

УДК 524.35-337

ОСОБЕННОСТИ МНОГОДИПОЛЬНЫХ СТРУКТУР МАГНИТНОГО ПОЛЯ СР-ЗВЁЗД

© 2013 Ю. В. Глаголевский*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 16 апреля 2013 года; принята в печать 15 мая 2013 года

Десять магнитных звезд из исследованных 60 имеют двух- и трехдипольные структуры. С точки зрения реликтовой гипотезы, большое разнообразие структур и величин магнитного поля позволяет предполагать, что в начальных фазах формирования магнитных звезд поле у них было еще более запутанное и неоднородное, чем сейчас. Это могло быть следствием сложной структуры протозвездных облаков, следствием нестационарных процессов при коллапсе и, вероятно, следствием последующих аккреционных воздействий. Ожидаемое изменение крупномасштабной структуры с возрастом теряется на фоне большого разнообразия структур, зависящих от начальных условий. Сложная структура встречается как у звезд, находящихся на ZAMS, так и у покидающих главную последовательность. В результате квадратичной зависимости времени жизни магнитных структур от их характерных размеров крупномасштабные конфигурации могут существовать в течение времени, сравнимого с временем жизни магнитного поля звезды, т.е. $\tau \geq 10^9$ лет. Одно из общих свойств многодипольных звезд состоит в том, что центры диполей находятся преимущественно в плоскости экватора вращения. У большинства исследованных объектов магнитные диполи (т.е. области с максимальным полем) смещены из центра звезды на расстояние, превышающее радиус конвективного ядра (примерно $0.1R_*$). Это обстоятельство может служить признаком того, что полоидальное поле несовместимо с конвективным ядром и не генерируется в нем. Характерны большие расстояния между монополями, сравнимые с радиусом звезд. Это может служить признаком того, что внутри звезд структура поля несколько отличается от дипольной, т.е. диполь — это не математическая точка, а некоторый сильно намагниченный объем внутри звезды, как намагниченный стержень.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты предыдущих наших работ по моделированию магнитных полей у СР-звезд методом магнитных диполей [1] показывают, что этот метод очень хорошо описывает наблюдаемые фазовые зависимости продольного поля $V_e(\varphi)$, даже если они выполнены с рекордной точностью. Поэтому имеются основания полагать, что модели сложных структур тоже достаточно надежны. Из рассмотрения результатов моделирования можно видеть, что внутри некоторых звезд имеются две-три области, намагниченные в разной степени и в разном направлении, соответственно, на поверхности наблюдается четыре–шесть магнитных полюсов. Доля звезд с такими сложными структурами составляет более 13% [2]. Общие свойства этих звезд изучались нами ранее, но в данном исследовании задача состоит в рассмотрении конкретно внутренних и поверхностных структур этих звезд. Большое разнообразие структур магнитного поля

позволяет предполагать, что в начальных фазах формирования магнитных звезд поле у них было неоднородное и запутанное, как в протозвездных облаках. Несомненно, значительную роль в нарушении магнитных структур играет также аккреция на стадиях эволюции до главной последовательности. Наличие сложных структур показывает, что к настоящему времени полная релаксация магнитных полей у изучаемых звезд еще не успела завершиться. Рассматриваемая проблема интересна также с точки зрения исследования возможности генерации поля динамо механизмом. Наличие многодипольных структур противоречит простому предположению, что при формировании звезды напряженность магнитного поля будет сильнее в центре звезды, где плотность больше.

2. HD 32633 (Si⁺)

Эта звезда впервые исследована нами в работах [3, 4]. Для дальнейшего рассмотрения мы приводим карту распределения магнитного поля по

*E-mail: glagol@sao.ru

Таблица 1. Параметры магнитного поля исследованных звезд

HD	B_s , G	N	Заряд монополя	Δa , R_*	λ , deg	δ , deg	Δl , R_*	R/R_z	HD	B_s , G	N	Заряд монополя	Δa , R_*	λ , deg	δ , deg	Δl , R_*	R/R_z
32633	8205	1	-1.00	0.2	42	25	0.60	1.8	137909	5620	1	-1	0.182	322	-6.4	0.06	1.7
		2	+1.00	0.2	70	-25					2	+1	0.182	341	0		
		3	-0.06	0.3	165	0	0.20				3	-1	0.182	195	5.55	0.09	
		4	+0.06	-0.1	170	0					4	+1	0.182	217	0		
35502	6500:	1	-1	0.1 :	0:	10:	0.14:	1.1	149438	828	1	-0.38	0.4	355	-5	0.54	1.0
		2	+1	0.1 :	90:	-10:	0.14:				2	+0.38	0.4	80	+5		
		3	-1	0.1 :	180:	10:	0.14:				3	-1.00	0.4	143	-5	0.30	
		4	+1	0.1 :	270:	-10:	0.14:				4	+1.00	0.4	185	0		
37776	3760	1	+1	0.5	355	+2	0.42	1.1	182255	<100	1	+1	0.2	38	0?	-	1.1
		2	-1	0.5	55	0					2	-1	0.2	108	0?	-	
		3	+1	0.5	145	+5	0.35				3	+1	0.2	188	0?	-	
		4	-1	0.5	185	+3					4	-1	0.2	322	0?	-	
		5	+1	0.5	255	0	0.22										
		6	-1	0.5	280	+15											
45583	4990	1	-1	0.1	0	32	0.33	1.4	223640	1025	1	+1.00	0.1	35	38	0.24	1.1
		2	+1	0.1	90	-9					2	-1.00	0.1	240	-38		
		3	-1	0.1	180	2	0.16				3	+0.11	0.6	255	0	0.5	
		4	+1	0.1	273	-9					4	-0.11	-0.4	275	0		
137509	2967	1	+1	0.1	95	20	0.16	1.3	343872	3717	1	+1.00	0.1	315	+26	0.60	2.5
		2	-1	0.1	190	0					2	-1.00	0.1	200	-26		
		3	+1	0.1	275	-17	0.16				3	+0.10	0.6	120	0	0.32	
		4	-1	0.1	365	0					4	-0.10	0.4	90	0		

поверхности и схему распределения магнитных диполей, как она видна со стороны полюса вращения (Рис. 1 и 2).

Основные параметры приведены в Таблице 1, где даны среднее поверхностное магнитное поле $B_s = (B_s(\max) + B_s(\min))/2$, номер монополя, смещение монополей из центра звезды Δa в единицах радиуса, широта λ и долгота δ монополя и расстояние между монополями Δl в единицах радиуса звезды. Величина R/R_z — относительный радиус звезды, где R_z — ее радиус на начальной главной последовательности. Эти данные показывают расположение и ориентацию диполей внутри звезды, а R/R_z дает представление о возрасте звезды. Из данных Таблицы 1 видно, что магнитное поле фор-

мируется двумя диполями. Более сильный диполь (примем для него магнитный заряд $q = 1$) наклонен на значительный угол к оси вращения $\beta = 65^\circ$, а второй (магнитный заряд относительно сильного диполя $q = 0.07$) — на $\beta = 90^\circ$. Центр сильного магнитного диполя расположен в плоскости экватора вращения. Такая конфигурация приводит к примерно симметричному относительно экватора вращения распределению магнитных полюсов. Этот результат важен для теории формирования магнитных полей СР-звезд. Обращают на себя внимание большие величины Δl . Расстояния монополей от центра также значительны, они больше чем радиус конвективного ядра. Следует отметить, что сильное смещение диполей Δa у HD 32633 из центра сделано только для того, чтобы “ступень-

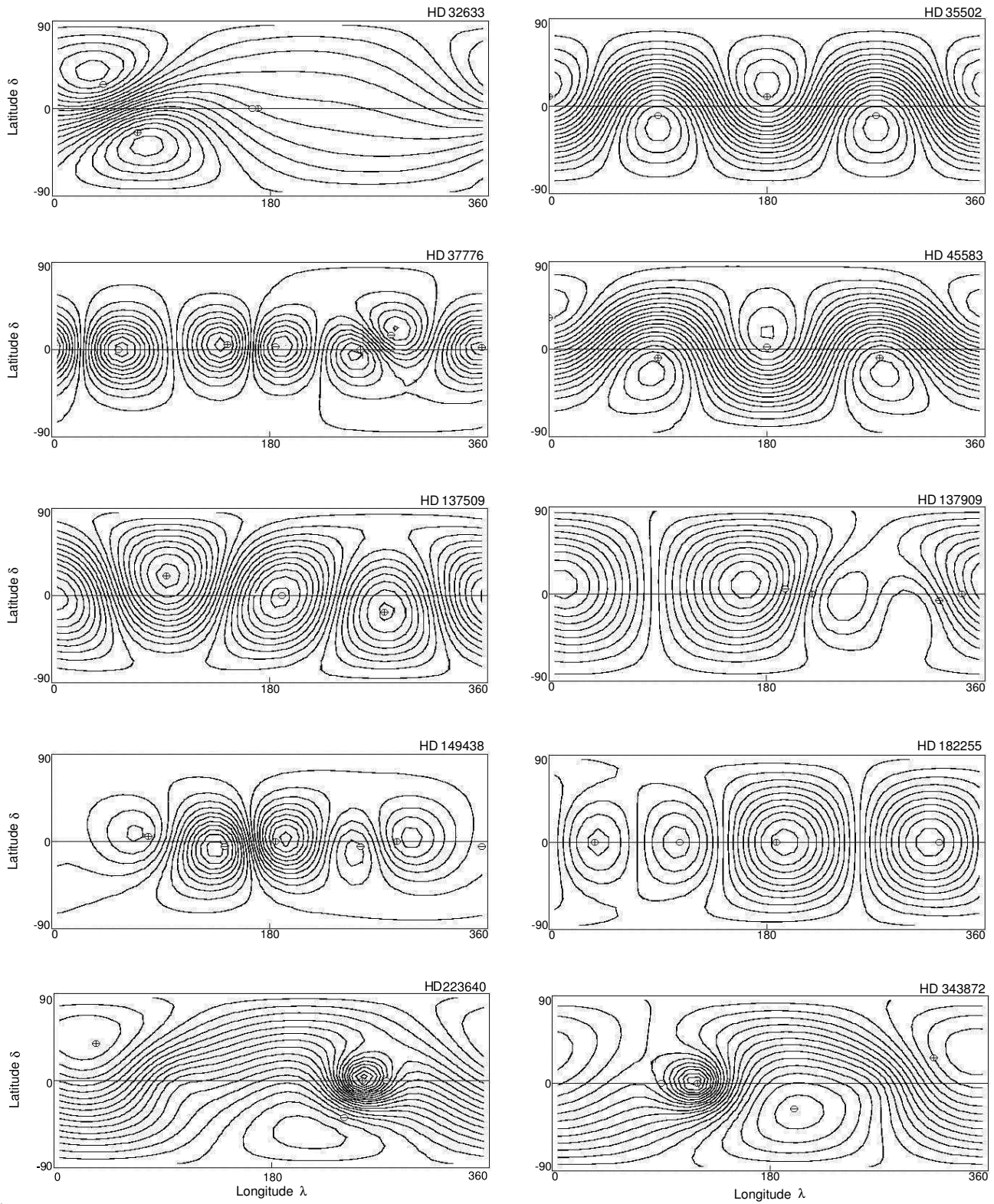


Рис. 1. Меркаторские карты распределения магнитного поля по поверхности.

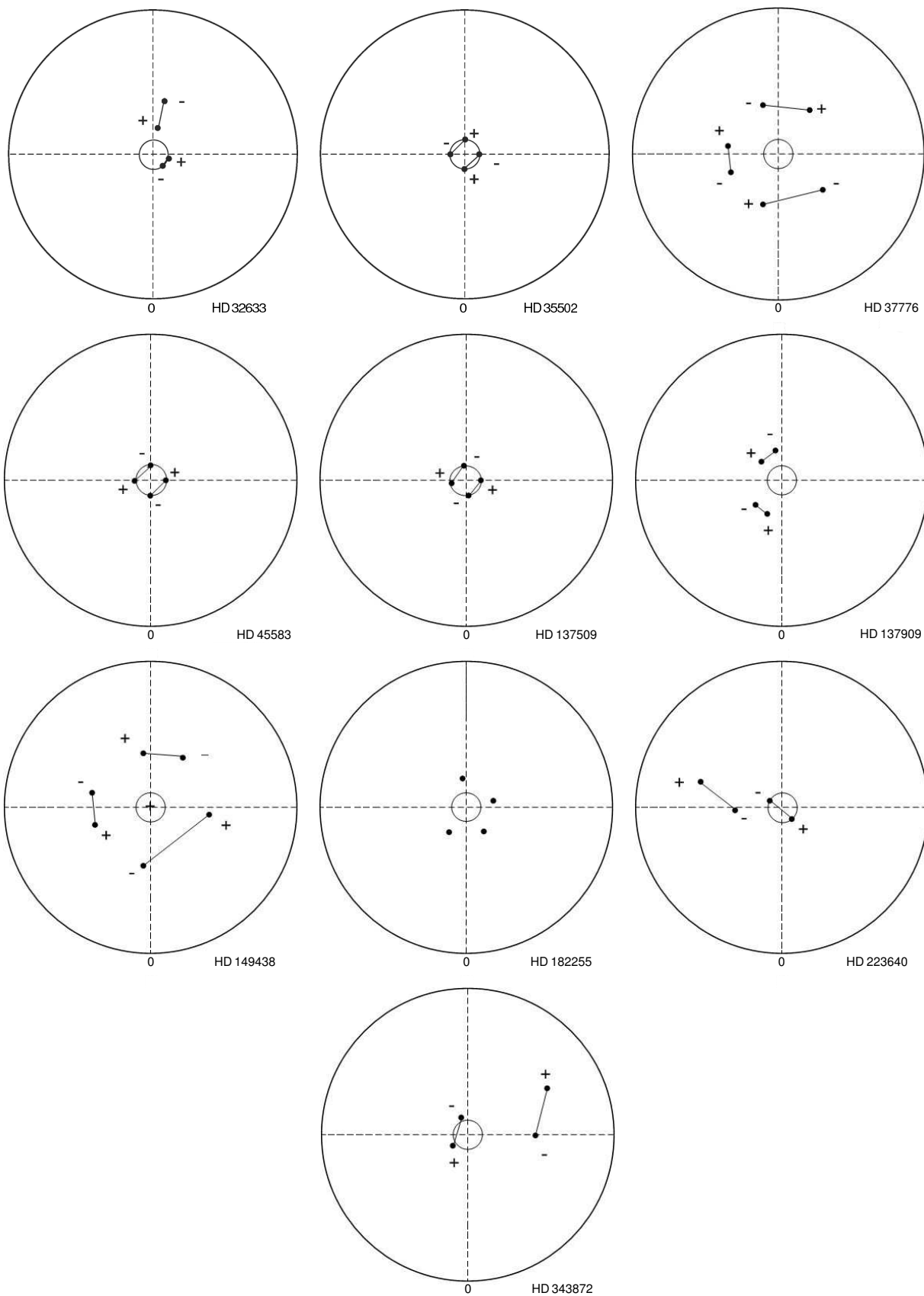


Рис. 2. Схемы распределения магнитных диполей внутри звезд. Вид со стороны оси вращения. Круг в центре звезды — конвективное ядро.

ка” на кривой изменения поля с фазой вращения $\varphi = 0.6-0.7$ описывалась точнее. Чем ближе диполи к центру звезды, тем сильнее ступенька сглаживается. Величина Δa не является критичной в моделях, и она носит приближенный характер. В то же время распределение диполей по азимуту и угол наклона их оси к оси вращения являются более определенными и хорошо характеризуют структуру магнитного поля.

Особое замечание состоит в том, что в многодипольных моделях результат зависит от большего числа параметров, чем в однодипольных, и в небольших пределах можно получить величины параметров, несколько отличающиеся друг от друга. Но характер расположения диполей остается во всех вариантах прежним. Это можно видеть, сравнив Рис. 1 и параметры из Таблицы 1 с данными из работ [3, 5]. Координаты монополей внутри звезды соответствуют координатам магнитных полюсов на меркаторской карте только в моделях центрально-го диполя, в многодипольных моделях они разные.

Поле звезды HD 32633 было измерено также точным LSD-методом [6], но из-за недостаточного количества измерений в некоторых фазах периода невозможно уточнить фазовую зависимость, используемую нами здесь.

Можно говорить, что магнитная структура HD 32633 формируется двумя диполями, смещенными относительно друг друга, но можно условно сказать, что магнитное поле формируется “искаженным” квадруполем.

3. HD 35502 (He-w)

Магнитное поле этой звезды изучено плохо, поэтому результаты моделирования имеют предварительный характер [7]. Звезда находится вблизи ZAMS, т.к. у нее $R/R_z = 0.9$, а в линии Ha наблюдается эмиссия, что позволяет ее отнести к типу post-Ae/Be Хербига, у которых обычно наблюдается рост магнитного поля [8] со временем. Продольное магнитное поле B_e изменяется от 0 до 5000 Гс. По характеру его изменения и изменению интенсивностей линий химических элементов можно подозревать наличие четырех магнитных полюсов. По имеющимся данным мы не можем точно оценить величину Δa , она принята равной $\Delta a = 0.1$ (на границе предполагаемого конвективного ядра) для всех монополей, и для них принят одинаковый заряд. При таких предположениях сделана оценка порядка величины среднего поверхностного магнитного поля (Рис. 1, Таблица 1). Таким образом, источником поля является “правильный” квадруполь.

4. HD 37776 (He-r)

Измерения продольного магнитного поля B_e , выполненные по линии водорода H β , взяты из работы [9]. Впервые эта звезда была промоделирована нами в [10], где было установлено, что она содержит шесть магнитных полюсов, образуемых тремя диполями, находящимися близко к плоскости экватора вращения. Они создают на поверхности сложное распределение магнитного поля. Однако в этой работе использован неверный, как оказалось, угол наклона звезды к лучу зрения $i = 90^\circ$ и поверхностное поле $B_s \sim 30$ кГс [11]. В работе [12] показано, что существует статистическая зависимость $B_s \approx 6.4 \langle B_e \rangle$, где $\langle B_e \rangle$ — среднеквадратичное продольное магнитное поле. Поскольку для этой звезды $\langle B_e \rangle \approx 800-1000$ Гс, то B_s никак не может быть 30 кГс.

В настоящем исследовании был использован угол $i = 45^\circ$, оцененный в работе [13]. Попытка моделирования с двумя диполями была предпринята в [9], но более точно фазовая зависимость продольного поля $B_e(\varphi)$ описывается трехдипольной моделью. Количество диполей у HD 37776 уникально, и это пока вторая звезда, известная нам, с такой сложной магнитной структурой (другая — это HD 149438, см. далее).

Прежде всего следует сделать следующее замечание. Магнитная конфигурация сложная, и полученные модельные параметры вряд ли надежны, как в случаях простой геометрии [14]. Все полученные параметры могут содержать ошибки, связанные с тем, что измерения B_e искажены. На видимом полушарии всегда находятся области с магнитным полем разного знака, и в каждой фазе периода спектральные линии содержат зеemannовские смещения тоже противоположного знака, которые невозможно учесть. Фазовая зависимость, естественно, усложняется. Характерным признаком этого является резкое увеличение B_e в фазе $\varphi = 0$. Наблюдаемый пик никак не может возникнуть в узком диапазоне фаз, потому что участок поверхности звезды с таким большим полем виден в течение половины периода вращения. Это явный эффект переналожения зеemannовских компонент, смещенных вращением. Оказалось трудно подобрать параметры так, чтобы описать довольно крутые (быстрые) изменения магнитного поля на фазовой зависимости. Для преодоления этой трудности пришлось увеличивать смещения диполей из центра звезды до $\Delta a = 0.5 R_*$. Без такого смещения диполей вычисленная фазовая зависимость “выравнивается.”

Характерным свойством данной конфигурации поля является то, что получается два решения: 1) диполи расположены радиально и 2) диполи

перпендикулярны радиусам, причем в обоих случаях диполи лежат практически в плоскости экватора вращения. Оба варианта решения хорошо представляют наблюдаемую фазовую зависимость и приводят к примерно одинаковому среднему поверхностному магнитному полю. Средняя величина B_s в первом случае равна 3813 Гс, а во втором — 3760 Гс. Но магнитные полюса на поверхности в первом случае получаются одного знака, что никогда не наблюдается. Поэтому принят второй вариант. На Рис. 1 и в Таблице 1 приведены результаты второй модели. Величины магнитных зарядов приняты одинаковыми.

В Таблице 1 указано расстояние между монополями Δl (в долях радиуса звезды). Они значительны, и это показывает, что наблюдаются широкие намагниченные области. Их величина зависит от Δa . Некоторые монополи находятся не точно в плоскости экватора, однако это может быть реликтом имевшей место неоднородности магнитного поля в прошлом. Характер распределения диполей не имеет ничего общего с квадруполем, наблюдаемым у других звезд.

5. HD 45583 (Si)

Эта звезда была исследована нами в [15]. К сожалению, в этой работе была получена неправдоподобно большая величина поля на положительном полюсе. В данной работе была сделана новая попытка получить модель, в результате чего был найден новый вариант модели, и удалось получить величины магнитного поля на полюсах, более похожие на реальные. При этом отклонения измеренных величин поля от модельной зависимости уменьшились. В результате новых расчетов оба диполя оказались расположены на $\Delta a = 0.1$, при этом уменьшилась величина Δl . Максимальная напряженность поля на отрицательном полюсе оказалась равной $B_p = -9878$ Гс на фазе $\varphi = 0.5$, а среднее поверхностное поле $B_s = 4990$ Гс. Характер распределения магнитных зарядов такой же, как у HD 35502 и HD 137509, т. е. оно похоже на квадрупольное. Интересно, что плоскость, в которой размещены магнитные заряды, наклонена к плоскости экватора вращения примерно на угол 10° . Распределение поля по поверхности и схема расположения диполей приведены на Рис. 1 и 2.

6. HD 137509 (SiSrCrEu)

Измерения B_e взяты из работ [16–18]. Период вращения $P = 4^d 4920$ приведен в [18], радиус звезды $R = 3.21 R_\odot$ взят из [19], $v \sin i = 28.1$ км/с из [20]. На основании этих данных угол наклона оси вращения $i = 51^\circ$. Параметры полученной

модели приведены в Таблице 1, а схема расположения диполей — на Рис. 2. В центре звезды находятся два диполя с одинаковыми зарядами. По азимуту монополи распределены равномерно, на расстоянии порядка 90° , что обеспечивает положение среднего слабого максимума $B_e(\varphi)$ на равном расстоянии от соседних сильных максимумов, как у HD 45583. Из меркаторской карты видно, что монополи лежат в плоскости, наклоненной к плоскости экватора вращения под углом примерно $10\text{--}12^\circ$, как у HD 45583. Максимальное поле $B_p = 4226$ Гс приходится на $\varphi = 0.25$, а среднее поверхностное поле $B_s = 2164$ Гс. Поле формируется “правильным” квадруполем.

7. HD 137909 (SrCrEu)

Двухдипольная модель магнитного поля была нами исследована в работе [21], затем более подробно изучена в [14]. Параметры модели приведены в Таблице 1, меркаторская карта и схема расположения монополей — на Рис. 1 и 2. Результат моделирования показывает, что середины диполей находятся в плоскости экватора вращения, а их оси направлены под углом $\beta = 75^\circ$ и 70° к оси вращения, причем монополи отстоят от центра звезды на одинаковом расстоянии, равном $\Delta a = 0.182 R_*$. Особенности распределения магнитного поля по поверхности определяются тем, что диполи смещены в одну сторону от центра звезды, по азимуту их положение различается на 125° . Моделирование осложняется тем, что звезда наклонена к наблюдателю под очень малым углом $i = 5.9^\circ$, что уменьшает надежность результата. Характерной особенностью является то, что один (сильный) диполь, монополи которого расположены близко друг другу, образует на карте две основные области с сильным магнитным полем противоположного знака, другой диполь создает две области со слабым полем. Магнитные заряды всех монополей одинаковы, поэтому сила поля на поверхности зависит только от расстояния между монополями. Чем монополи ближе друг другу, тем поле на поверхности сильнее. По принятой выше классификации поле формируется “искаженным” квадруполем.

8. HD 149438 (O-звезда)

Звезда интересна тем, что ее температура выше температуры обычных химически peculiарных звезд. Ее температура $T_e = 30000$ К, $\log g = 4.5$, $R = 5.2 R_\odot$, $i = 70^\circ$, возраст 10^6 лет [22]. Интересно, что при столь малом возрасте полная релаксация магнитного поля еще не могла завершиться, и можно ожидать, что мы видим структуру, характерную для ранних стадий эволюции магнитных звезд,

(с точки зрения гипотезы реликтового магнитного поля). Модель строилась в двух вариантах.

Фазовая зависимость поля имеет два максимума: на $\varphi = 0.15$ и $\varphi = 0.65$, кроме того, на $\varphi = 0.75$ можно заметить наложение слабого максимума. Очевидно, что структура формируется тремя магнитными диполями (как у HD 37776), причем магнитные заряды их разные. Сначала строилась простейшая модель, состоящая из двух диполей. Оказалось, что фазовую зависимость можно удовлетворительно описать двумя диполями: одним центральным и вторым, смещенным на $\Delta a = 0.2 R_*$. Но отклонение наблюдаемых величин от модельных во многих фазах превышает 3σ . Поэтому была сделана попытка моделирования при предположении трех диполей на разной долготе. Хорошее согласие с наблюдениями получается при предположении, что диполи направлены по радиусам, причем во всех случаях отрицательные заряды направлены к центру. Все диполи лежат в плоскости экватора вращения на расстоянии порядка $\Delta a = 0.3-0.4$ от центра. При уменьшении расстояния фазовая кривая сглаживается. Наблюдаемые величины B_e отклоняются от модельной зависимости в пределах 3σ . В этом варианте на поверхности оказываются три магнитных полюса одинакового знака. Кроме того, при смещении диполей к центру звезды никакой зависимости не получается. То же самое мы наблюдали при моделировании HD 37776.

Такая схема распределения магнитных диполей не согласуется с моделями, полученными до сих пор, у которых на поверхности обязательно присутствуют и положительные, и отрицательные магнитные полюса. Поэтому была построена еще одна модель такого же типа методом последовательных приближений. Ее параметры приведены в Таблице 1. Измеренные величины B_e , кроме двух точек, отклоняются от модельной зависимости в пределах 3σ . Расположение диполей внутри звезды показано на Рис. 2. Отношения магнитных зарядов равны $1 : 0.64 : 0.38$, т. е., как у большинства звезд, виден основной сильный диполь, образующий на меркаторской карте два магнитных полюса максимальной напряженности. Остальные полюса более слабые. Таким образом, по количеству диполей и по характеру их расположения звезда HD 149438 похожа на HD 37776, но карты распределения магнитного поля немного различаются, потому что основной диполь у нее очень сильный. Обе звезды находятся вблизи ZAMS и имеют высокую температуру. У обеих диполи имеют большие величины Δl , т. е. отклонения внутренней структуры от “дипольности” велики.

9. HD 182255 (He-w)

У звезды не удалось обнаружить магнитное поле ($B_e \leq 100$ Гс), однако химические элементы на ее поверхности сконцентрированы в четырех пятнах, как у других звезд с сильным полем двухдипольной структуры [23]. Долгота пятен приведена в Таблице 1. На Рис. 2 нанесено предполагаемое положение монополей, расположенных по азимуту на тех же углах λ , что и пятна химсостава. Величина $\Delta a = 0.2$ принята как наиболее часто встречающаяся. Магнитные заряды обоих диполей приняты одинаковыми из расчета, что $B_e = 100$ Гс. Все монополи помещены в плоскости экватора, т. е. $\delta = 0$. Полученная при таких условиях меркаторская карта показана на Рис 1. Первое, что бросается в глаза, это то, что, несмотря на одинаковые заряды диполей, на поверхности выделяются области с сильным и слабым полем. Различие объясняется их взаимным влиянием: чем ближе монополи друг к другу по азимуту, тем сильнее вызываемое ими поле на поверхности. Схема расположения диполей похожа на HD 35502 и HD 137509. Звезда расположена вблизи ZAMS, что и может быть причиной слабости магнитного поля. Поле формируется “искаженным” квадруполем.

10. HD 223640 (Si)

Измерения магнитного поля B_e выполнены в работе [24]. В этой же работе сделана оценка угла наклона оси вращения звезды $i = 61^\circ$, необходимая для моделирования. Форма фазовой зависимости $B_e(\varphi)$ отличается тем, что положительный максимум очень сильный по сравнению с отрицательным. “Горб” в фазе $\varphi = 0.75-0.80$ на восходящей части зависимости показывает, что ее описать может только двухдипольная модель, как у HD 32633. Расчет показал, что сильный диполь расположен под очень большим углом к оси вращения ($\beta = 60^\circ$), другой находится в плоскости экватора вращения. Меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности приведена на Рис. 1. Сильный диполь расположен почти в центре звезды, второй — более слабый — расположен вдоль радиуса звезды и находится на расстоянии $\Delta a = 0.5$ от центра. В данном случае это расстояние зависит от формы ступеньки на $\varphi = 0.75$, причем если сдвигать диполь к центру звезды, ступенька на этой фазе исчезает. Схема расположения монополей приведена на Рис. 2. Таким образом, схема расположения диполей похожа на HD 32633, HD 45583, HD 137909 и HD 343872. Поле формируется “искаженным” квадруполем.

11. HD 343872 (Si)

Измерения продольного поля в разных фазах периода выполнены в работе [25]. Величины $v \sin i = 18$ км/с, период вращения $P = 8^d 8$, температура звезды $T_e = 10500$ К, $\log g = 3.1$ взяты из [26]. Используя их, получаем $R = 5 R_\odot$ и $i = 40^\circ$. Моделирование показывает, что сильный магнитный диполь находится близко к центру звезды, слабый — на расстоянии $\Delta a = 0.5$ от центра. Наклон оси сильного диполя к оси вращения $\beta = 65^\circ$, слабый диполь расположен в плоскости экватора. Меркаторская карта и схема расположения диполей приведены на Рис. 1 и 2. Распределение магнитного поля по поверхности HD 343872 похоже на распределение у HD 223640, хотя первая звезда находится вблизи ZAMS ($t = 10^7$ лет), а вторая находится в верхней части главной последовательности ($t = 1.5 \times 10^8$ лет). Это свидетельствует о том, что изменение структуры поля маскируется большим многообразием структур и величин поля. Поле формируется “искаженным” квадруполем.

12. ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на небольшое пока количество исследованных звезд с многодипольными структурами поля, можно сделать некоторые предварительные выводы.

1) С точки зрения реликтовой гипотезы возникновения магнитного поля большое разнообразие структур и величин магнитного поля позволяет предположить, что в начальных фазах формирования магнитных звезд поле у них было запутанное, неоднородное. Это частично могло быть следствием сложной структуры протозвездных облаков, частично следствием нестационарных процессов при коллапсе и, вероятно, следствием последующих аккреционных воздействий. Очевидно, что полная релаксация магнитных полей таких звезд еще не завершилась. Среди исследованных нами 60 звезд нет одинаковых структур и величин магнитных полей, есть похожие.

2) Время жизни звезд с гелиевыми аномалиями на главной последовательности существенно меньше времени жизни SrCrEu-звезд, поэтому можно было бы ожидать, что структуры их полей еще не успели одинаково релаксировать. Следовательно, у гелиевых звезд поле в среднем должно быть сложнее. Мерой сложности поля могут быть средние отклонения диполя от центра звезды Δa , приведенные в Таблице 2. В ней указаны средние величины Δa и число звезд (в скобках). Данные взяты из работы [8]. Несмотря на то, что изменение Δa идет в ожидаемом направлении, величина

Таблица 2. Средние значения Δa для звезд разных типов

He-г + He-w	Si	SrCrEu
0.16 ± 0.07 (14)	0.15 ± 0.02 (17)	0.12 ± 0.01 (32)

изменения находится в пределах ошибок. Величина n — количество использованных звезд. Можно показать также, что нет зависимости Δa от R/R_z , т. е. звезда может находиться на любом расстоянии от ZAMS но изменения Δa незаметны. Это говорит о том, что скорость релаксации наблюдаемых крупных магнитных конфигураций сравнима с временем омической диссипации магнитного поля, т.е. $\tau \geq 10^9$ лет [8]. Очевидно, что ожидаемое изменение крупномасштабной структуры поля с возрастом теряется на фоне большого разнообразия структур, зависящих от начальных условий. Сложная структура встречается у звезд, находящихся на ZAMS и уходящих с главной последовательности. Тем не менее, в Таблице 1 половина звезд находится вблизи ZAMS ($R/R_z = 1.0-1.1$). В результате квадратичной зависимости времени жизни магнитных структур от их характерных размеров крупномасштабные конфигурации могут существовать в течение времени, сравнимого с временем жизни магнитного поля звезды, т.е. $\tau \geq 10^9$ лет.

3) Одно из общих свойств многодипольных звезд состоит в том, что середины диполей находятся преимущественно в плоскости экватора вращения. Они расположены несимметрично относительно центра звезды, по долготе между ними угол часто меньше 180° , а оси диполей образуют с осью вращения большие и разные углы (хорошо известная ортогональность осей диполей к оси вращения у всех магнитных звезд). Такое многообразие форм скорее является следствием случайных процессов, чем результатом действия какого-либо механизма, например следствием слияния с компонентом [27]. С другой стороны, преимущественная ортогональность к оси вращения и симметрия магнитных полюсов относительно экватора вращения могут указывать на наличие какого-то механизма.

4) У большинства исследованных объектов магнитные диполи (т. е. области с максимальным полем) смещены из центра звезды на расстояние, превышающее радиус конвективного ядра (примерно $0.1 R_*$). Это обстоятельство может служить признаком того, что полоидальное поле несовместимо с конвективным ядром и не генерируется в нем. В связи с этим интересна проблема взаимодействия поля и нестационарного ядра. На поверхности магнитных звезд поле, как известно,

подавляет всякую турбуленцию, в результате чего происходит диффузия химических элементов. Может ли конвективное ядро у магнитных звезд быть менее активным, чем у нормальных звезд? Это самостоятельная проблема.

5) Обращают на себя внимание большие расстояния между монополями, сравнимые с радиусом звезд. Это может служить признаком того, что внутри звезд структура поля несколько отличается от дипольной, т. е. диполь — это некоторый сильно намагниченный объем внутри звезды, как намагниченный стержень.

6) Большое количество многодипольных звезд составляет большую проблему тороидально-полоидальной гипотезы [28] и любой гипотезы динамо. В пользу последней имеются только два фактора — это расположение центров диполей преимущественно в плоскости экватора вращения и наличие нескольких звезд с квадрупольной структурой. Обнаружение у восьми из десяти звезд квадрупольной структуры поля наводит на мысль о некотором механизме, который ее создает.

7) Среди изученных звезд нет таких, у которых существуют симметричные магнитные структуры. Всегда имеются сильные области и слабые. Это свойство также является признаком случайных процессов, приводящих к сложным структурам магнитного поля. Важным свойством для теории формирования магнитных структур является то, что и второй диполь часто находится в плоскости экватора вращения.

8) Используемая методика исследования геометрии магнитного поля у многодипольных объектов позволяет получить предварительное представление о характере распределения диполей внутри звезд, их азимут и положение относительно плоскости экватора, угол между осью вращения и осью диполя, величину среднего поверхностного магнитного поля и напряженность поля на полюсах. Методика моделирования не позволяет получить достаточно надежные величины отклонения диполей от центра звезды и величины расстояний между монополями. Ясно, однако, что во многих случаях они сравнимы с радиусом звезды и что они избегают конвективное ядро. Сложность структур поля и неравномерное распределение химических элементов вносят основной вклад в искажение используемых фазовых зависимостей.

9) Наличие многодипольных структур противоречит простому предположению, что при формировании звезды напряженность магнитного поля будет сильнее в центре звезды, где плотность больше.

10) Полученные результаты показывают, что необходим глубокий теоретический анализ най-

денных свойств магнитного поля СР-звезд. Используемый в данной работе метод магнитных диполей наряду с применяющимися дипольно-квадрупольным или дипольно-квадрупольно-октупольным методами позволит получить дополнительные данные об истинной природе и свойствах магнитных полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 25 (2003).
2. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **66**, 144 (2011).
3. Yu. V. Glagolevskij, E. Gerth, *Astrophysical Bulletin* **63**, 259 (2008).
4. Yu. V. Glagolevskij, *Astronomy Reports* **57**, 56 (2013).
5. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **55**, 334 (2012).
6. G. A. Wade, J.-F. Donati, J. D. Landstreet, and S. L. S. Shorlin, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **313**, 851 (2000).
7. Yu. V. Glagolevskij, G. A. Chountonov, A. V. Shavrina, and Ya. V. Pavlenko, *Astrophysics* **53**, 133 (2010).
8. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56**, 189 (2013).
9. I. B. Thompson and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **289**, L9 (1985).
10. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *ASP Conf. Ser.* **248**, 337 (2001).
11. I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, D. O. Kudryavtsev, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 93 (1997).
12. Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, N. M. Chunakova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **23**, 37 (1986).
13. O. Kochukhov, A. Lundin, I. Romanyuk, and D. Kudryavtsev, *Astrophys. J.* **726**, 24 (2011).
14. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68**, 78 (2013).
15. Yu. V. Glagolevskij, E. Gerth, *Astrophysics* **52**, 112 (2009).
16. D. A. Bohlender, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson, *Astronom. and Astrophys.* **269**, 355 (1993).
17. G. Mathys and S. Hubrig, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **124**, 475 (1997).
18. G. Mathys, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **108**, 547 (1994).
19. M. Briquet, S. Hubrig, P. De Cat, et al., *Astronom. and Astrophys.* **466**, 269 (2007).
20. G. Mathys, *Astronom. and Astrophys.* **293**, 746 (1995).
21. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, in *Proc. Int. Conf. on Magnetic Stars* (Nizhnii Arkhyz, 2004), p. 142.
22. J.-F. Donati, I. D. Howarth, M. M. Jardine, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **370**, 629 (2006).

23. Yu. V. Glagolevskij, A. V. Shavrina, and G. A. Chountonov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 161 (2011).
24. P. North, D. N. Brow, and J. D. Landstreet, *Astronom. and Astrophys.* **258**, 389 (1992).
25. V. G. Elkin, D. O. Kudryavtsev, and I. I. Romanyuk, *Astronomy Letters* **28**, 169 (2002).
26. R. Croll, *Astron. Gesellschaft Abstract Ser.* **7**, 130 (1992).
27. A. V. Tutukov and A. V. Fedorova, *Astronomy Reports* **54**, 808 (2010).
28. J. Braitwaite and A. Nordlund, *Astronom. and Astrophys.* **450**, 1077 (2006).

Features of Multi-Dipole Magnetic Field Structures in CP Stars

Yu. V. Glagolevskij

Ten of the sixty investigated magnetic stars have two- or three-dipole structures. From the viewpoint of the relic hypothesis a wide variety of magnetic field structures and strengths allows to assume that in the initial phases of formation of magnetic stars, their fields were even more entangled and heterogeneous than now. This may be due to the complex structure of protostellar clouds, the consequence of non-stationary processes during the collapse, and, probably, the result of subsequent accretion interactions. The expected variation of the large-scale structure with age is lost at the background of a wide variety of structures, depending on the initial conditions. Complex structures occur both in the stars at ZAMS, and in the stars leaving the Main Sequence. As a result of quadratic dependence of the magnetic structure lifetime on their characteristic dimensions, large-scale configurations can exist for times comparable to the lifetime of stellar magnetic field, i.e. $\tau \geq 10^9$ yrs. One of the common properties of multi-dipole stars is that the centers of the dipoles are predominantly located in the equatorial plane of rotation. In the majority of studied objects magnetic dipoles (i.e. the regions with the maximum field) are shifted from the center of the star by the distance greater than the radius of the convective core (approximately $0.1R_*$). This may indicate that the poloidal field is not compatible with the convective core and is not generated therein. Large distances between the monopoles, comparable to the radii of the stars are typical. This may be a sign indicating that inside the stars the field structure is slightly different from the dipole, what implies that the dipole is not a mathematical point, but rather some highly magnetized volume inside the star, comparable to a magnetized rod.

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