

УДК 524.35-337

СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ИЗБРАННЫХ ЗВЁЗД. III.

© 2016 Ю. В. Глаголевский*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 28 ноября 2014 года; принята в печать 9 ноября 2015 года

Приведены результаты моделирования примерно для сотни магнитных звезд. Показано, что дипольное представление структур магнитных полей достаточно хорошо объясняет распределение магнитного поля по поверхности звезд. Проанализированы некоторые закономерности, которые поддерживают реликтовую гипотезу формирования магнитного поля. Приведены доводы в пользу предположения, что основные свойства магнитных звезд — медленное вращение, преимущественная ориентация магнитных силовых линий вдоль плоскости экватора вращения, сложные внутренние структуры магнитных полей — приобретаются в стадии гравитационного коллапса. В нестационарной фазе Хаяши и в стадии молодой лучистой звезды для этого условий нет.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением исследований магнитных структур химически пекулярных (CP) звезд, опубликованных в [1, 2]. К настоящему времени методом магнитных диполей [3–7] построены модели магнитных полей около ста CP-звезд и изучены особенности внутреннего строения магнитных полей. Этого количества достаточно для уточнения некоторых важных статистических результатов исследования звезд данного типа. Многие авторы описывают распределение магнитного поля по поверхности звезд с помощью гармонических (шаровых) функций. Это дипольно-квадрупольные [8] или дипольно-квадрупольно-октупольные [9] структуры. Но такие конструкции являются математическими, описывающими распределение поля по поверхности без объяснения причин их формирования. Коэффициенты разложения не имеют физического смысла, хотя они и выражаются в гауссах. Любое поле можно разложить по мультиполям, первым членом всегда будет диполь, и чем больше вычислено гармоник, тем точнее описывается распределение поля по поверхности. Иногда форму фазовых кривых магнитного поля описывают синусоидами, что тоже не имеет физического смысла. Некоторый шаг вперед был сделан в работах [10–12], в которых на основании исследований поляризации в спектральных линиях определялось распределение магнитного поля по поверхности и параметры

магнитного поля. В дальнейшем эта методика неоднократно совершенствовалась. Но и она не позволяет судить о внутренних структурах магнитных полей. Характерный вид кривых изменения магнитного поля с фазой вращения привел Бэбкока [13] к предположению, что структуры поля звезд соответствуют структуре поля магнитного диполя. С нашей методикой магнитных диполей мы пытаемся в первом приближении исследовать внутреннюю структуру магнитных полей, а также распределение его по поверхности.

2. ОБЩИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ CP-ЗВЕЗД

В данном разделе изложены основные свойства магнитных полей химически пекулярных звезд, изученные преимущественно по результатам нашего моделирования. Первые результаты исследования магнитных полей пятидесяти звезд, полученные методикой магнитных диполей, были опубликованы в работе [14]. Было установлено, что структуры магнитных полей CP-звезд можно разделить на четыре типа: центральный диполь; диполь, смещенный вдоль своей оси; диполь, смещенный поперек своей оси; сложные структуры, состоящие из двух–трех диполей. Первые два типа хорошо изучены, например Престоном [15, 16], Ландстритом [17, 18] и другими. В работе [14] мы отметили, что внутренняя структура поля не вполне соответствует точному математическому диполю, у которого расстояние между магнитными

*E-mail: glagol@sao.ru

монополями должно быть $l \ll R_*$ (R_* — радиус звезды). Оказалось, что у реальных звезд $l \sim R_*$, т.е. существует отклонение наблюдаемой структуры поля от идеальной дипольной структуры. Точнее, распределение силовых линий в месте расположения предполагаемого диполя имеет вид силовых линий, похожих на стержневой магнит. Несомненно, процессы, пережитые звездами в прошлом, отражены в особенностях свойств магнитных полей, наблюдаемых в настоящее время. Исследование этих особенностей может помочь изучению ранних стадий эволюции магнитных звезд.

В этой работе мы анализируем результаты моделирования структур магнитного поля методом магнитных диполей [3–7], который раньше назывался методом магнитных зарядов. В нем заложена возможность использовать источник магнитного поля внутри звезды, а именно воображаемый магнитный диполь. Одно из главных свойств дипольных моделей состоит в том, что в месте нахождения диполя наблюдается максимальная напряженность поля. Принципиальное отличие нашего метода магнитных диполей от других состоит в том, что он позволяет приблизиться к пониманию внутренней структуры поля и, в результате, к распределению его по поверхности звезды. Наш подход дает достаточно близкий к наблюдаемому результат. Физический смысл дипольного приближения состоит в том, что можно получить точно дипольную структуру поля, задав внутри звезды соответствующий круговой ток. В таком случае мы получили бы дипольное поле в чистом виде. Известно, что теоретический диполь хорошо описывает структуру магнитного поля кругового тока. Силовые линии вморожены в вещество и являются остатком протозвездных магнитных полей, сжатых вместе с веществом в процессе коллапса. Электрические заряды в намагниченной звезде вращаются вдоль силовых линий по спиралям вплоть до следующего столкновения, но они магнитного поля не создают. К сожалению, теоретическое описание процесса формирования дипольного магнитного поля у протозвезды невозможно вследствие сложности уравнений.

К настоящему времени нами изучены модели около ста магнитных звезд. Оказалось, что во всех случаях измеренные величины поля в разных фазах периода вращения отличаются от модельных в пределах 3σ , даже если измерения получены с предельно высокой точностью ($\sigma = \pm 5$ Гс). Этот принципиальный результат показывает, что природа создает внутри звезд области с максимальной напряженностью поля, которые имеют структуру силовых линий близкую к той, какую имеет теоретический диполь, помещенный в этой области. Второй принципиальный результат состоит в том, что если известны обе фазовые зависимости —

эффективного магнитного поля $B_e(\Phi)$ и среднего поверхностного поля (mean magnetic field modulus) $B_s(\Phi)$, — то всегда удается получить параметры модели магнитного поля, удовлетворяющие обеим зависимостям. Этими двумя результатами обеспечивается уверенность в правильности модели и методики. Как говорилось выше, дипольное представление внутренних структур магнитного поля тоже является некоторым приближением, хотя и неплохим для настоящего времени. Силовые линии предполагаемого диполя исходят из сингулярных точек, которые мы принимаем за магнитные «монополи», но которых в реальности нет. Вместо теоретического точечного диполя наблюдается диполь со значительным расстоянием l между монополями. Тем не менее положение области максимальной напряженности и ориентации силовых линий в ней определяются надежно. Важным для теории наблюдательным результатом является то, что положение и ориентация диполей, т.е. сильно намагниченных областей внутри звезд, оказываются практически любыми, но с преимущественным направлением вдоль плоскости экватора вращения. Результат моделирования показывает также, что намагниченные фрагменты имеют форму, вытянутую по кругу [2].

В простейшем случае в звезде находится один общий магнитный диполь с магнитными зарядами $\pm Q$, расположенными на расстоянии l друг от друга, и дипольным моментом $P = Ql$. Величина l теоретически должна иметь атомные размеры, но в расчетах для удобства вычислений мы используем наименьшую величину $l = 0.01R_*$ без ухудшения точности. После нестационарной фазы Хаяши магнитные силовые линии оказываются сильно запутанными вследствие турбулентности звездного вещества. Турбулентция может концентрировать силовые линии в жгуты, слои, волокна, струи и т.д. Время затухания магнитного поля вследствие токовых джоулевых потерь определяется как $t = 4\pi \rho r^2$, где ρ — проводимость плазмы, а r — характерный размер намагниченной области [19]. Мелкие магнитные структуры в молодых звездах исчезают быстро; крупные, порядка радиуса звезды, живут 10^{10} – 10^{11} лет. В магнитных звездах главной последовательности остаются крупномасштабные магнитные поля дипольной структуры. В сложных, мелкомасштабных структурах поле «упрощается» также благодаря натяжению силовых линий. Натяжение силовой трубки поперечного сечения A происходит с силой $T = AH^2/4\pi$ [21]. Эти свойства звездных магнитных полей, по нашему мнению, являются фундаментальными. Мы придерживаемся того мнения, что дипольные магнитные структуры — наиболее стабильные [20], потому что любые другие, более сложные конфигурации неустойчивы (в соответствии с приведенными формулами),

они исчезают, и остаются только долгоживущие крупномасштабные полоидальные структуры. Это свойство магнитных полей хорошо проявляется на Солнце [19].

Структуры магнитных полей многих звезд можно описать двумя или тремя магнитными диполями. Диполи обычно различаются по величине заряда и ориентированы часто по-разному. Учитывая медленную релаксацию крупных магнитных структур, можно предположить, что запутанные после нестационарной фазы магнитные силовые линии могут обнаруживаться в течение длительного времени. Это хорошо заметно на росте дипольного поля магнитных звезд с возрастом [21, 22]. Практически в течение всей жизни магнитной звезды на главной последовательности магнитное поле имеет двухкомпонентную структуру, состоящую из глобальных дипольных структур и мелкомасштабных фракций $B = B_0 + \sum B_i$. Создается впечатление, что состояние магнитного поля после нестационарной фазы контролируется омическим затуханием глобальной дипольной структуры и омическим затуханием мелких структур. Второй, быстрый, процесс выравнивает, упорядочивает силовые линии, в результате чего продольное магнитное поле после выхода звезд на ZAMS растет.

В сложных мелкомасштабных структурах магнитных полей после нестационарной фазы могли возникнуть большие градиенты поля. Если градиенты велики, то велики должны быть и магнитные силы, а для их компенсации понадобились бы большие неоднородности давления и температуры в теле звезды. Реальное поле даже при очень малом отклонении от потенциального дипольного распределения дало бы мощное возмущение в распределении давления, плотности, температуры. Это проявилось бы на поверхности в виде неоднородностей физических условий. Но в настоящее время это не наблюдается. Во многих работах, в частности в [23, 24], показано, что в атмосферах магнитных звезд сохраняются нормальные условия возбуждения и ионизации, нет заметного нарушения термодинамического равновесия. Так что и вероятность того, что поля имеют какие-то большие градиенты, оказывается крайне малой. Наблюдаемая в настоящее время двухкомпонентная структура магнитных полей магнитных звезд без заметных температурных и других неоднородностей указывает на то, что существуют только небольшие градиенты поля. Несимметричная структура магнитных полей является признаком продолжающейся до сих пор релаксации магнитного поля. Уже давно установлено [25–27], что магнитные звезды представляют собой на главной последовательности «жесткие» однородные по физическим условиям ротаторы.

Таким образом, тот факт, что Ap-звезды имеют крупномасштабное дипольное поле, является од-

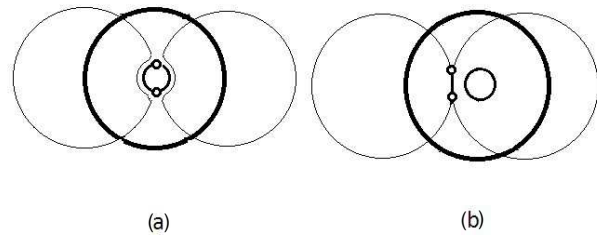


Рис. 1. Предполагаемые схемы силовых линий: (а) центральный диполь; (б) диполь, смещенный поперек оси.

ним из мощных аргументов в пользу реликтового характера магнитного поля. В течение длительного времени эволюции все недипольные, мелкомасштабные компоненты в нем уже исчезли вследствие джоулевых потерь, осталось в первом приближении только сильное потенциальное дипольное поле. К тому же надо учесть, что если поля дипольные, и пятен на звезде (в смысле вариаций плотности и температуры) нет, то мы имеем дело со старым объектом. Размеры магнитных звезд таковы, что в соответствии с приведенной выше формулой $t = 10^{10} - 10^{11}$ лет. В моделях с двух- и трехдипольными конфигурациями знаки зарядов чередуются, и не было случаев, когда два диполя внутри звезды были бы ориентированы одинаковыми знаками в одну сторону. Это интересная теоретическая проблема. Вероятно, в протозвездных облаках такие ситуации не встречаются вследствие их неустойчивости.

Крайне интересная проблема: каково может быть влияние конвективного ядра на внутреннюю структуру магнитного поля? На рис. 1а показана схема силовых линий при центральном диполе. Форма силовых линий — круг. Магнитные монополи находятся там, где сходятся силовые линии. Но очевидно, что силовые линии внутри звезды обходят ядро, конвекция выталкивает их наружу, поэтому возможно, что силовые линии сходятся в точках вне ядра. К сожалению, в случае центрального диполя величина l слабо влияет на форму силовых линий, и ее нельзя измерить. Сдвиг диполя вдоль его оси влияет на структуру поверхностного распределения очень сильно. Сила поля на полюсах и, соответственно, на полусферах оказывается разной. При диполе, смещенном поперек оси (рис. 1б), величина l измеряется достаточно надежно. В любом случае исследование внутренних структур поля проблематично из-за взаимодействия их с конвективным ядром, которое может приводить к большим смещениям Δa монополей от центра звезды. В случае двух диполей оба они оказываются типа «длинный диполь». Этот интересный факт необходимо исследовать подробно, но к настоящему времени моделирование не показало

каких-либо заметных признаков влияния турбулентного ядра на особенности внутренних структур магнитного поля.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР

Список около ста промоделированных магнитных звезд и характеристики их магнитных структур приведены в таблицах 1–4. В таблицах даны: номер звезды HD, тип пекулярности, знак монополя Q и его относительная величина, угол наклона оси вращения к лучу зрения i , угол наклона оси диполя к плоскости экватора вращения α , величина среднего поверхностного магнитного поля B_s и величина магнитного поля на полюсах B_p , величина смещения монополя от центра звезды Δa в единицах радиуса звезды, расстояние между монополями l в единицах радиуса звезды, в последнем столбце даны ссылки на источники данных. Звезды промоделированы по единой методике [3–7] с использованием фазовых зависимостей эффективно-го поля $B_e(\Phi)$ или/и среднего поверхностного поля $B_s(\Phi)$, взятых из литературы. Как уже говорилось, магнитные звезды можно по типу модели разделить на четыре группы:

- (1) сложные модели (с двумя или тремя диполями, смещенными поперек оси);
- (2) модели с одиночным диполем, смещенным поперек оси;
- (3) модели с одиночным диполем, смещенным вдоль его оси;
- (4) модели с диполем в центре звезды.

Модель центрального диполя соответствует случаям, когда $\Delta a < 0.05R_*$. По сравнению со списком средних поверхностных магнитных полей в работе [21] в приведенные таблицы добавлены новые объекты, уточнены данные для некоторых из них. В процессе вычислений параметры подбирались методом последовательных приближений до тех пор, пока модельные зависимости не станут отличаться от измеренных величин меньше чем на 3σ . Опыт моделирования показывает, что точность средних величин поверхностных магнитных полей B_s и полей на магнитных полюсах B_p находится в пределах 20%, если углы наклона звезд i были определены спектроскопически по величине $v \sin i$. К сожалению, величины i не всегда достаточно надежны. В тех случаях, когда моделирование делается по двум фазовым зависимостям $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$, точность B_s и B_p достигает 5%, потому что угол i не используется.

4. ЗВЕЗДЫ СО СЛОЖНЫМИ СТРУКТУРАМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Это наиболее интересные объекты среди магнитных звезд. Они содержат два–три диполя (таблица 1), причем диполи смещены поперек их оси. Этим свойством они близки звездам второй группы, у которых единичные диполи тоже смещены поперек их оси. Следует сразу оговориться, что существуют, по-видимому, объекты и с большим числом диполей, но вследствие измерения поля на половине видимого звездного диска мелкие магнитные детали усредняются. Данные о более мелких магнитных деталях можно получить только с помощью доплер-зеemanовского метода. Исходя из свойств дипольных моделей, делаем вывод, что в многодипольных звездах наблюдаются несколько областей с максимальной напряженностью поля внутри. Расстояния Δa отдельных монополей от центра звезды наша методика не позволяет определять с достаточной точностью, поэтому при моделировании они во многих случаях выбирались одинаковыми. Можно заметить только сильные различия величин Δa , например у звезд HD 36485 и HD 343872. Смещения монополей от центра иногда достигают большой величины, $\Delta a = 0.6R_*$. Наблюдаемые фазовые зависимости у звезд со сложной магнитной структурой быстро изменяются в разных фазах периода. Для того чтобы вычисленная зависимость следовала этим изменениям, приходится смещать диполи ближе к поверхности. В случае же их близкого расположения к центру возникает плавная, сглаженная зависимость, похожая на синусоиду.

Важнейший параметр l показывает, что области с максимальной напряженностью магнитного поля неточечные. Иногда мы называем такие области «длинным диполем». Реальное распределение силовых линий не соответствует строго теоретическому точечному диполю, для которого $l \ll R_*$. Это говорит о том, что внутри звезды распределение магнитного поля немного отличается от теоретического точечного диполя. Очевидно, что чем больше l , тем сильнее отклонение от идеальной дипольной структуры. Кроме того, если бы структура поля была близка к теоретической, то напряженность поля вдали от диполя изменялась бы с расстоянием по кубической зависимости, но реально она изменяется как $1/R^k$, где k находится между 2 и 3 [22].

У звезд со смещенным из центра диполем максимальная напряженность поля не совпадает с максимальной плотностью вещества в звезде. Это, в свою очередь, говорит о том, что величина поля в протозвездном облаке не пропорциональна плотности, в отличие от утверждения в работе [47]. Именно этим обстоятельством, вероятнее всего, определяется возникновение несимметричных структур магнитных полей в период коллапса

Таблица 1. Звезды со сложными структурами магнитного поля

HD	Тип	Q	i	α	B_s, G	Δa	l	Ref.	HD	Тип	Q	i	α	B_s, G	Δa	l	Ref.					
10783	Si+	+	35	25	2244	0.07	0.12	[2]	137509	Si	+1.00	51	20	2967	0.10	0.16	[29]					
		-				0.07					0.10											
		+				0					0.5				0.20			0.10	0.16			
		-				0.5					0.10											
32633	Si+	-1.00	84	25	12 000	0.60	0.60	[28]	137909	SrCrEu	-1.00	5.9	6	5620	0.18	0.06	[29]					
		+1.00				0.60					0.18											
		-0.45				0					0.60				0.20			0.18	0.09			
		+0.45				0.60					0.18											
35502	He-w	+1.00	45	10	6500 :	0.10	0.14 :	[29]	142301	He-w	+	30	3	6425	0.4	0.22	[31]					
		-1.00				0.10					0.4											
		+1.00				10					0.10				0.14 :			+	3	0.4	0.8 :	
		-1.00				0.10					0.4											
36485	He-r	+	12	5	5891	0.30	0.48	[1]	149438	O	-0.38	70	5	828	0.40	0.54	[29]					
		-				0.30					0.40											
		+				5					0.30				0.34			-1.00	5	0.40	0.30	
		-				0.17					0.40											
37776	He-r	+1.00	90	1	3760	0.50	0.42	[29]	152107	SrCrEu	+	50	7 :	4100 :	0.5	0.8 :	[32]					
		-1.00				0.50					0.5											
		+1.00				4					0.50				0.35			-	0.5			
		-1.00				0.50					0.5											
45583	Si	+1.00	40	35	4990	0.10	0.33	[29]	182255	He-w	+1.00	12	0 :	<100?	0.20	-	[29]					
		-1.00				0.10					0.20											
		+1.00				10					0.10				0.16			+1.00	0 :	0.20	-	
		-1.00				0.10					0.20											
49976	SrCrEu	-1.00	70	0	1359	0.10	0.20	[30]	223640	Si	+1.00	61	38	1025	0.4	0.24	[29]					
		+1.00				0.10					1.0				0.50							
		-0.58				0					0.30				0.10			-1.00	0	0.10	0.60	[29]
		+0.58				0.30					0.10											
343872	Si	+1.00	90	26	3717	0.10	0.60	[29]			+1.00	0		0.60	0.32							
		-1.00				0.10					0.40											
		+1.00				0.60					0.32											
		-1.00				0.40																

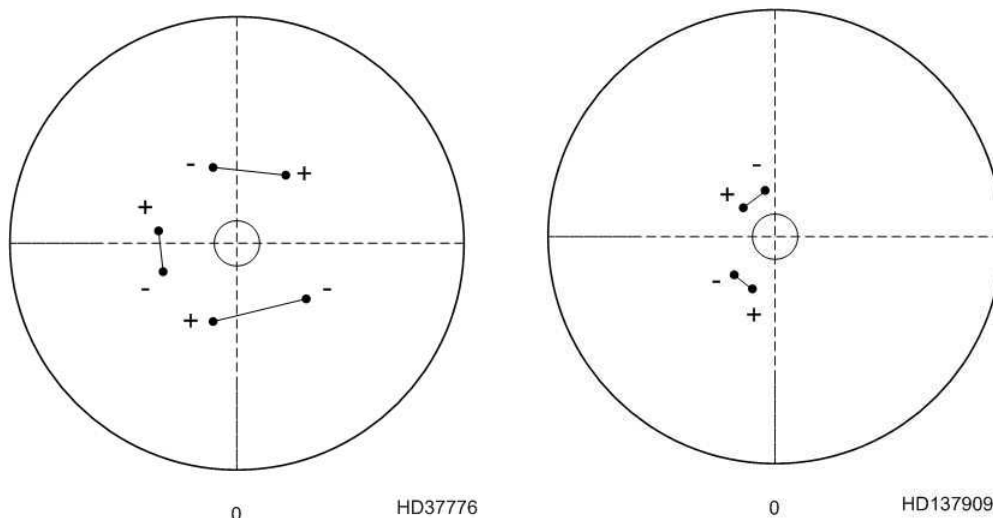


Рис. 2. Примеры расположения диполей в сложных структурах: трехдипольная структура звезды HD 37776 и двухдипольная структура звезды HD 137909.

намагниченных протозвездных облаков. В случае пропорциональности величины поля и плотности мы всегда получали бы модели центрального диполя. В принципе, можно придумать такую систему силовых линий, где максимум поля находится в центре звезды, а распределение по поверхности соответствует многодипольным моделям. Но такие искусственные сложные системы неустойчивы, и они быстро превратились бы в простые дипольные конфигурации. Все это указывает на то, что природа создала такие намагниченные фрагменты внутри магнитных звезд, структура силовых линий которых близка структуре теоретического магнитного диполя.

Рассмотрим только два примера сложного распределения магнитного поля внутри звезд. На рис. 2 приведены схемы распределения магнитных диполей в звездах HD 37776 и HD 13709. Диполи расположены вблизи плоскости экватора вращения. Звезда HD 37776 имеет возраст 1.7×10^6 лет, а звезда HD 13709 — возраст 8.5×10^8 лет. Разница в возрасте больше двух порядков, а характер расположения и ориентации диполей схож. Это доказывает, что внутри магнитных звезд нет крупномасштабных движений, таких как меридиональная циркуляция, дифференциальное вращение и др., которые неминуемо привели бы к тому, что диполи ушли с плоскости экватора вращения и их ориентация изменилась. Таких примеров много, все они подтверждают гипотезу «жесткого» ротатора для магнитных звезд. Возможно, что меридиональная циркуляция [48] существует только у немагнитных нормальных быстровращающихся звезд.

5. ЗВЕЗДЫ С МАГНИТНЫМИ ДИПОЛЯМИ, СМЕЩЕННЫМИ ПОПЕРЕК СВОЕЙ ОСИ

Форма фазовой зависимости у звезд такого типа обычно имеет характерный вид косозубой пилы. При существующей точности измерений поля B_e трудно выявить смещения монополей от центра звезды на величину $\Delta a < 0.05$. В таблице 2 приведены сведения о всех изученных звездах данного типа. В столбце Δa даны два значения, каждое из которых принадлежит одному из магнитных зарядов. Возникает вопрос: почему мало звезд со смещенными поперек оси диполями и почему много звезд со сдвигом диполя вдоль оси (см. раздел 6)? В литературе неоднократно высказывалось предположение о том, что коллапс протозвездных облаков происходит вдоль силовых линий легче, чем поперек. Возможно, в этом и состоит причина. Малое число звезд с поперечным смещением диполя, вероятно, объясняется более трудным процессом сжатия протозвездных облаков поперек силовых линий. Одновременно это обстоятельство может быть еще одним подтверждением формирования магнитных структур в период коллапса.

Из таблицы 2 видно, что у всех звезд расстояние между монополями значительное, показывающее что у них структура поля соответствует модели «длинного» диполя.

6. ЗВЕЗДЫ С МАГНИТНЫМИ ДИПОЛЯМИ, СМЕЩЕННЫМИ ВДОЛЬ СВОЕЙ ОСИ

Это самая многочисленная группа (таблица 3), поэтому она интересна с точки зрения исследования условий формирования и эволюции звезд. К сожалению, для звезд третьей группы (как и четвертой) параметр l определить невозможно, потому

Таблица 2. Звезды с диполями, смещенными поперек их оси

HD	Тип	i , deg	α , deg	B_s , G	B_p , G	Δa	l, R_*	Ref.
21699	He-w	32	5	6150	+21 800	0.40	0.20	[33]
					-21 800	0.40		
25267	Si	20	7	4880	+15 360	0.37	-	[2]
					-15 360	0.37		
37017	He-r	42	12	2144	-3148	0.05	0.10	[34]
					+3144	0.05		
37479	He-r	84	15	4312	+7063	0.10	0.20	[34]
					-7066	0.10		
40312	Si	52	5	650	+1420	0.20	0.33	[28]
					-1420	0.20		
70331	Si	27	2	12220	+21 777	0.30	-	[1]
					-21 776	0.30		
79158	He-w	32	2	1762	+3168	0.10	0.18	[35]
					-3178	0.10		
119419	Si	89	73:	23 000:	+37 000:	0.05	0.08:	[36]
					-37 000:	0.05		

что величина l слабо влияет на форму фазовых зависимостей. Следовательно, для звезд третьей группы нельзя определить характерные размеры и форму намагниченной области. Можно только предположить по аналогии со звездами первой и второй групп, что область занимает относительно большой объем. Большое количество звезд со смещенным вдоль своей оси диполем, возможно, объясняется тем, что вдоль силовых линий коллапс протозвездных облаков происходит легче. Если это так, то налицо признаки значительной роли магнитного поля в процессе протозвездного коллапса. Это обстоятельство наводит на мысль, что имеет место избирательная аккреция, зависящая от направления силовых линий в протозвездном облаке [48]. Такой избирательный процесс вряд ли мог произойти у звезд на более поздних стадиях эволюции, например в период нестабильной фазы, а также у молодых звезд до главной последовательности, потому что магнитная структура в этот период в значительной степени нарушается.

7. ЗВЕЗДЫ С МАГНИТНЫМИ ДИПОЛЯМИ В ЦЕНТРЕ

Здесь следует уточнить, что звезды со структурой поля, соответствующей центральному дипо-

лю, делятся на две подгруппы. В первую (таблица 4) входят объекты, структура поля которых действительно соответствует модели центрального диполя. К таким объектам относятся звезды, у которых $\Delta a < 0.05 R_*$. Вторая состоит из звезд, которым модель центрального диполя задается (таблица 5). Это делается тогда, когда количество измерений поля недостаточно для надежного выявления структуры или разброс точек на фазовых зависимостях слишком большой. Значения B_s и B_p при этом обычно оказываются такого же порядка, как при применении точной модели. Вероятно, преобладающее количество звезд с диполем, лежащим в плоскости экватора вращения, как это видно у звезд всех групп, может быть еще одним признаком организации структур на первичном этапе коллапса.

8. ОБСУЖДЕНИЕ

Используя данные о структурах магнитных полей CP-звезд, приведенные в таблицах 1–5, можно попытаться уточнить некоторые фундаментальные свойства этих объектов, например особенности эволюции магнитных звезд на разных стадиях, рассмотренные далее.

Таблица 3. Звезды с магнитными диполями, смещенными вдоль их оси

HD	Тип	α , deg	i , deg	B_s , G	B_p , G		Δa	Ref.
12288	SrCrEu	78	78.5	8100	+9700	-15 800	0.80	[37]
12447	Si+	0	38	782	+2260	-670	0.20	[38]
14437	SrCrEu	2	6	7665	+22 100	-8900	0.15	[38]
49333	He-w	0	47	1250	+1750	-2361	0.05	[39]
55719	SrCrEu	5	3	6555	+5870	-24 177	0.23	[2]
59435	SrCrEu	40	88	3292	+8983	-2500	0.10	[1]
62140	SrCrEu	0	58	1566	+2019	-2639	0.05	[28]
64740	He-r	16	50	849	+1630	-1200	0.20	[35]
65339	SrCrEu	77	73	13 700	+6029	-91 870	0.45	[28]
71866	SrCrEu	2	32	3470	+5153	-7017	0.05	[28]
75049	SrCrEu	18	8.7	28 157	+35 024	-63 430	0.10	[34]
81009	SrCrEu	69	77	8488	+17 208	-9358	0.10	[2]
101412	Ae	13	80	535	+558	-1235	0.13	[1]
112413	SrCrEu	8	55	2600	+5300	-2800	0.10	[28]
116458	He-w?	78	75	4650	+9510	-6220	0.07	[40]
118022	SrCrEu	25	22	1271	+2781	-1712	0.10	[28]
124224	Si	3:	60	2200	+1200	-7900	0.30	[41]
126515	SrCrEu	4:	22	13 500	+45 800:	+11 100:	0.24:	[40]
133029	Si+	35	33	6157	+5354	-34 470	-	[39]
133880	Si	16	32	5300	+4203	-16 150	0.20	[1]
147010	Si+	65:	76	12 000:	+103 000	-7000	0.45	[42]
166473	SrCrEu	15	16	7072	+4956	-26 384	0.28	[2]
178892	SrCrEu	35	37	8928	+9970	-2480	0.15	[38]
187474	Si+	66	86	5500	+6300	-11 600	0.10	[43]
188041	SrCrEu	83	83	3600	+4850	-7400	0.07	[44]
196178	Si	40	45	1850	+520	-2072	0.15	[39]
200311	Si+	4	30	8500	+18 520	-11 420	0.08	[37]
215441	Si	80	67.5	34 000	+55 100	-45 900	0.03	[45]
318107	Si+	80	85	14 345	+33 568	-19 460	0.11	[2]

Таблица 4. Звезды с центральным диполем (точные результаты)

HD	Тип	α , deg	i , deg	B_s , G	B_p , G	Ref.
2453	SrCrEu	10	14	3750	± 6560	[37]
4778	SrCrEu	9	56	2600	± 4030	[45]
5737	He-w	1.5	20	3190	± 5600	[45]
12098	Si+	44	55	1690	± 2450	[38]
12288	SrCrEu	24	24	8080	± 13400	[37]
22470	Si	0	25	2350	± 4100	[46]
35298	He-w	2	53	2886	± 4665	[1]
51418	SrCrEu	79	56	1126	± 1912	[35]
54118	Si	1	10:	5400:	± 9720 :	[35]
92664	He-w	50	47	1140	± 1673	[39]
112185	SrCrEu	8	50	330	± 520	[28]
125248	SrCrEu	0	87	2170	± 3200	[39]
133652	Si	45	80	2200	± 3370	[39]
148199	Si	8	31	1810	± 3240	[39]
151965	Si	83:	80:	9560	± 15110	[39]

8.1. Условия формирования магнитных структур в начальных фазах эволюции

Продолжая развивать предложенный в работе [48] сценарий происхождения и эволюции магнитных звезд, рассмотрим важный вопрос: какова была структура магнитного поля у протозвезды и сохраняется ли она до настоящего времени? В последнее время появляется все больше фактов, подтверждающих реликтовую природу магнитных полей у химически пекулярных звезд [28, 52]. Поле, наблюдаемое у звезд главной последовательности, является остатком поля, присутствовавшего в протозвездных облаках, и впоследствии усиленного (сжатого) в результате коллапса. При обсуждении данных таблиц 1–5 мы уже привели несколько доводов в пользу предположения о формировании основных структур магнитного поля в период коллапса протозвездных облаков. Сильнейшими признаками реликтовой природы поля являются (1) преимущественная ориентация магнитных диполей, (2) медленное вращение звезд, (3) сложные внутренние структуры магнитного поля. Эти свойства не могли быть приобретены ни в турбулентной фазе Хаяши, ни в фазе Ae/Be-звезд Хербига. Эти же свойства не вполне могут быть объяснены в рамках теории структур из двух и более магнитных жгутов [52].

Таблица 5. Звезды с диполями в центре (приближенные результаты)

HD	Тип	α , deg	i , deg	B_s , G	B_p , G	Ref.
3360	He-r	3	18	294	± 517	[45]
3980	SrCrEu	0	60	1860	± 2000	[2]
8441	SrCrEu		55:	470	–	[2]
9996	SrCrEu	78:	89.5	5000	± 8100 :	[44]
11503	Si+	15	50	1000	± 1550	[38]
12767	Si	0	68	255	± 387	[39]
18296	SrCrEu	2	14	890	± 1580	[46]
19832	Si	0	34	495	± 840	[46]
24155	Si	22		1314	± 2105	[39]
24712	SrCrEu	52	44	1250	± 1800	[46]
27309	Si+	50	26	1350	± 1945	[39]
28843	He-w	8	45	466	± 710	[39]
34452	Si	21	42	1000	± 1620	[38]
35456	He-w	81	6	1642	± 2934	[1]
36629	He-w	6	18	457	± 810	[39]
37022	Ae/Be	8	87	405	± 630	[39]
83368	SrCrEu	?	90:	630	± 937	[39]
90044	Si+	2	26	2153	± 3760	[1]
108662	SrCrEu	66	60	1040	± 1600	[35]
115708	SrCrEu	3	55	3850	± 6100	[36]
170397	Si	53	38	1156	± 1914	[2]
178892	SrCrEu	16	37	17440	± 30180	[2]
192678	SrCrEu	20	8	4700	± 7300	[49]
201601	SrCrEu	5	34	3800	± 6210	[50]
125823	He-r, He-w	10	71	390	± 581	[34]
148112	SrCrEu	45	32	276	± 413	[39]
200775	Ae/Be	0	12	3951	± 5890	[34]
220825	SrCrEu	20	44	435	± 700	[51]
V380 Ori	Ae/Be	0	11	2010	± 3580	[34]

Полный магнитный поток у магнитных звезд на главной последовательности оказывается практически неизменным по крайней мере 10^9 лет [2, 53]. При теоретическом максимуме существования магнитного поля на звезде 10^{10} – 10^{11} лет это ука-

Таблица 6. Относительное число звезд разных типов

Тип модели	Относительное число звезд
Центральный диполь	17%
Диполь, смещенный вдоль оси	30%
Диполь, смещенный поперек оси	8%
Сложная структура	15%
Структура не определена	30%

зывает на стабильность полного магнитного потока и отсутствие крупномасштабных движений вещества, которые неминуемо исказили бы начальные структуры поля (см. также раздел 8.4) и уменьшили бы его величину. При наличии меридиональной циркуляции и дифференциального вращения четыре характерных типа магнитных структур, которые наблюдаются у звезд всех возрастов, не могли бы сохраняться в течение всего времени жизни на главной последовательности. Исходя из квадратической зависимости времени жизни магнитных неоднородностей от их характерных размеров, можно утверждать, что крупномасштабные двух- и трехдипольные поля должны сохраняться в звезде почти такое же время, как поле всей звезды, т.е. около 10^{10} – 10^{11} лет (если бы звезда столько находилась на главной последовательности). Таким образом, крупномасштабные магнитные неоднородности, как и несимметричные относительно центра конфигурации, чрезвычайно долговечны и легко переживают срок от протозвездного коллапса до момента ухода с главной последовательности. Среди приведенных в таблице 1 звезд со сложными структурами имеются как очень молодые объекты с возрастом 1.6 – 4.0×10^6 лет (HD 37776, HD 149438), так и очень старые с возрастом 8.0×10^8 – 1×10^9 лет (HD 137909, HD 182244). Это показывает, что сложные конфигурации имеют реликтовое происхождение, и только вследствие их больших характерных размеров они существуют практически без изменений вплоть до ухода звезды с главной последовательности. Моделирование показывает, что, вероятно, вследствие сложных начальных магнитных структур протозвездных облаков простые конфигурации с максимальной напряженностью поля в центре встречаются только в небольшом числе случаев, как это видно из таблицы 6. Изучая эти конфигурации, можно получить предварительное представление об условиях формирования звезд из протозвездных облаков [48].

Накопленный наблюдательный материал указывает на то, что внутри магнитных звезд нет

токов [48], генерирующих магнитное поле, кроме, возможно, конвективного ядра. Есть достаточно оснований предполагать, что в конвективном ядре при определенных условиях могло бы генерироваться магнитное поле, и оно могло бы достигнуть поверхности вследствие плавучести. Но расчеты показывают [20], что время всплытия превышает время жизни звезд на главной последовательности. Эта трудность кажется особенно значительной для звезд с аномальными линиями гелия, время жизни которых на полтора–два порядка меньше, чем у долгоживущих SrCrEu-звезд.

Кроме приобретения магнитной структуры в период протозвездного коллапса звезда получает медленное вращение и одновременно преимущественную ориентацию магнитного поля. Есть основания предполагать, что момент вращения теряется сильнее в случае ориентации магнитных силовых линий в плоскости вращения [48]. Поскольку доля таких звезд невелика, то и доля магнитных звезд оказывается порядка 10% от общего числа звезд такой же массы. Разделение звезд на медленно вращающиеся химически пекулярные и быстро вращающиеся нормальные звезды происходит на границе $v \sin i = 100$ – 120 км с^{-1} (период вращения $P \sim 1^d$), когда возникает дифференциальное вращение протозвезды [48], закручивающее силовые линии в тороидальную форму.

Гравитационное сжатие первоначально вращающейся газовой сферы, как можно ожидать, приводит к состоянию дифференциального вращения (внутренние области вращаются быстрее). В случае сильной асимметрии магнитного поля и медленного вращения дифференциальное вращение в звездах не возникает [54]. Если предположить, что протозвездное облако имеет такие же свойства, то медленное вращение протозвездных облаков необходимо для подавления дифференциального вращения, которое у будущих нормальных звезд превращает полоидальное поле в тороидальное. Местель и Мосс [55] считают, что нормальные звезды — это те звезды, поле которых «запрятано» вглубь меридиональной циркуляцией. В магнитных звездах вследствие медленного вращения циркуляции нет, как показано в данной работе. Неосесимметричное поле [56], обычное для магнитных звезд, и медленное вращение вполне могут противостоять закручиванию силовых линий дифференциальным вращением и могут вызвать состояние, близкое однородному вращению. Очевидно, эти свойства могут быть также у протозвездного коллапсирующего облака.

8.2. Роль нестационарной фазы в эволюции магнитных структур

Если считать, что основные свойства магнитные звезды приобрели на стадиях коллапса до

нестационарной фазы Хаяши, то возникает вопрос, какие могут быть структурные изменения магнитных полей в период фазы Хаяши? Нестационарная фаза возникает в период начала ионизации легких химических элементов. Поэтому естественно предположить, что нестационарные процессы раньше начинаются в центральных областях протозвезды, где температура выше. Таким образом, крупномасштабные процессы, которые могли бы исказить реликтовую магнитную структуру далеко от центра протозвезды, маловероятны. Мосс [52, 57] рассматривает судьбу магнитного поля в этой фазе. Турбулентция искажает поле, уменьшая его характерные размеры, с последующим его разрушением вследствие неустойчивости. Турбулентция может закрутить поле в жгуты, и эти жгуты могут сопротивляться дальнейшему искажению и распаду поля. В таком случае сильный магнитный поток может выжить до того момента, когда в звезде после нестационарной фазы начинается радиативная стадия, и тогда магнитные жгуты закрепятся в стабильной области молодой звезды. В процессе роста радиативной звезды поле будет приобретать более простую геометрию (дипольную) с динамически стабильными конфигурациями, которые сохранятся в течение всей остальной жизни звезды. Трудно сказать, каково распределение характерных размеров магнитных неоднородностей, но по зависимости роста магнитного поля B_s со временем после ZAMS [48] можно предположить, что вначале исчезают очень мелкие структуры, затем крупные. У звезд Ae/Be Хербига средняя величина магнитных полей составляет сотни гаусс, а в районе полосы главной последовательности, соответствующей $\lg g = 4.0$, оно уже составляет тысячи и десятки тысяч гаусс.

Магнитное поле у молодой звезды после нестационарной стадии запутано, но остается преимущественная ориентация, приобретенная, скорее всего, в стадии коллапса [48], которая в дальнейшем сформирует наблюдаемую на главной последовательности структуру (рис. 3). Преимущественный угол наклона силовых линий составляет у молодой звезды $\alpha \sim 0^\circ$. Запутанная система силовых линий не способна создать достаточно мощную магнитосферу, которая в дальнейшем могла бы участвовать в различных магнитогидродинамических процессах, например затормозить вращение звезды. Об отсутствии мощных магнитосфер свидетельствуют слабые магнитные поля, найденные у звезд Ae/Be Хербига (см. раздел 8.3 и работу [57]).

После прохождения звездой нестабильной фазы на ранних стадиях эволюции времени достаточно только для того, чтобы мелкие магнитные неоднородности исчезли, поэтому и внутри, и на поверхности звезд главной последовательности средние и крупные неоднородности должны еще оставаться.

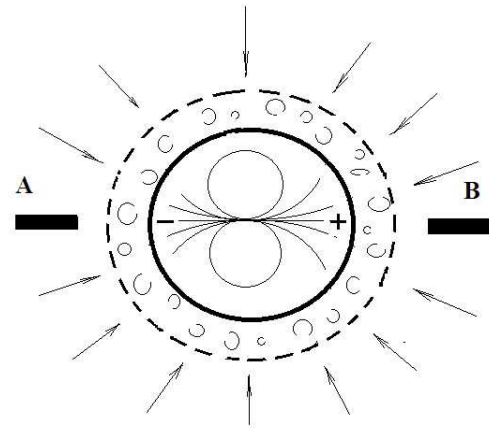


Рис. 3. Строение молодой звезды после нестационарной фазы Хаяши. В центральной части лучистая зона, содержащая глобальное полоидальное магнитное поле и мелкомасштабное запутанное поле. Вокруг звезды нестационарная аккреционная оболочка. А–В — аккреционный диск.

Самые крупные из них мы наблюдаем и сейчас у звезд с двумя и тремя диполями. Исчезновение мелких структур хорошо заметно на зависимостях средней величины магнитного поля B_s от R_*/R_z (или $\lg g$) в работах [21, 22].

8.3. Об эволюции поля в молодых звездах Ae/Be Хербига

Каковы возможности формирования структур магнитного поля у молодых звезд в период их существования от $t = 0$ до выхода на главную последовательность? Схема структуры звезды после нестабильной фазы показана на рис. 3. В центральной части сформировалась лучистая звезда. Магнитное поле в ней запутано, но имеет место преимущественная ориентация магнитного поля $\alpha \sim 0^\circ$, приобретенная, как говорилось выше, в стадии коллапса и которая в дальнейшем сформирует структуру, наблюдаемую на главной последовательности. Пока нет гипотез, объясняющих появление преимущественной ориентации магнитных диполей в рассматриваемый период эволюции. В разделе 8.4 мы приведем несколько наблюдательных фактов, которые противоречат гипотезе крупномасштабных движений внутри звезды, которые могли бы повлиять на угол α . Звезды He-г приходят на ZAMS в возрасте $t = 0.3 \times 10^6$ лет, звезды SrCrEu-типа — в возрасте $t = 0.5 \times 10^8$ лет. Многие звезды, выходящие на ZAMS и начинающие свою эволюцию на главной последовательности, уже обладают преимущественной ориентацией магнитных диполей $\alpha = 0^\circ - 20^\circ$ (см. рис. 4). После исчезновения аккреционной оболочки магнитное поле

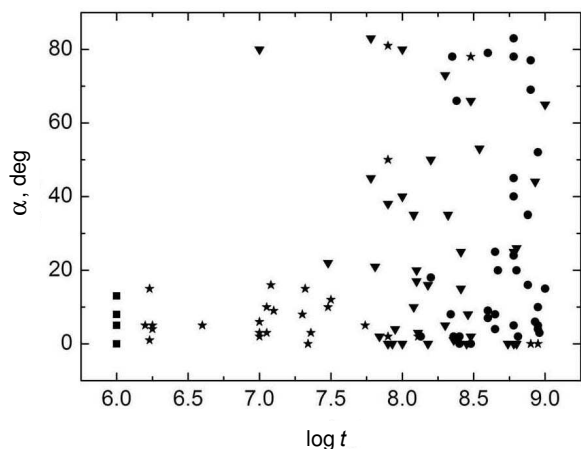


Рис. 4. Зависимость углов α от возраста звезд. Квадраты — звезды Ae/Be Хербига вблизи ZAMS; звездочки — звезды He-g и He-w; треугольники — звезды Si-типа; кружки — SrCrEu-звезды.

молодой звезды начинает расти до достижения $R_*/R_z \sim 1.4$ ($\lg g = 4.0$) [21]. Этот период эволюции необходимо рассмотреть теоретически.

В период эволюции от $t = 0$ до главной последовательности молодая звезда продолжает сжиматься, в то время как мелкомасштабная составляющая магнитного поля начинает быстро исчезать вследствие неустойчивости, а внешние ее части подвергаются мощному воздействию аккреции. В такой ситуации запутанная система силовых линий на поверхности не способна создать достаточно мощную магнитосферу, которая в дальнейшем могла бы участвовать в различных магнитогидродинамических процессах, например затормозить вращение звезды. Нестационарная аккрецирующая оболочка не даст возможности появиться магнитному полю молодой лучистой звезды. Могут ли достаточно мощные аккреционные воздействия как-то исказить структуру магнитных полей по всей массе звезды? Очевидно, что для этого должны произойти глобальные катастрофические перемещения масс внутри звезды. Из наблюдений этого пока не видно. Можно предположить, что первоначальные структуры могут быть искажены выпадением крупных фрагментов, сравнимых с массой звезды, но потребуется слишком много таких событий.

Поскольку мелкие неоднородности, существующие на фоне глобального дипольного поля B_0 внутри молодой звезды, обладают произвольной ориентацией магнитных силовых линий, то их общее магнитное поле $\sum B_i = 0$, но расширяет спектральные линии. Степень влияния общего поля от мелких компонентов на спектральную линию зависит от возраста звезды и от фактора Ланде линии. С возрастом по мере исчезновения мелких структур

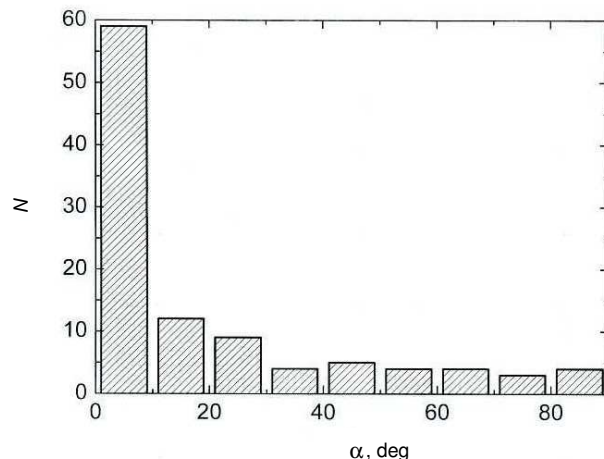


Рис. 5. Распределение углов α между осью диполя и плоскостью экватора вращения.

поля величина B_0 растет. Очевидно, влияние уширения будет более заметным на центральных частях спектральных линий. Этот эффект следует изучить экспериментально. В отличие от неоднородностей физических условий, магнитные неоднородности релаксируют медленно.

8.4. Ориентация диполей

Одним из основных свойств магнитных звезд является преимущественная ориентация магнитных диполей относительно экваториальной плоскости, обнаруженная Престоном [15, 16]. В литературе эта проблема неоднократно рассматривалась разными авторами. В частности, исследовались возможности поворота магнитных силовых линий посредством меридиональной циркуляции Эддингтона—Свита [58–60]. Из этого следует, что одной из главных задач является поиск признаков существования меридиональной циркуляции у магнитных звезд.

На рис. 5 приведена гистограмма распределения углов α , построенная по данным таблиц 1–5. Это распределение полностью совпадает с данными других авторов [8, 14, 15, 61]. Наши оценки, полученные на основании данных таблиц 1–5, показывают, что число диполей, ориентированных к плоскости экватора вращения под малым углом $\alpha = 0–20^\circ$, существенно превышает число диполей, ориентированных под другими углами. Предполагаемый процесс меридиональной циркуляции медленный, тем не менее, с возрастом должно наблюдаться постепенное уменьшение угла. Но уже ранние поиски [62] признаков существования меридиональной циркуляции привели к отрицательному результату. На рис. 4 показана зависимость величины угла α от возраста у звезд разного типа пекулярности. Звездочками показаны углы α

для звезд Ae/Be Хербига (для них мы приняли средний возраст $\lg t = 6.0$). Первое, что видно из рисунка — это отсутствие ожидаемого уменьшения угла α с возрастом. Угол мал уже у самых молодых звезд, которые только что пришли на ZAMS. Это значит, что преимущественное направление диполи приобретают уже в начальных стадиях эволюции. С другой стороны, кажется, что среди звезд He-г и He-w, по сравнению со звездами других типов пекулярности, отсутствуют объекты с $\alpha > 0-20^\circ$. Звезды Si и Si+, а также SrCrEu-типов имеют углы α в более широком диапазоне величин. Возможно, такое впечатление возникает из-за недостатка данных. В работе [63] мы показали, что распределение поперек полосы главной последовательности у звезд всех типов пекулярности одинаково, и это в первую очередь связано с распределением магнитного поля. На рис. 6 показано такое распределение для звезд He-г и звезд SrCrEu-типа. Хорошо видно, что распределения звезд обоих типов подобны. Следовательно, кажущийся недостаток гелиевых звезд с большими углами α происходит, вероятно, вследствие недостатка данных. Таким образом, не заметно существование вековых изменений ориентации магнитного поля за счет меридиональной или другой циркуляции. Далее мы рассматриваем другие признаки отсутствия меридиональной циркуляции в магнитных звездах.

Интересно, что наблюдаются совершенно одинаковые четыре типа структур магнитных полей у звезд всех возрастов. Это значит, что структуры сохраняются в течение всей жизни на главной последовательности в соответствии с требованием закона устойчивости крупных структур. При действии циркуляции эти структуры искажались бы и не оставались неизменными.

В работах [2, 53] показано, что полный магнитный поток у CP-звезд с возрастом практически не изменяется. Это тоже позволяет предположить, что в магнитных звездах полностью отсутствуют крупномасштабные движения, такие как дифференциальное вращение, меридиональная циркуляция и др., которые нарушили бы это постоянство и привели бы к разрушению поля быстрее, чем наблюдается.

Важно, что у молодых звезд Ae/Be Хербига, которые приближаются к ZAMS, магнитные диполи уже ориентированы вдоль плоскости экватора (см. таблицы 1 и 2 и рис. 4). Это указывает на то, что ориентация магнитных полей происходит уже на ранних стадиях эволюции (в стадии коллапса протозвездных облаков [48]).

Сложные конфигурации с углами $\alpha = 0-5^\circ$ в таблице 1 наблюдаются как у звезд молодых ($\lg t = 6.2$, HD 36485, HD 37776), так и старых ($\lg t = 8.95$, HD 182255), что еще раз подтверждает

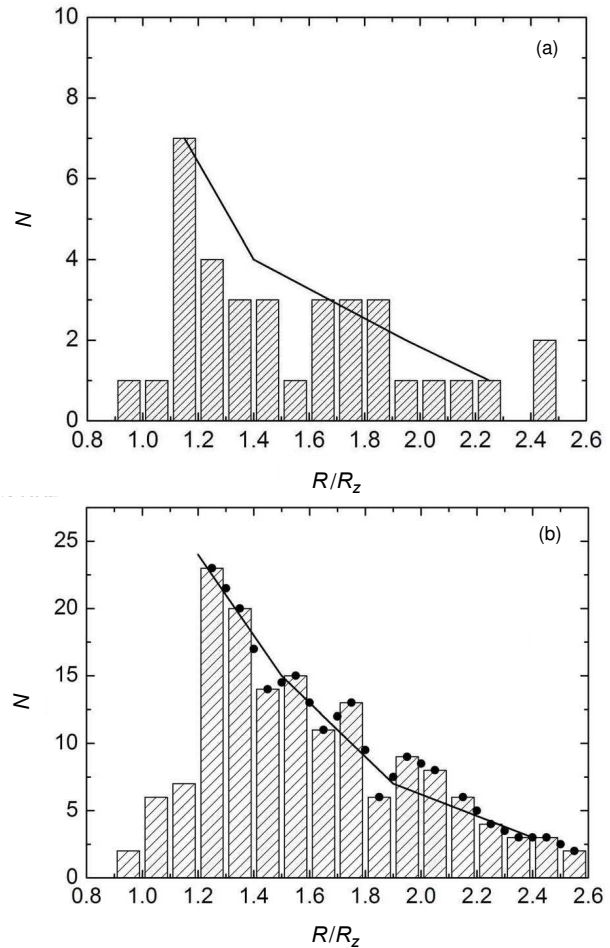


Рис. 6. Распределение звезд He-г (a) и SrCrEu-звезд (b) поперек полосы главной последовательности.

отсутствие искажающих внутреннюю структуру течений. Все эти данные противоречат предположению [58–60] о существовании меридиональной циркуляции в магнитных звездах.

Поворот угла α вряд ли возможен в период нестационарности, там имеют место совсем другие процессы, скорее мелкомасштабные по сравнению с теми, которые мы пытаемся рассматривать. Такое же замечание следует сделать о периоде звезд Ae/Be Хербига. Большое число фактов противоречит гипотезе крупномасштабной циркуляции.

В работе [48] мы пытаемся объяснить преимущественную ориентацию магнитных диполей избирательным магнитным торможением протозвездных облаков.

В разделе 3 мы уже рассмотрели примеры сложного распределения магнитного поля внутри звезд. На рис. 2 приведены схемы распределения магнитных диполей в звездах HD 37776 и HD 137909. Диполи находятся в плоскости экватора вращения. Звезда HD 37776 имеет возраст $\lg t = 6.23$, а звезда HD 137909 — $\lg t = 8.93$. Столь большая

Таблица 7. Среднее смещение диполей у звезд разных типов

Тип	SrCrEu	Si	He-w + He-r
Число звезд	46	50	40
Средний Δa	0.12 ± 0.03	0.22 ± 0.03	0.20 ± 0.03
Средний возраст	8.75	8.00	7.00

разница в возрасте привела бы к тому, что диполи ушли с плоскости экватора вращения, если бы внутри этих звезд действовали крупномасштабные движения вещества. Таких примеров много, все они подтверждают гипотезу «жесткого» ротатора. Очевидно, что меридиональная циркуляция [48] существует только у немагнитных нормальных быстровращающихся звезд.

Если бы крупномасштабные структуры под действием меридиональной или другой циркуляции действительно упрощались со временем, то следовало бы ожидать, что горячие CP-звезды имеют более сложные конфигурации, чем холодные. В таблице 7 приводятся звезды разных типов пекулярности, а также величина среднего смещения диполя у них. У самых старых объектов SrCrEu-типа среднее смещение действительно меньше, но различие незначимо. Релаксация слишком медленная, чтобы ее заметить. Этот результат снова противоречит предположению о наличии меридиональной [48] или любой другой циркуляции в магнитных звездах.

Таким образом, из приведенных в этом разделе данных мы не видим признаков действия крупномасштабных движений вещества внутри магнитных звезд.

8.5. Об эволюции магнитного поля на главной последовательности

Эта тема подробно обсуждалась в работах [23, 24, 48]. Поэтому приводим краткое резюме результатов этих работ. Магнитное поле в пределах полосы главной последовательности претерпевает сложные изменения: (1) постепенное уменьшение вследствие омической диссипации, (2) постепенное уменьшение вследствие эволюционного увеличения радиуса и (3) постепенное увеличение из-за разрушения мелких структур, возникших в период нестационарной фазы. Первый механизм можно исключить, потому что за время жизни звезды на главной последовательности полный магнитный поток, как оказалось, практически не изменяется [2, 53]. Два других процесса, складываясь, приводят к характерному общему изменению магнитного поля. Вблизи ZAMS звезды выходят к главной последовательности без поля или со

слабым полем. Затем видимое продольное поле растет вследствие разрушения мелких структур сначала быстро, потом все медленнее. В полосе главной последовательности, соответствующей положению звезд V класса светимости, поле достигает максимума, и затем уменьшение поля за счет увеличения радиуса звезды начинает преобладать. При достижении звездой полосы $R/R_z = 1.9-2.0$ наблюдается небольшой скачок магнитного поля вследствие остановки звезды из-за петли на эволюционном треке. В конце жизни звезды на главной последовательности магнитное поле разрушается вследствие возникновения конвекции. Предельный наблюдаемый возраст звезд с температурой $T_{\text{eff}} = 6750-7500 \text{ K}$ $\lg t = 9.1$. Это зона перехода звезд от лучистого переноса к конвективному переносу. Звезды с более высокими температурами теряют поле в верхней части полосы главной последовательности, где тоже, очевидно, возникает конвекция.

8.6. Замечания об эффекте Ландстрита–Матиса

Этот эффект [64] заключается в том, что звезды с периодами вращения $P > 25^{\text{d}}$ имеют в среднем меньшие углы β (в нашем изложении $\beta = 90^\circ - \alpha$), в то время как короткопериодические магнитные звезды имеют систематически большие углы β . Авторы отмечают, что этот результат важен для теории эволюции магнитных звезд и потери ими углового момента. Наши результаты моделирования позволяют снова вернуться к этой проблеме, тем более что количество исследованных единой методикой звезд у нас вчетверо больше, чем в указанной работе. Для этого сравним наши данные с теми, которые получены в обсуждаемой работе. Средние величины углов α оказались следующими: $\alpha = 20^\circ \pm 5^\circ$ ($P < 25^{\text{d}}$) и $\alpha = 36^\circ \pm 8^\circ$ ($P > 25^{\text{d}}$) — наши данные (95 звезд); $\alpha = 21^\circ \pm 8^\circ$ ($P < 25^{\text{d}}$) и $\alpha = 72^\circ \pm 3^\circ$ ($P > 25^{\text{d}}$) — данные Ландстрита и Матиса (24 звезды). Из приведенных оценок видно, что в нашем случае различие углов α незначимо. По причине большего числа данных, использования единой и более обоснованной методики определения параметров, мы считаем наш результат более надежным.

8.7. Замечания о тороидально-полоидальных структурах магнитного поля

В связи с рассмотренными выше результатами уместно сделать несколько замечаний относительно хорошо известной гипотезы Braithwaite [65]. Она заключается в том, что стабильной может быть только тороидально-полоидальная структура магнитного поля. Однако, по нашему мнению, эта

гипотеза несовместима с многими свойствами магнитных звезд, часть которых рассмотрена выше. Как уже говорилось, дипольные магнитные структуры наиболее стабильны [21], потому что любые другие более сложные конфигурации неустойчивы, они исчезают быстро, и остается только долгоживущая крупномасштабная фракция. Это свойство магнитных полей хорошо проявляется на Солнце [20].

Магнитные звезды в процессе эволюции претерпевают достаточно сложные преобразования, в результате которых приобретаются свойства, которые никак не укладываются в рамки гипотезы тороидально-полоидальных структур. Основные свойства магнитных звезд, необъяснимые с точки зрения этой гипотезы, следующие: (1) сложность поверхностных и внутренних структур магнитного поля; (2) преимущественная ориентация магнитных полей вдоль плоскости экватора вращения; (3) невозможность объяснения медленного вращения; (4) причина появления магнитного поля только на ZAMS; (5) причина разделения звезд на магнитные и нормальные; (6) условия возникновения диффузионных процессов и появления химических аномалий; (7) зависимость числа магнитных звезд от скорости вращения; (8) изменение распределения звезд на графике $B_s(\lg P)$ [48].

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

(1) Итак, в предыдущих разделах мы показали, что наблюдаемые сейчас структуры магнитных полей вероятнее всего сформировались в начальный период коллапса, до наступления нестационарной фазы и фазы появления лучистой молодой звезды. В этих двух фазах нет условий для формирования основных свойств магнитных CP-звезд (они перечислены в предыдущем разделе). В литературе неоднократно обсуждался вопрос о том, что коллапс протозвездных облаков происходит вдоль силовых линий легче, чем поперек. Очевидно, в этом состоит причина того, что наблюдается малое число звезд с поперечным смещением диполя и большое число звезд со смещением диполя вдоль своей оси. Одновременно это свойство является еще одним подтверждением формирования магнитных структур в период коллапса. В многодипольных звездах наблюдаются несколько областей с максимальной напряженностью поля, которые формируются, скорее всего, на фазах первоначального коллапса протозвездных облаков. Расстояния Δa отдельных монополей от центра у таких звезд достигают долей радиуса. Диполи расположены преимущественно в плоскости экватора вращения.

(2) Реальность одного из основных и крайне выдающихся свойств магнитных звезд — преимущественной ориентации магнитных осей вдоль экваториальной плоскости — подтверждена многими

авторами и, вероятнее всего, является результатом действия избирательного магнитного торможения протозвездных облаков [48]. Выше отмечалось, что существует много доводов в пользу предположения об отсутствии внутризвездных движений газа, которые могли бы привести к преимущественной ориентации магнитных диполей и искажению первоначальных структур. Уже давно существует мнение, что магнитные звезды вращаются как твердое тело [25–27]. Это свойство магнитных звезд создает большие трудности для ряда гипотез, посвященных обоснованию медленных вариаций магнитных структур вследствие меридиональной циркуляции и дифференциального вращения.

(3) Именно скорость вращения звезд приводит к отделению магнитных и немагнитных CP-звезд от нормальных звезд «без поля». У быстро вращающихся протозвездных облаков возникает дифференциальное вращение, которое закручивает силовые линии в тороидальную форму [48], которая не обнаруживается у будущих звезд существующими методами.

(4) Избирательное магнитное торможение возможно только для небольшого числа звезд, у которых существует благоприятная ориентация магнитных полей. Кроме того, вероятно, в достаточной степени тормозятся только самые медленные ротаторы. Это ограничивает количество будущих магнитных и немагнитных CP-звезд до 10% [48]. Торможение протозвездных облаков наиболее вероятно происходит в период их гравитационного коллапса. В фазах Хаяши и молодых лучистых звезд торможение невозможно вследствие отсутствия условий формирования достаточно мощных магнитосфер.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит А. А. Соловьева за полезные обсуждения и ценные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **69**, 305 (2014).
2. Yu. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **70**, 89 (2015).
3. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 25 (2003).
4. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, in *Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (2000), p. 151.
5. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, in *Magnetic Stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij, D. O. Kudruavtsev, and I. I. Romanyuk (2004), p. 152.
6. E. Gerth, Yu. V. Glagolevskij, and G. Scholz, in *Stellar Magnetic Fields*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij, and I. I. Romanyuk (1997), p. 67.

7. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, in *Physics of Magnetic Stars*, Ed. by D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk (2007), p. 148.
8. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **159**, 100 (1970).
9. J. D. Landstreet, *Astron. J.* **85**, 611 (1980).
10. A. V. Goncharskii, V. V. Stepanov, V. L. Khokhlova, and A. G. Yagola, *Sov. Astron. Lett.* **3**, 147 (1977).
11. A. V. Goncharskii, V. V. Stepanov, V. L. Khokhlova, and A. G. Yagola, *Sov. Astron.* **26**, 690 (1982).
12. N. E. Piskunov and V. L. Khokhlova, *Sov. Astron. Lett.* **9**, 346 (1983).
13. H. W. Babcock, in *Stellar Atmospheres*, Ed. by J. L. Greenstein (Univ. Chicago Press, 1960), p. 282.
14. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **66**, 144 (2011).
15. G. W. Preston, *Astrophys. J.* **150**, 547 (1967).
16. G. W. Preston, in *The Magnetic and Related Stars*, Ed. by R. Cameron (Mono Book Corp., Baltimore, 1967), p. 3.
17. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **159**, 1001 (1970).
18. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **42**, 421 (1980).
19. T. Cowling, in *The Sun*, Ed. by G. P. Kuiper (Univ. Chicago Press, Chicago, 1953), Chap. 8.
20. E. N. Parker, *Cosmical Magnetic Fields: Their Origin and Their Activity* (Clarendon Press, Oxford; Oxford Univ. Press, New York, 1979), Vol. 1.
21. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56**, 173 (2013).
22. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57**, 204 (2014).
23. Yu. V. Glagolevskij, *Астрофиз. исслед. (Известия САО)* **2**, 3 (1970).
24. Yu. V. Glagolevskij, G. A. Chuntunov, and A. V. Shavrina, *Astrophysics* **55**, 140 (2012).
25. H. W. Babcock, *Observatory* **69**, 191 (1949).
26. D. W. N. Stibbs, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **110**, 395 (1950).
27. G. W. Preston, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **83**, 571 (1971).
28. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68**, 78 (2013).
29. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68**, 338 (2013).
30. Yu. V. Glagolevskij, A. V. Shavrina, G. A. Chuntunov, and D. A. Lyashko, *Astrophysical Bulletin* **68**, 454 (2013).
31. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **53**, 536 (2010).
32. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 15 (2004).
33. Yu. V. Glagolevskij and G. A. Chuntunov, *Astrophysics* **50**, 362 (2007).
34. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **55**, 169 (2012).
35. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **67**, 264 (2012).
36. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **44**, 98 (2001).
37. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 31 (2005).
38. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Astrophysical Bulletin* **65**, 164 (2010).
39. Yu. V. Glagolevskij, in prep.
40. Yu. V. Glagolevskij, *Astronomy Reports* **49**, 1001 (2005).
41. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Astron. and Astrophys.* **382**, 935 (2002).
42. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **46**, 123 (1998).
43. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **48**, 483 (2005).
44. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Astrophysics* **51**, 242 (2008).
45. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **64**, 62 (2009).
46. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **65**, 34 (2010).
47. А. Е. Дудоров, в *Итоги науки и техники. Сер. Астрономия*, ред. Г. М. Рудницкий (ВИНИТИ, Москва, 1990), Т. 39, с. 77–148.
48. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57**, 315 (2014).
49. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **50**, 70 (2000).
50. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Astrophysics* **49**, 218 (2006).
51. Yu. V. Glagolevskij, I. Kh. Iliev, I. K. Stateva, and G. A. Chuntunov, *Astrophysics* **49**, 497 (2006).
52. D. Moss, *ASP Conf. Ser.* **248**, 305 (2001).
53. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57**, 315 (2014).
54. D. Moss, *IAU Symp. No. 224*, 245 (2004).
55. L. Mestel and D. L. Moss, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **178**, 27 (1977).
56. M. Schussler and A. Paehler, *Astron. and Astrophys.* **68**, 57 (1978).
57. D. Moss, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **236**, 629 (1989).
58. D. Moss, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **168**, 61 (1974).
59. L. Mestel and D. Moss, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **361**, 595 (2005).
60. D. Moss, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **182**, 747 (1977).
61. G. W. Preston, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **83**, 571 (1971).
62. Yu. V. Glagolevskij, in *Magnetic Stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. M. Kopylov (Nauka, Leningrad, 1988), p. 206.
63. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **58**, 29 (2015).
64. J. D. Landstreet and G. Mathys, *Astron. and Astrophys.* **359**, 213 (2000).
65. J. Braithwaite and A. Nordlund, *Astron. and Astrophys.* **450**, 1077 (2006).

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

Yu. V. Glagolevskij

We present the results of modeling for about a hundred magnetic stars. It is shown that the dipole representation of magnetic field structures describes the distribution of the magnetic field over stellar surfaces fairly well. We analyze some patterns which support the relic hypothesis of magnetic field formation. Arguments are given in favor of the assumption that the main properties of magnetic stars—slow rotation, predominant orientation of magnetic field lines along the plane of the rotation equator, complex internal structures of magnetic fields—are acquired in the process of gravitational collapse. There are no conditions for that in the non-stationary Hayashi phase and in the stage of a radiative young star.

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