ Гс. Это происходит

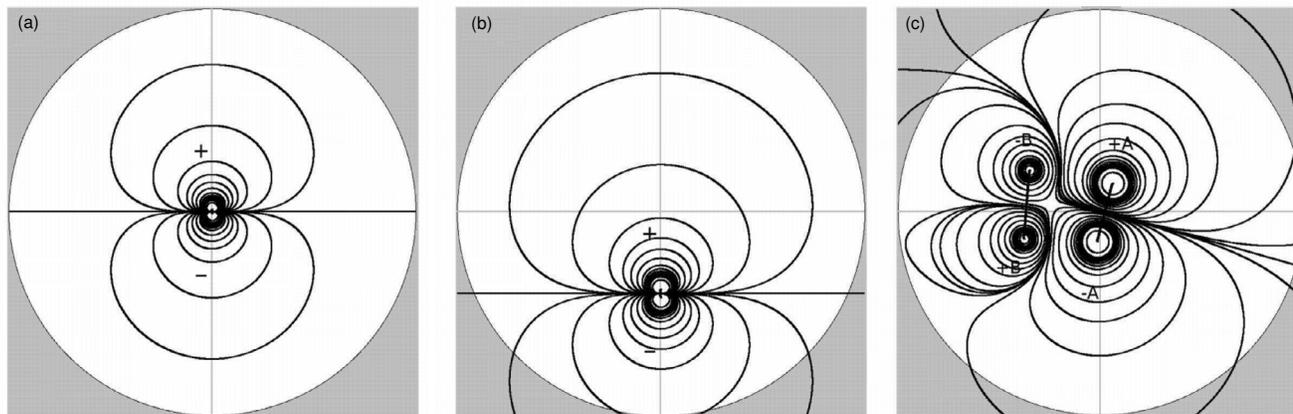


Рис. 1. Схемы расположения диполей внутри исследованных в этой работе звезд. (А) — модели центрального диполя, (В) — модели смещенного вдоль оси диполя, (С) — двухдипольная модель звезды HD 50773.

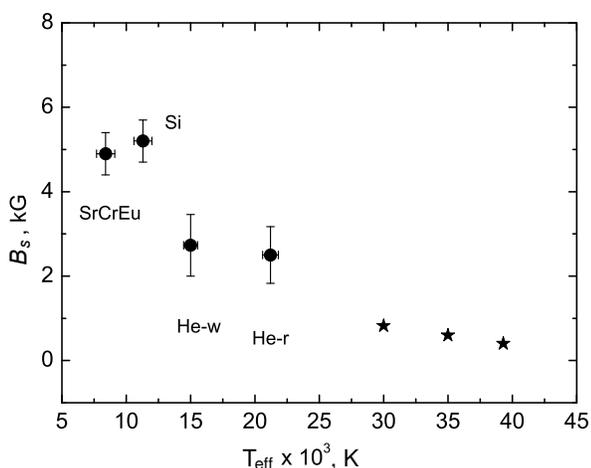


Рис. 2. Зависимость среднего поверхностного магнитного поля B_s для звезд разных типов пекулярности от их средней температуры (массы). Звездочки относятся к трем горячим магнитным звездам HD 37022, HD 149438 и HD 191612.

потому, что угол $\alpha = 81^\circ$, т.е. магнитные полюса находятся фактически на полюсах вращения. Такие объекты встречается довольно редко. При таком большом угле α протозвездное облако не могло быть заторможено магнитным полем, скорее всего, звезда произошла из протозвездного облака с малым моментом вращения [40].

4.2. HD 25823

Звезда имеет слабое поле, поэтому относительные ошибки значительны. Разброс точек велик также потому, что отрицательный полюс в фазе $\Phi = 0.1$ находится в горизонте, когда $B_e \approx 0$ Гс. Тем не менее, звезда интересна тем, что ось диполя находится под большим углом $\alpha = 55^\circ$ к плоскости экватора вращения. При таком угле протозвездное

облако не могло эффективно затормозиться магнитным полем, поэтому предполагаем, что звезда произошла из протозвездного облака, имевшего малый угловой момент вращения, как и звезда HD 15144 [40].

4.3. HD 34736

Средние величины приняты на основании данных, приведенных в [50], $T_{\text{eff}} = 12600$ К и $v \sin i = 81$ км с⁻¹. Другие параметры для этой звезды неизвестны, поэтому в качестве первого приближения были приняты их величины, соответствующие звездам V класса светимости. При таких предположениях получен угол $i = 38^\circ$. Отскакивающие точки на фазах $\Phi = 0.28$ и 0.42 не могут быть объяснены никакими предположениями. Неопределенность угла i повлияет на величины B_p и B_s , но тип модели и величины α , B_p и B_s , могут рассматриваться как первое приближение. Модели центрального диполя дают средние параметры, приведенные в таблице 3.

4.4. HD 37022, O-звезда

Для нас интересно то, что звезда не относится к химически пекулярным объектам. Эта звезда наблюдалась в течение трех периодов времени, разными авторами. В работе [51] проведено 5 измерений (средняя $\sigma = 53$ Гс) и угол там определен как $i = 45^\circ$. В работе [21] приводятся данные по десяти измерениям (средняя ошибка $\sigma = 134$ Гс). Измеренные точки отстоят в пределах 3σ от модельной зависимости в первом случае и в пределах 2σ во втором. Имеется также 8 измерений в [52] со средней $\sigma = 500$ Гс. В этом случае измеренные величины отстоят от модельной зависимости в пределах 2σ . Обращает на себя внимание разная амплитуда изменений поля у разных авторов, вследствие чего среднее поверхностное поле различается

в два раза. Причина может быть связана с реальной переменностью вследствие неустойчивости O-звезд, а также вследствие методических различий разных авторов. Величина поля невелика и ошибки измерений могут сказываться существенно. Модели центрального диполя дают средние параметры, приведенные в таблице 3. Этот результат подтверждает наше предположение, что величины поля у массивных звезд должны быть сравнительно невелики вследствие неполной релаксации [52, 53]. Интересно, что диполь у этой звезды лежит не в плоскости экватора вращения, поэтому можно предполагать, что медленное вращение досталось от медленных протозвездных облаков и не возникло вследствие «магнитного торможения» [41].

4.5. HD 37058

Несмотря на небольшое число измерений, точки достаточно хорошо располагаются вдоль фазовой кривой. За начальную фазу $\Phi = 0$ принят JD 24439749^d976 в работе [21]. Надежность величины $v \sin i = 5 \text{ км с}^{-1}$ невелика, поэтому угол $i = 25^\circ$, полученный на его основании, принят как первое приближение. Величина периода вращения $P = 14^{\text{d}}.625$ принята нами для уменьшения рассеяния точек на фазовой зависимости вместо $P = 14^{\text{d}}.612$, приведенного в работе [21].

4.6. HD 50773

Звезда относится к объектам со сложной структурой магнитного поля, и потому особенно интересна. На рис. 1с показана схема расположения диполей внутри этой звезды, на рис. 3а показаны наблюдаемая (точки) и модельная (сплошная линия) фазовые зависимости $B_e(\Phi)$. Применение двухдипольной системы приводит к распределению магнитного поля по поверхности, показанному на рис. 3б. Линии одинаковой напряженности магнитного поля проведены на 20 уровнях, распределенных равномерно по величине поля. Как написано в десятках предыдущих работ по моделированию мы добиваемся такого расположения диполей внутри звезды, при котором отклонения наблюдаемых точек от модельной зависимости минимальны (обычно они не превышают 3σ). Если к данной звезде применить модель центрального диполя, то разброс точек относительно модельной кривой становится больше, поэтому этот вариант мы не приняли. В таблице 3 приведены параметры двух моделей — центрального диполя и двойного диполя. Видно, что различие между B_p и B_s около 40%, но в пределах наблюдаемого диапазона величин $B_s = 0\text{--}34\,000 \text{ Гс}$ это различие составляет всего 0.5%. Примеры такого рода показывают, что

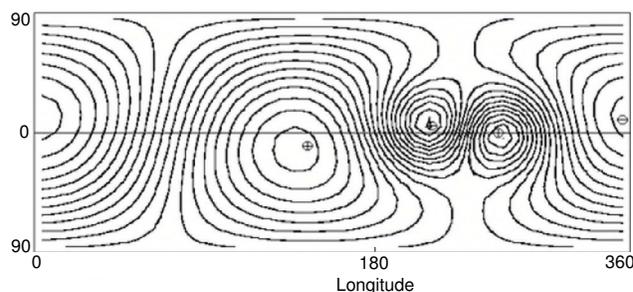
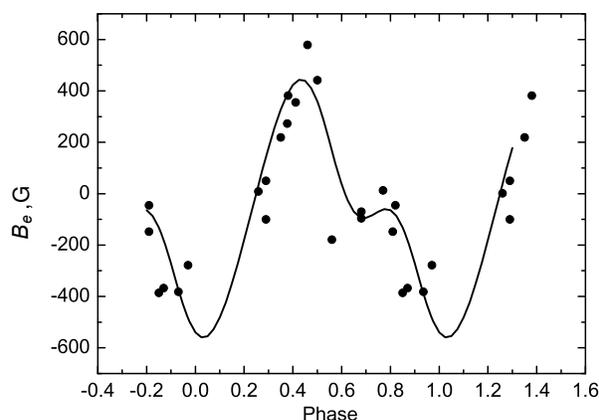


Рис. 3. Результаты моделирования структуры магнитного поля звезды со сложной структурой HD 50773. Вверху — наблюдаемая (точки) и модельная (сплошная линия) фазовые зависимости $B_e(\Phi)$. Внизу — распределение магнитного поля по поверхности.

применение модели центрального диполя вместо точного, дает параметры, вполне пригодные для статистических исследований.

В случае сложной модели с диполь с «сильными» монополями формирует основную картину распределения магнитного поля с магнитными полюсами на долготе $\lambda = 0^\circ$ и 158° , диполь со «слабыми» монополями дает полюса на $\lambda = 240^\circ$ и 290° . Для того, чтобы получить на фазовой зависимости достаточно крутое изменение магнитного поля в фазах $\Phi = 0.7\text{--}0.8$ необходимо было сместить монополи на расстояние $\Delta a = 0.4R_*$ от центра, так как при меньших расстояниях правая часть фазовой зависимости становится плавной. Схема расположения монополей в центре звезды показана на рис. 1с. Как видно из таблицы 3 оба диполя находятся практически в плоскости экватора вращения. Это говорит о том, что, скорее всего протозвезда подверглась избирательному «магнитному торможению». Сравнивая распределение магнитного поля (вдоль экватора вращения) с распределением химических аномалий в работе [9] (преимущественно вдоль экватора вращения), приходим к выводу об их тесной корреляции.

4.7. HD 58260

Звезда интересна тем, что она повернута к наблюдателю осью вращения, угол $i = 6^\circ 5'$. Поэтому амплитуда изменения магнитного поля очень мала и наблюдаемые величины магнитного поля на фазовой зависимости расположены с большим разбросом.

4.8. HD 83368

Фазовая зависимость совершенно симметрична относительно $B_e = 0$ Гс. Это значит, что $i = 90^\circ$, и определить широту монополя и угол α невозможно. Симметрия относительно $B_e = 0$ Гс свидетельствует также о том, что монополи лежат симметрично относительно плоскости экватора вращения. Если бы один монополь был в плоскости, а другой вне ее, то не было бы симметричной фазовой зависимости. В расчетах мы приняли угол $\alpha = 0^\circ$.

4.9. HD 133029

Разброс точек на фазовой зависимости очень велик. Тем не менее, по характерному виду расположения точек вдоль фазовой зависимости можно сделать вывод, что мы имеем дело со смещенным вдоль оси диполем: в фазе $\Phi = 0$ фазовая зависимость острая, а в $\Phi = 0.5$ тупая. Действительно, по параметрам модели приведенным в таблице 1, видно, что звезда отличается аномально сильным сдвигом диполя вдоль его оси из центра на расстояние $\Delta a = 0.4R_*$. Наблюдаемые величины B_e отстоят от модельной фазовой кривой в пределах 2σ , т.е. наблюдательные данные очень хорошо соответствуют модели. Вероятно родительское протозвездное облако было сильно неоднородным по магнитному полю [41]. Звезда отличается значительным наклоном оси диполя к плоскости экватора вращения $\alpha = 35^\circ$, поэтому она вряд ли могла быть сильно заторможена магнитным полем в стадии протозвезды. Необходимы дополнительные наблюдения для уточнения модели.

4.10. HD 148112

Звезда отличается слабым магнитным полем и сильным разбросом точек на фазовой зависимости. Моделирование показало, что наблюдается большой угол наклона $\alpha = 50^\circ$ оси диполя к плоскости экватора вращения. Необходимы дополнительные измерения для уточнения модели. Очевидно, протозвездное облако изначально имело малый угловой момент вращения [41].

4.11. HD 151965

На основании имеющихся параметров получается, что $i = 90^\circ$. Но при таком угле фазовая зависимость должна быть симметрична относительно $B_e = 0$ Гс. По форме фазовой кривой видно, что $i < 90^\circ$. Допуская, что ошибка $\sigma = 10^\circ$ вполне возможна, предполагаем $i = 80^\circ$. При таком условии вычислены параметры, приведенные в таблице 1. Результат следует рассматривать как первое приближение.

4.12. HD 191612, O-звезда

Это еще одна O-звезда в нашем исследовании. Звезда изучалась в работе [22]. Для нас интересно то, что она не относится к химически пекулярным объектам. Поэтому мы попытались промоделировать структуру магнитного поля нашим стандартным способом и сравнить с результатами, полученными в [22]. Использованы параметры, которые приведены в этой работе. Угол наклона оси магнитного диполя к оси вращения оказался таким же, но магнитное поле на полюсах отличается значительно. В пределах ошибок измерений структура магнитного поля соответствует центральному диполю, как и у HD 37022, но угол α довольно велик.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) Цель настоящей работы заключается в пополнении данных о средних поверхностных магнитных полях B_s и поисках новых особенностей в структурах магнитных звезд. Из изученных 26 звезд, 14 звезд определенно имеют структуру центрального диполя, 10 звезд с неопределенной структурой, в первом приближении описываемой центральным диполем, одна звезда HD 50773 имеет структуру магнитного поля описываемого двумя диполями, «сильным» и «слабым». Две звезды HD 133029, HD 196178 описываются диполем, смещенным вдоль их оси. Из результатов моделирования новой выборки магнитных звезд видно, что их свойства вполне соответствуют типичным звездам этого типа.
- 2) Структуры магнитных полей двух молодых O-звезд не демонстрируют каких либо особенностей. Как и ожидалось, у молодых объектов не может быть сильных полей из-за недостаточной степени релаксации сложных мелкомасштабных структур, которые возникли на ранней стадии эволюции. Пока что можно предполагать, что магнитные структуры у O-звезд формируются по тому же сценарию, что и для магнитных звезд Главной последовательности.
- 3) Как обычно, изученные магнитные звезды имеют довольно разнообразные свойства, поэтому важны дальнейшие исследования для получения полного представления о них.

4) Как видно из приведенных выше данных большой разброс измеренных величин магнитного поля на фазовой зависимости возникает, как правило, в тех случаях, когда магнитные полюса находятся вблизи полюса вращения (угол α велик), либо если угол i мал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **114**, 1 (1951).
2. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 25 (2003).
3. O. Kochukhov, S. Bagnulo, and G. Wade, *Astron. and Astrophys.* **414**, 613 (2004).
4. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **66**, 144 (2011).
5. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56**, 173 (2013).
6. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68**, 78 (2013).
7. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **69**, 305 (2014).
8. Yu. V. Glagolevskij and A. F. Nasarenko, *Astrophysical Bulletin* **70**, 1 (2015).
9. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **71**, 43 (2016).
10. Yu. V. Glagolevskij, готовится к печати.
11. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 33 (2002).
12. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **42**, 421 (1980).
13. H. W. Babcock, *Astrophys. J. Suppl.* **3**, 141 (1958).
14. W. K. Bonsack, *Peculiar Newsletter* **7**, 7 (1981).
15. D. A. Bohlender, J. D. Landstreet, and B. Thompson, *Astron. and Astrophys.* **269**, 355 (1993).
16. S. C. Wolff, *Astrophys. J.* **186**, 951 (1973).
17. E. F. Borra, J. D. Landstreet, and I. Thompson, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **53**, 151 (1983).
18. E. Semenko, I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, and I. A. Yakunin, *Astrophysical Bulletin* **69**, 203 (2014).
19. P. S. Conti, *Astrophys. J.* **159**, 723 (1970).
20. O. Stahl, A. Kaufer, T. Rivinius, et al., *Astron. and Astrophys.* **312**, 539 (1996).
21. G. A. Wade, *Astron. and Astrophys.* **451**, 195 (2006).
22. T. Luftinger, H.-E. Frohlich, W. W. Weiss, et al., *Astron. and Astrophys.* **509**, A43 (2010).
23. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **228**, 809 (1979).
24. D. A. Bohlender, J. D. Landstreet, D. N. Brown, and I. Thompson, *Astrophys. J.* **323**, 325 (1987).
25. E. P. J. van den Heuvel, *Astron. and Astrophys.* **11**, 461 (1971).
26. G. Mathys, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **89**, 121 (1991).
27. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and E. Paunzen *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 1804 (2006).
28. G. A. Wade, I. D. Howarth, R. H. D. Townsend, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **416**, 3160 (2011).
29. G. Mathys and S. Hubrig, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 475 (1997).
30. D. I. Thompson, D. N. Brown, and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **64**, 219 (1987).
31. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madey, *Astron. and Astrophys.* **430**, 1143 (2005).
32. H. Abt, *Astrophys. J.* **122**, 2008 (2001).
33. A. Uesugi and I. Fucuda, in *Contr. Inst. Astrophys. Kwasan Obs.* (Univ. Kioto, Kioto, 1970).
34. H. A. Abt, H. Levato, and M. Grosso, *Astrophys. J.* **573**, 359 (2002).
35. M.-F. Nieva, *Astron. and Astrophys.* **550**, 26 (2013).
36. H. Levato, S. Malaroda, N. Morrell, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **118**, 231 (1996).
37. H. Pedersen, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **35**, 313 (1979).
38. V. Petit, S. P. Owocki, G. A. Wade, et al, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 398 (2013).
39. R. Steinitz and D. M. Pyper, *Inf. Bull. Var. Stars* **413**, 1, (1970).
40. V. G. Klochkova and I. M. Kopylov, *Sov. Astron.* **29**, 549 (1985).
41. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **58**, 350 (2015).
42. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56**, 407 (2013).
43. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57**, 204 (2013).
44. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57**, 315 (2014).
45. G. Preston, *Astrophys. J.* **150**, 547 (1967).
46. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **159**, 1001 (1970).
47. E. F. Flowers and M. A. Ruderman, *Astrophys. J.* **215**, 301 (1977).
48. Yu. V. Glagolevskij and G. A. Chountonov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 105 (1998).
49. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **59**, 191 (2016).
50. E. Semenko, *ASP Conf. Ser.* **494**, 51 (2015).
51. J.-F. Donati, J. Babel, T. J. Harries, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **333**, 55 (2002).
52. D. O. Kudryavtsev, N. E. Piskunov, I. I. Romanyuk, et al., *Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars* Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2000), p.64–67.
53. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* (2016).

Features of Magnetic Field Structures in Chemically Peculiar Stars. IV**Yu. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko**

We present results of modeling of the sample of magnetic stars. We have obtained such important for magnetic star physics parameters as the mean surface magnetic field B_s , the magnetic field at magnetic poles— B_p , the dipole inclination to the rotation equatorial plane α , and the distance to monopoles from the center of the star Δa . We present some information on magnetic star physics that helps to understand the derived results better.

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