

УДК 524.35-337

ВЕРОЯТНЫЕ ВНУТРЕННИЕ МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД. I

© 2018 Ю. В. Глаголевский*, А. Ф. Назаренко

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 3 ноября 2017 года; принята в печать 5 марта 2018 года

Рассмотрены двухдипольные внутренние структуры магнитных полей магнитных звезд, полученные методом моделирования. Серия наших работ по моделированию структур, в том числе эта статья, показывает, что наблюдается чрезвычайное многообразие структур и параметров магнитных полей звезд. Фактически нет двух звезд с совершенно одинаковыми свойствами. Это указывает на большое разнообразие намагниченных родительских протозвездных облаков, из которых формируются магнитные звезды.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] подробно рассмотрен возможный сценарий формирования магнитных структур в стадии гравитационного коллапса в магнитных звездах. Судя по всему, наиболее крупные магнитные структуры сохраняются в период нестабильной фазы Хаяши и в период эволюции молодой лучистой звезды. У звезд, находящихся на Главной последовательности, все еще можно наблюдать мелкомасштабную составляющую магнитного поля [4], сохранившуюся от предыдущих периодов эволюции, но она уже слабо влияет на наблюдаемые крупные структуры. Тороидальные поля не вызывают наблюдаемый зеемановский эффект. Из этого следует, что поле магнитных звезд имеет полоидальный характер. Мультиполюса высокого порядка тоже дают небольшой интегральный эффект, но преобладающий компонент — дипольный. Этот фундаментальный вывод Престона [5] является основой при моделировании магнитного поля магнитных звезд. Еще раньше Бэбкок [6] высказывал мнение, что по виду профилей спектральных линий магнитное поле не принадлежит одному пятну, как на Солнце. Звезда намагничена целиком, структура магнитного поля имеет дипольный характер, но присутствие мелкомасштабной фракции возможно. Крупномасштабные структуры протозвездных магнитных облаков сжимаются при коллапсе в полоидальные структуры. В фазе звезды они описываются (в первом приближении) «неточечным» виртуальным диполем, у которого расстояние между монополями достигает иногда

величины долей радиуса. В таком диполе силовые линии сходятся в точках расположения виртуальных монополей. Трудно вообразить себе ситуацию, при которой сжимающееся при коллапсе намагниченное облако сожмется в такой объем, при котором в его центре структура магнитного поля будет описываться теоретическим «точечным» диполем. Для описания внутренней и поверхностной структур при моделировании подбирается такой диполь, силовые линии которого вблизи поверхности звезды совпадают с наблюдаемыми силовыми линиями. Очевидно, что структура поля вблизи диполя другая, там поле полоидальное. Это надо иметь в виду при рассмотрении рисунков, представленных ниже. Результаты моделирования [7] показывают, что дипольное представление структур магнитного поля является неплохим приближением к реальной действительности. Эта методика приводит к хорошим результатам даже тогда, когда измерения выполнены с прецизионной точностью в несколько гаусс. Практически во всех случаях модельные фазовые кривые изменения магнитного поля совпадают с наблюдаемыми в пределах 3σ . Если известны обе фазовые зависимости — продольного B_e и среднего поверхностного B_s магнитного поля, то модельные и наблюдаемые фазовые зависимости совпадают в пределах ошибок при одних и тех же заданных параметрах. Таким образом, мы получаем самосогласованный результат. Это подтверждает не только правильность модели, но и правильность измерений.

В работах [8, 9] были исследованы структуры магнитного поля трех уникальных звезд. Они содержат по три намагниченные области, которые создают сложное распределение магнитного поля

*E-mail: glagol@sao.ru

внутри и на поверхности. В данной работе мы рассмотрим более простые структуры, сформированные двумя намагниченными объемами. В таких структурах диполи могут находиться в плоскости экватора вращения либо под углом к нему. Поэтому мы рассмотрим оба варианта отдельно.

2. МОДЕЛИ С ДИПОЛЯМИ В ПЛОСКОСТИ ЭКВАТОРА ВРАЩЕНИЯ

В работе [2] приведены основные параметры магнитного поля магнитных звезд, в том числе и тех, у которых диполи находятся в плоскости экватора вращения. В таблице 1 даны параметры, необходимые для определения внутренней структуры магнитного поля. Если широта монополей находится в пределах $\alpha = \pm 10^\circ$, то мы приняли, что диполи у них лежат в плоскости экватора вращения. Для этих объектов использовалась соответствующая модель. В колонках таблицы последовательно даны номер звезды, тип ее пекулярности, эффективная температура, диаметр конвективного ядра d в единицах диаметра звезды, величина заряда монополя в относительных единицах, широта монополя α , его долгота λ , расстояние монополя от центра звезды Δa в единицах радиуса звезды и основной литературный источник приведенных параметров.

При моделировании в некоторых пределах увеличение заряда эквивалентно увеличению Δa . Если бы мы фиктивно варьировали один из этих параметров, то для получения правильной модели мы вынуждены бы были это скомпенсировать вторым параметром. Однако из таблицы 1 следует, что величины зарядов и величины расстояний монополей от центра у большинства звезд для каждого диполя одинаковы. Это может служить признаком того, что, действительно, диполи имеют одинаковый заряд и расположены на одинаковом расстоянии от центра звезды. Этот вывод может быть важен при разработке теории магнитных звезд. Угол α обычно определяется с точностью до 2° – 3° , заряд — до 0.1–0.2 единиц (определяется по отношению к максимальному заряду), величина Δa — с точностью 0.10–0.15. Точность величины λ находится в пределах 5° – 10° .

Рассмотрим распределения силовых линий внутри каждой звезды, показанные на рис. 1. Обращает на себя внимание большое разнообразие магнитных структур и величин магнитного поля, это подводит к выводу, что характер распределения магнитного поля по поверхности тоже разный. В работах [15–17] предполагалось, что это свойство является следствием гравитационного сжатия случайно расположенных по отношению к центру гравитации начальных магнитных структур в фазе гравитационного коллапса протозвездных

облаков. Однако наблюдаются и другие общие свойства. Например, направления осей диполей чаще перпендикулярны радиусу, магнитные поля практически никогда не направлены в сторону одинаковых полюсов. В работах [2, 18, 19] показано, что в протозвездных облаках такая конфигурация более устойчива. Вторая причина рассмотрена в разделе 5: это сплющивание первоначального намагниченного объема вдоль радиуса. По этой причине возникает общее свойство, заключающееся в том, что диполи «оказываются» область, занимаемую конвективным ядром. Создается впечатление, что центр гравитации «выбирает себе место» в окружении намагниченных фрагментов. При сложении магнитных полей в центре каждой из звезд возникает область слабого магнитного поля. В некоторых случаях диполи смещены от центра слишком сильно, что вызывает большую асимметрию магнитного поля на поверхности (HD 50773, HD 142301, HD 152107, HD 182255). У звезды HD 142301, по-видимому, очень большое расстояние между монополями. Не исключено, что в верхней части на рисунке на самом деле находятся близко расположенные тандемом два диполя. Если это так, то звезду можно отнести к трехдипольному типу. Для звезды HD 152107 модель ненадежна вследствие плохих измерений. Звезда HD 36485 относится к тем редким объектам, у которых ось диполя не перпендикулярна радиусу. Проблемой при моделировании является определение величины Δa . Дело в том, что форма фазовой кривой слабо зависит от этой величины в пределах $\Delta a = 0$ –0.2. Однако опыт показывает, что реально в половине случаев Δa выходит за эти пределы, а это значит, что предположение $\Delta a \approx 0.2$ более вероятно. Не искажая в пределах точности измерений модельную фазовую зависимость, мы всегда принимали $\Delta a = 0.15$ во всех случаях, когда эта величина не определялась уверенно. Из данных таблицы 1 видно, что двухдипольными структурами обладают как массивные, так и маломассивные звезды, т.е. механизм формирования их одинаков.

3. МОДЕЛИ С ДИПОЛЯМИ, НАКЛОНЕННЫМИ К ПЛОСКОСТИ ЭКВАТОРА ВРАЩЕНИЯ

В таблице 2 приведены такие же данные, как и в таблице 1, взятые из работы [2], но для звезд, у которых один диполь или оба наклонены к плоскости экватора вращения более чем на 10° . Внутреннюю структуру этих звезд мы рассматриваем тоже в плоскости экватора. Схемы распределения магнитных силовых линий у звезд второго типа приведены на рис. 2.

Таблица 1. Двухдипольные магнитные звезды с диполями в плоскости экватора вращения

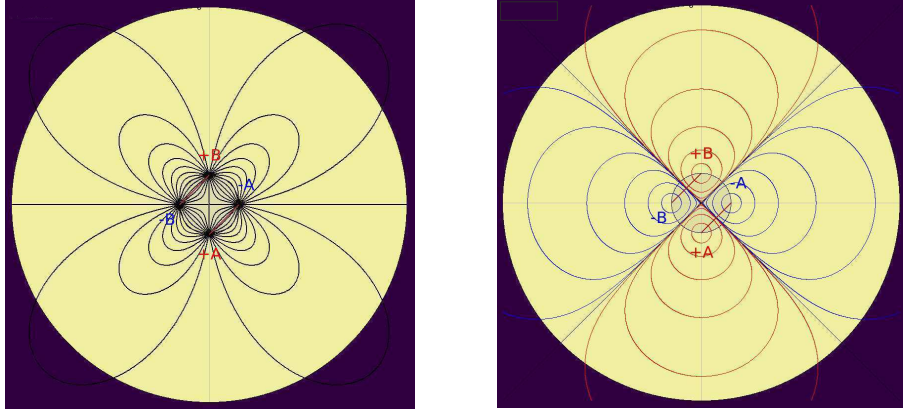
HD	Type	T_{eff} , K	B_s , kG	d, D^*	$\lg t$, [лет]	Заряд	α , deg	$\Delta a, R^*$	λ , deg	Refs
35502	He-w	16060	6500	0.15	7.40	+1.0	+10 :	0.15	0	[10]
						-1.0	-10 :	0.15	90	
						+1.0	+10 :	0.15	180	
						-1.0	-10 :	0.15	270	
36485	He-r	19500	5890	0.18	7.34	+1.0	8	0.30	0	[11]
						-1.0	0	0.30	90	
						+1.0	8	0.30	180	
						-1.0	0	0.17	270	
50773	SrCrEu	8300	441	0.08		-1.0	10	0.15	190	[12]
						+1.0	-10	0.15	0	
						-0.18	5	0.50	75	
						+0.18	0	0.50	115	
137909	SrCrEu	7910	5620	0.08	8.93	-1.0	-6.4	0.18	127	[10]
						+1.0	0	0.18	146	
						-1.0	5.5	0.18	0	
						+1.0	0	0.18	22	
142301	He-w	16250	6425	0.15	7.00	+1.0	-3	0.3750	0	[13]
						-1.0	+3	0.3750	30	
						+1.0	-3	0.3750	100	
						-1.0	+3	0.3750	260	
152107	SrCrEu	8820	4100:	0.09	8.72	+1.0 :	7 :	0.5 :	0 :	[14]
						-1.0 :	-6 :	0.5 :	95 :	
						+1.0 :	0 :	0.5 :	190 :	
						-1.0 :	-4 :	0.5 :	260 :	
182255	He-w	13420	100	0.13	7.90	+1.0	0 :	0.20	0	[10]
						-1.0	0 :	0.20	70	
						+1.0	0 :	0.20	150	
						-1.0	0 :	0.20	284	

4. ВЛИЯНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ЯДРА НА ВНУТРЕННИЕ СТРУКТУРЫ

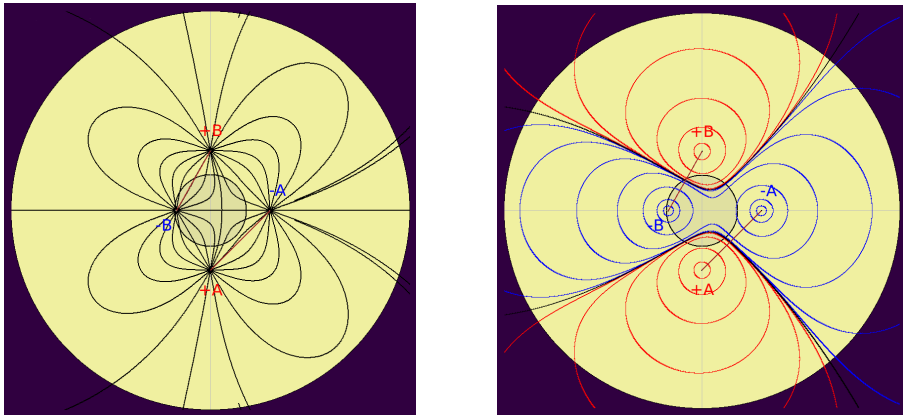
Конвективное ядро не содержит силовых линий глобального магнитного поля, потому что конвекция выталкивает магнитное поле наружу. Неясно, как ведут себя силовые линии вблизи него, особенно если диполь находится в центре звезды. Чтобы сохранить общий поток, силовые линии должны

огинать ядро. При этом происходит сближение огибающих силовых линий, что усиливает магнитное поле вокруг ядра, и местами увеличивается его градиент. Учесть эту ситуацию в программе моделирования проблематично. Тем не менее поверхностные структуры магнитного поля описываются правильно, что мы уже обсуждали. Конечно, такая ситуация приводит к неравновесным усло-

HD 35502



HD 36485



HD 50773

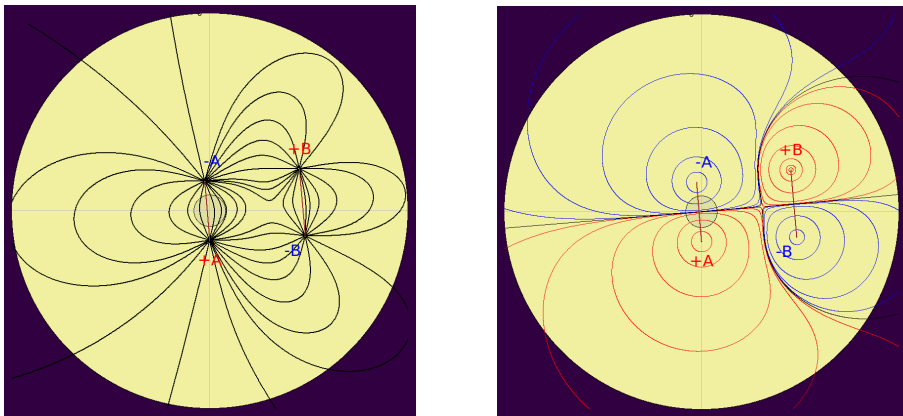
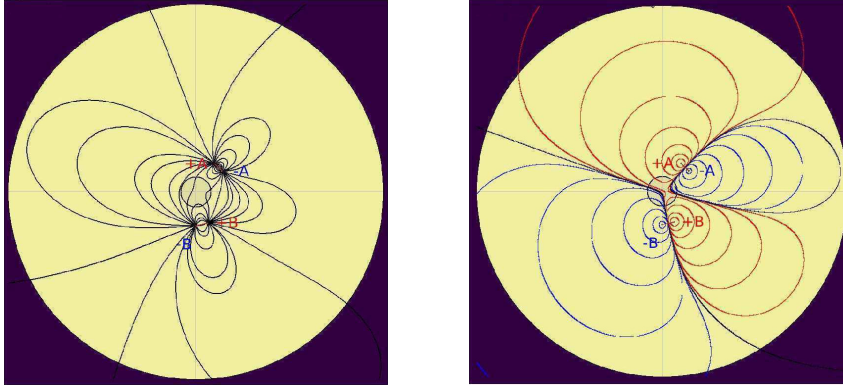


Рис. 1. Внутренние магнитные структуры звезд с диполями в плоскости экватора вращения ($\alpha < 10^\circ$) для звезд HD 35502, HD 36485, HD 50773. Слева — распределение силовых линий, справа — распределение напряженности магнитного поля.

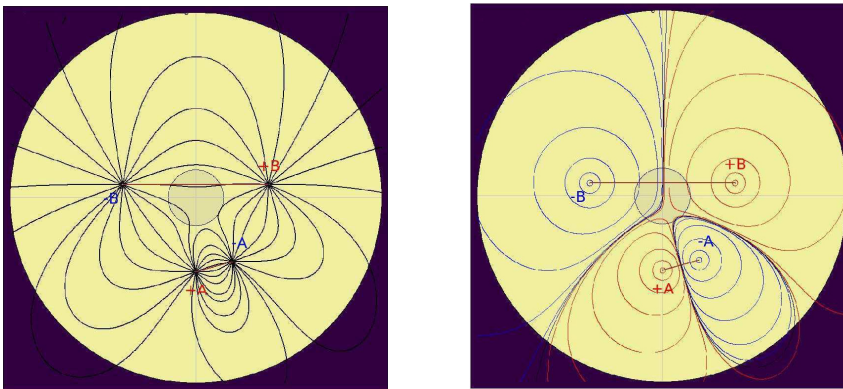
виям вблизи ядра. Вероятно, конвективное ядро влияет на структуру только внутренних областей магнитных структур, особенно если диполи расположены близко к конвективному ядру. Структуры магнитного поля, представленные на схемах рис. 1

и 2, строились в предположении, что конвективного ядра нет. Для того чтобы окончательно прояснить ситуацию, необходимы соответствующие теоретические расчеты с точки зрения магнитогидродинамической устойчивости внутренних областей.

HD 137909



HD 142301



HD 152107

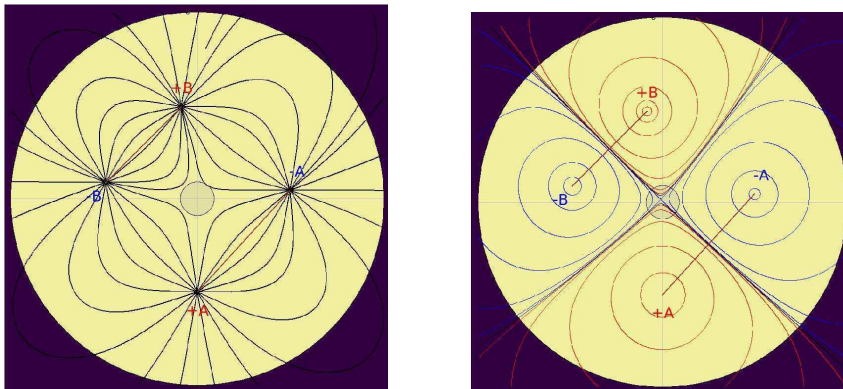


Рис. 2. То же, что на рис. 1 для звезд HD 137909, HD 142301, HD 152107.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Поверхностные структуры магнитных полей химически пекулярных звезд достаточно подробно рассматривались в работе [3]. В настоящем исследовании мы рассмотрели структуры магнитных полей внутри звезд, создаваемые двумя магнитными диполями с разнонаправленным полоидальным полем. Серия наших работ по моделированию структур показывает, что наблюдается чрез-

вычайное многообразие свойств магнитных звезд. Это подтверждается также приведенными данными и позволяет нам предположить, что в начальных фазах эволюции в процессе гравитационного коллапса протозвездного облака магнитные конфигурации формируются из случайно ориентированных двух намагниченных фрагментов. Не исключено, что центр гравитации каким-то образом связан с магнитным полем, потому что диполи явно окружа-

HD 182255

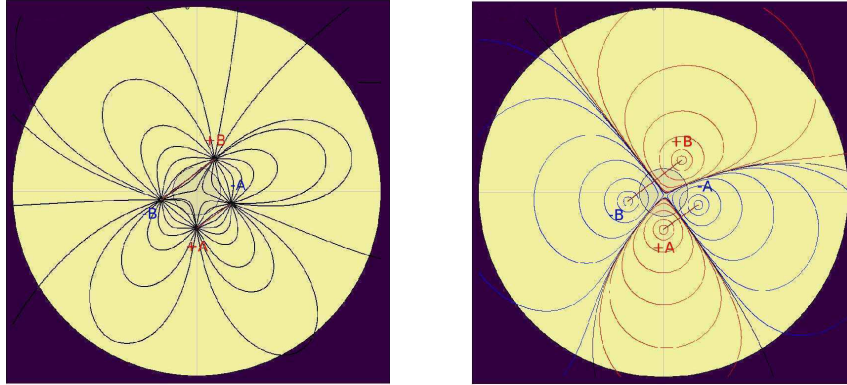


Рис. 3. То же, что на рис. 1 для звезды HD 182255.

ют центр звезды. Скорее всего, это происходит в результате сплющивания первоначального намагниченного объема вдоль радиуса (рис. 3). По этой причине возникает общее свойство, заключающееся в том, что диполи «огибают» область, занимаемую конвективным ядром. Создается ошибочное впечатление, что центр гравитации «выбирает себе место» в окружении намагниченных фрагментов. Ниже эта проблема частично рассмотрена. Не исключено, конечно, что в нестационарной фазе Хаяши первоначальные конфигурации могли слабо искажаться. Однако опыт исследований показывает, что в этой фазе, скорее, имеют место только мелкомасштабные пертурбации, остатки которых наблюдаются и в настоящее время [4]. Большое число звезд с центральным диполем (22% [1]) может свидетельствовать о том, что в нестационарной фазе Хаяши нет процессов (по крайней мере, для части звезд), искажающих крупномасштабные структуры магнитного поля или формирующих новые. Есть лишь процессы, приводящие к мелкомасштабным искажениям силовых линий магнитного поля. В результате магнитное поле оказывается состоящим из двух фракций: мелкомасштабной структуры типа дуг, ячеек, волокон и др. [20] и преимущественно ориентированной крупномасштабной составляющей. В рамках гипотезы о формировании магнитных структур в период «до нестационарной фазы» этот вывод имеет принципиальное значение. Мелкомасштабные искажения магнитных структур, происходящие в нестационарной фазе Хаяши, по-видимому, приводят к уменьшению общего магнитного поля, наблюдаемого у молодых звезд Ae/Be Хербига [1].

Протозвездные облака намагничены крайне неоднородно, местами непропорционально плотности. После сжатия вместе с облаком неоднородности магнитного поля внутри звезд формируют магнитные неоднородности, которые не совпадают

с центром звезды. Если бы магнитное поле было пропорциональным плотности, то все звезды имели бы конфигурации центрального диполя. Факт, что только около 26% магнитных звезд имеют сложные структуры, описываемые двумя или тремя магнитными диполями, свидетельствует о том, что основная масса магнитных звезд формируется в общем из достаточно однородных по магнитному полю облаков. Из сказанного выше следует, что сложные конфигурации не могли сформироваться в нестационарной фазе Хаяши или в стадии молодых лучистых звезд Ae/Be Хербига. Нестационарные процессы, возникающие вследствие ионизации легких элементов, могут возникать в областях, близких к центру гравитации, но никак не в стороне от него. Поэтому трудно предполагать, что сложные и несимметричные относительно центра звезды неоднородности магнитного поля могли возникнуть в нестационарной фазе. Для этого необходимо было бы предполагать также процессы, которые привели бы к таким наблюдаемым свойствам магнитных звезд, как преимущественная ориентация магнитных силовых линий вдоль плоскости экватора вращения. В молодых стабильных лучистых звездах могут быть условия, при которых магнитные структуры начинают стабилизироваться.

Моделирование показывает, что большая часть звезд имеет углы наклона осей диполей к плоскости экватора вращения близкие $\alpha = 0^\circ$. Причина такой преимущественной ориентации рассматривалась в работах [2, 17]. Магнитные протозвезды испытывают торможение, избирательное по отношению к углу α , т.е. такое, которое происходит эффективнее в тех облаках, где магнитные силовые линии параллельны плоскости вращения [21]. Поэтому звезды с благоприятной для торможения ориентацией $\alpha \approx 0^\circ - 10^\circ$ преобладают. Медленные магнитные ротаторы сохраняют свое магнитное поле, в то

Таблица 2. Двухдипольные магнитные звезды с основными диполями, наклоненными к плоскости экватора вращения

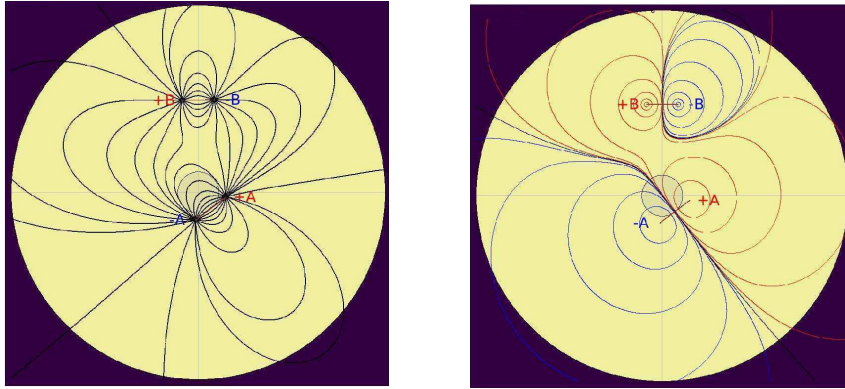
HD	Type	T_{eff} , K	B_s , kG	d , D^*	$\lg t$, [лет]	Заряд	α , deg	Δa , R^*	λ , deg	Refs
10783	Si+	10783	2244	0.11	8.45	-1.0	-25	355	0.15	[3]
						+1.0	+25	80	0.15	
						-0.27	0	170	0.50	
						+0.27	0	190	0.50	
32633	Si+	9250	12000	0.09	8.78	-1.0	25	42	0.15	[3]
						+1.0	-25	70	0.15	
						-0.3755	0	165	0.30	
						+0.3755	0	350	0.10	
45583	Si	12860	4990	0.12	8.08	-1.0	+32	0	0.15	[3]
						+1.0	-9	90	0.15	
						-1.0	+2	180	0.15	
						+1.0	-9	273	0.15	
137509	He-w	13700	2967	0.13	8.08	+1.0	20	95	0.20	[3]
						-1.0	0	190	0.20	
						+1.0	-17	275	0.20	
						-1.0	0	5	0.20	
223640	Si	12320	1026	0.12	8.00	+1.0	38	35	0.15	[3]
						-1.0	38	240	0.15	
						+0.11	0	255	0.60	
						-0.11	0	275	-0.3750	
343872	Si	10500	3717	0.10	8.34:	+1.0	26	315	0.20	[3]
						-1.0	-26	200	0.20	
						+0.11	0	120	0.60	
						-0.11	0	270	0.3750	

время как быстрые вследствие появления дифференциального вращения теряют дипольную конфигурацию и присоединяются к другим нормальным звездам, не имеющим заметного магнитного поля.

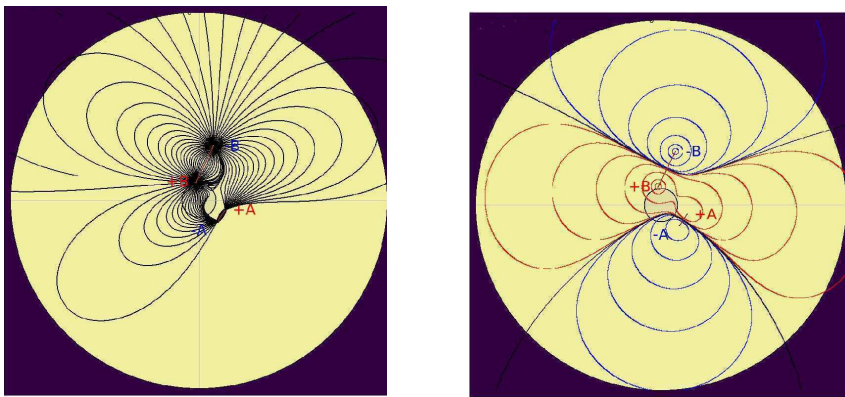
В свойствах внутренних структур магнитных полей все же заметны некоторые закономерности. В многодипольных звездах направления осей диполей, как правило, перпендикулярны к радиусу. Магнитные поля никогда не направлены в сторону одинаковых знаков [2, 3]. Возможно, дело в том, что в период гравитационного сжатия протозвездных облаков такая конфигурация более устойчива [19]. Маловероятно, что сжимающееся намагниченное

облако имеет сферическую форму, скорее всего, оно будет клочковатым. Однако со временем мелкие структуры путем омической диссипации исчезнут, после чего останется крупномасштабная долгоживущая магнитная полоидальная структура. Если намагниченная область расположена не в центре звезды, то на ее форму, по-видимому, будет влиять изменение плотности в направлении центра звезды, причем чем больше плотность, тем сильнее будет сжато облако вдоль радиуса. В результате будут получаться структуры, показанные схематически на рис. 3. На схеме плотность увеличивается влево, в сторону центра звезды, а контур

HD 10783



HD 32633



HD 45583

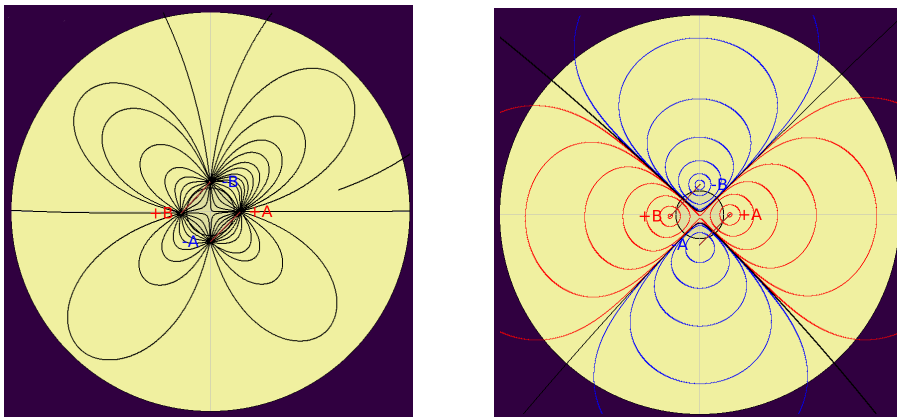
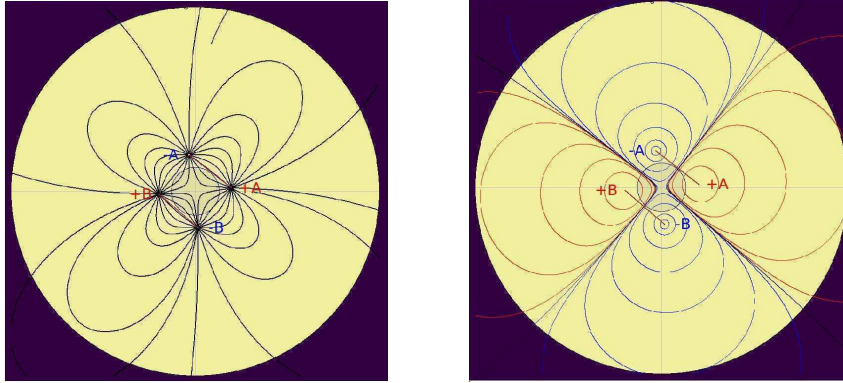


Рис. 4. Внутренние магнитные структуры звезд с основными диполями, наклоненными к плоскости экватора вращения ($\alpha > 10^\circ$) для звезд HD 10783, HD 32633, HD 45583. Слева — распределение силовых линий, справа — распределение напряженности магнитного поля.

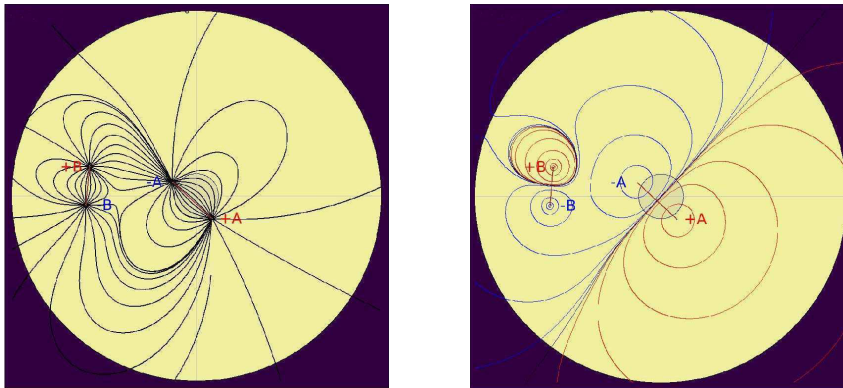
соответствует одинаковой величине магнитного поля. При коллапсе намагниченного фрагмента будет уменьшаться не только вдоль радиуса, но и поперек, но изменение вдоль более быстрое. Поэтому чем ближе фрагмент к центру звезды, тем более вытянутую форму поперек радиуса он приобретает

(рис. 3). Если размеры намагниченного облачка велики, то линии одинаковой плотности будут иметь вид кругов с центром слева. В таком случае форма намагниченной области будет иметь вид серпа, выгнутого вправо. Возможно, это является одной из причин того, что у большинства звезд оси

HD 137509



HD 223640



HD 343872

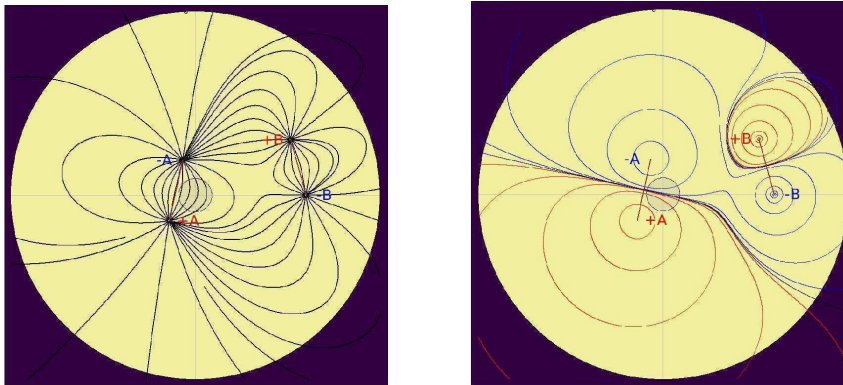


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для звезд HD 137509, HD 223640, HD 343872.

диполей направлены перпендикулярно радиусам. Описанная ситуация основана на наблюдательных данных. Однако эта проблема остается неясной с точки зрения магнитогидродинамической устойчивости рассмотренных структур.

Фактически изложенные в этой работе данные не противоречат реликтовой гипотезе происхождения магнитных звезд, а также предполагаемому сценарию их эволюции [22]. Из этого сценария

следует, что глобальные структуры магнитных полей приобретаются в период гравитационного коллапса, причем имеются признаки того, что они преодолевают нестационарную фазу Хаяши и стадию молодых лучистых звезд Ae/Be Хербига практически без искажения. Среди исследованных звезд имеются как молодые, HD 142301 (возраст $\lg t = 7.00$ [лет]), так и старые, HD 137909 ($\lg t = 8.93$ [лет]) объекты. Не заметно, чтобы меж-

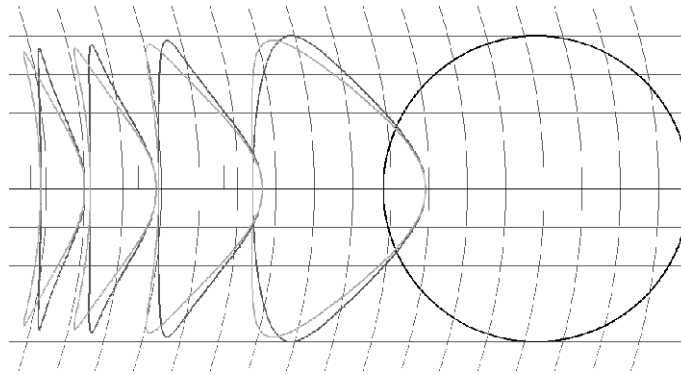


Рис. 6. Предполагаемая форма «магнитной» области (см. текст). Искажение первоначальной структуры градиентом плотности тем сильнее, чем ближе она к центру звезды, который расположен слева.

ду их структурами возникло принципиальное различие. Это свидетельствует о том, что структуры формируются на ранних стадиях эволюции и не изменяются в течение всей жизни. И значит, что внутри звезд нет никаких глобальных перемещений вещества, типа меридиональной циркуляции, дифференциального вращения и других крупномасштабных движений, которые вследствие вращенности магнитного поля внесли бы заметные искажения [2, 3].

Сложность состоит в том, что теория избирательного относительно угла α торможения протозвездных облаков разработана для однодипольных структур. Но как тормозятся звезды со сложными структурами? Эта проблема будет рассмотрена в следующей работе цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **59**, 164 (2016).
2. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **59**, 321 (2016).
3. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **71**, 453 (2016).
4. O. Kochukhov, S. Bagnulo, G. A. Wade, et al., *Astron. and Astrophys.* **414**, 613 (2004).
5. G. W. Preston, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **83**, 571 (1971).
6. H. W. Babcock, *Astron. J.* **56**, 116 (1951).
7. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **70**, 89 (2015).
8. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **72**, 305 (2017).
9. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *ASP Conf. Ser.* **510**, 245 (2017).
10. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68**, 338 (2013).
11. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **69**, 305 (2014).
12. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **71**, 453 (2016).
13. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **53**, 536 (2010).
14. Y. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 15 (2003).
15. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **56**, 407 (2013).
16. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68**, 78 (2013).
17. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **58**, 350 (2015).
18. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **72**, 305 (2017).
19. E. Flowers and M. A. Ruderman, *Astrophys. J.* **215**, 302 (1977).
20. D. Moss, *IAU Symp.* **224**, pp. 245–252 (2004).
21. T. C. Mouschovias and E. V. Paleologou, *Astrophys. J.* **230**, 204 (1979).
22. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57**, 315 (2014).

Possible Inner Magnetic Structures of the Magnetic Stars. I

Yu. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko

In this paper we consider two-dipole inner structures of magnetic fields of magnetic stars obtained by modeling. A series of our papers on modeling the structures including this paper shows that there is an extraordinary variety of structures and parameters of stellar magnetic fields. Actually, there are no two stars with exactly the same properties. This indicates a large variety of magnetized parent protostellar clouds, from which magnetic stars are formed.

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