

УДК 524.3–337, 524.35

ВЕРОЯТНЫЕ ВНУТРЕННИЕ МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД. II.

© 2020 Ю. В. Глаголевский^{1*}, А. Ф. Назаренко¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 8 августа 2020 года; после доработки 14 октября 2020 года; принята к публикации 14 октября 2020 года

Рассмотрены особенности простейших внутренних структур магнитного поля — центрального диполя и смещенного диполя. Отмечена их вековая стабильность, твердотельность вращения и большое разнообразие ориентации магнитных диполей и величин магнитных полей.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Этой работой мы заканчиваем серию статей, посвященных исследованию внутренних структур магнитного поля магнитных звезд (Gerth and Glagolevskij 2000; 2003a; 2007, Gerth et al. 1997, Glagolevskij 2011a; 2017, Glagolevskij and Nazarenko 2017a; b; 2018). Здесь рассматриваются простые структуры звезд, у которых магнитный диполь находится либо в центре звезды, либо смещен из центра. Обсуждаются основные свойства магнитных структур, перечисленные в статье I, но на основании изучения звезд с более простой, однодипольной структурой.

Интерес к структурам центрального диполя имеет большое значение, потому что их крайне длительная стабильность, вплоть до $t = 10^9$ лет, демонстрирует отсутствие в предыдущих фазах эволюции любых крупномасштабных движений масс, неминуемо нарушивших бы их структуры. Нет во внутренних областях таких процессов, как дифференциальное вращение, меридиональная циркуляция, крупномасштабная турбулентия и др. Не происходили также внешние воздействия, нарушающие первоначальные дипольные структуры. Мультиполи высокого порядка тоже дают небольшой интегральный эффект, но преобладающий компонент — дипольный. Этот фундаментальный вывод Престона (Preston 1971) является основой при моделировании магнитного поля магнитных звезд. Еще раньше Бэбкок (Babcock 1951) 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. В более поздние годы проведен целый ряд успешных исследований структур магнитного поля CP-звезд при предположении центрального диполя. Подробно теория моделирования магнитных структур представлена в работе Gerth and Glagolevskij (2003b).

Магнитным диполем принято считать магнитное поле элементарного кругового тока. В физике такое поле описывается элементарным магнитным диполем с противоположно заряженными виртуальными магнитными монополями, подобно электрическому диполю. Магнитный диполь — это физическая величина с магнитным моментом $M = Ql$, где Q — это «магнитный заряд» и l — расстояние монополя от центра. Трудно представить 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. В таком случае напряженность магнитного поля там будет равна бесконечности. Реальное моделирование большого количества магнитных структур показывает, что величина l имеет порядок долей радиуса звезды. В таком диполе силовые линии сходятся в точках расположения виртуальных монополей.

Для описания внутренней и поверхностной структуры при моделировании подбирается такой диполь, силовые линии которого вблизи поверхности звезды совпадают с наблюдаемыми силовыми линиями. Очевидно, что структура поля вблизи предполагаемого теоретического диполя другая, там поле полоидальное, это надо иметь в виду при рассмотрении рисунков. Практически во всех случаях модельные фазовые кривые изменения магнитного поля совпадают с наблюдаемыми в

*E-mail: glagol@sao.ru

Таблица 1. Звезды с центральным диполем

HD	Type	T_{eff} , K	B_s , G	R, R^*	$\alpha, ^\circ$	L	HD	Type	T_{eff} , K	B_s , G	R, R^*	$\alpha, ^\circ$	Refs
2453	SrCrEu	8230	3737	0.08	10	[1]	92664	Si	14340	1140	0.14	50	[4]
3360	He-r	21050	294	0.19	4	[2]	96446	He-r	23300	955	0.21	6	[8]
4778	SrCrEu	8970	2600	0.09	9	[2]	96707	SrCrEu	8150	841	0.08	48	[8]
5737	He-w	13730	3190	0.13	1.5	[2]	98088	SrCrEu	8150	1105	0.08	40	[8]
12098	Si+	7750	1690	0.08	44	[3]	107612	SrCrEu	8950	439	0.09	10	[4]
15144	SrCrEu	8300	1055	0.08	81	[4]	112185	SrCrEu	9510	330	0.09	8	[9]
22470	He-w	13320	2350	0.13	0	[5]	119213	SrCrEu	8600	1237	0.09	35	[8]
34736	Si	12800	814	0.12	2	[4]	122532	Si	11800	1064	0.11	4	[8]
35298	He-w	15200	2886	0.14	2	[6]	125248	SrCrEu	9420	7300	0.09	0	[4]
37058	He-w	19420	2665	0.19	5	[4]	133652	Si	13150	2200	0.12	50	[4]
49333	He-w	16600	1332	0.15	0	[4]	148199	Si	9500	1350	0.09	8	[4]
51418	SrCrEu	8470	1126	0.08	1	[7]	151965	Si	14800	9565	0.14	83	[4]
54118	Si	10350	5400	0.10	1	[7]	169842	SrCrEu	8390	2000	0.08	25	[8]
58260	He-r	19550	3063	0.18	65	[4]	184927	He-r	20600	3265	0.19	13	[8]
72968	SrCrEu	8700	1637	0.08	3	[4]	191612	O	35000	600	0.3	22	[4]
74521	SrCrEu	10600	889	0.10	73	[8]	200775	HAeBe	17000	3951	—	0	[10]
78316	He-w	13700	541	0.13	3	[8]	V381 Ori	HAeBe	10000	2010	—	0	[10]
83368	SrCrEu	7770	8400	0.08	0	[4]							

Refs: [1] — Glagolevskij and Gerth (2005); [2] — Glagolevskij (2009); [3] — Glagolevskij and Gerth (2010); [4] — Glagolevskij and Nazarenko (2016); [5] — Glagolevskij (2012b); [6] — Glagolevskij (2014b); [7] — Glagolevskij (2010); [8] — Glagolevskij (2020); [9] — Glagolevskij (2011b); [10] — Glagolevskij (2012a).

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 наблюдений при одних и тех же параметрах. Это подтверждает не только правильность модели, но и правильность измерений.

2. МОДЕЛИ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ДИПОЛЕМ

Параметры рассмотренных моделей приведены в таблице 1, причем за основу были приняты данные из работы Glagolevskij (2016). В последнем столбце дана ссылка на работу, в которой выполнено моделирование. Следует напомнить, что критерием правильности модели является выполнение требования, чтобы различие между модельной фазовой зависимостью и наблюдаемыми величинами во всех фазах заключалось в пределах 3σ . В таблице 1 приведены номер звезды HD, тип пекулярности, эффективная температура, среднее

поверхностное магнитное поле B_s , радиус конвективного ядра в единицах радиуса звезды $R_{(R^*)}$ (он зависит от температуры) и угол наклона оси диполя к плоскости экватора α .

Наблюдательные данные не позволяют определить методом моделей расстояние монополей Δa от центра звезды, как это было возможно при многодипольных структурах. Опыт моделирования сложных структур показал, что они не соответствуют точечному теоретическому диполю, для них всегда получаются $\Delta a > 0.1$. В данном случае модели строились при предположении долготы монополей $\lambda = 0^\circ$ и 180° . К звездам с центральным диполем мы относим те объекты, у которых величина смещения центра диполя от центра звезды $\Delta a < 0.05$. Модели различаются только величиной наклона α осей диполей к плоскости экватора. Для таких простейших структур нет необходимости представлять схемы силовых линий для каждой звезды. При-

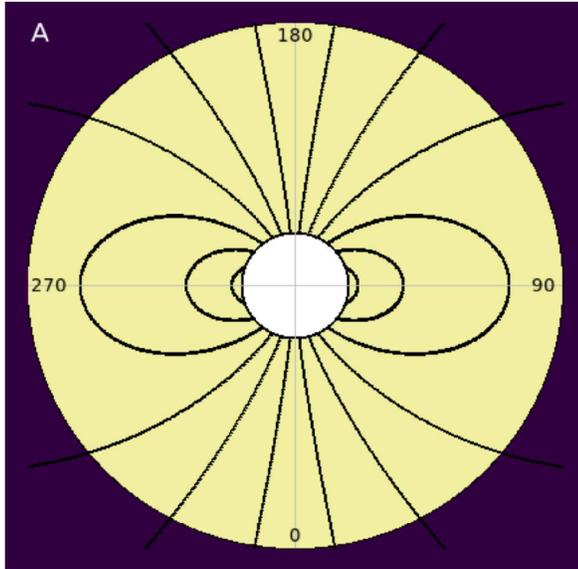
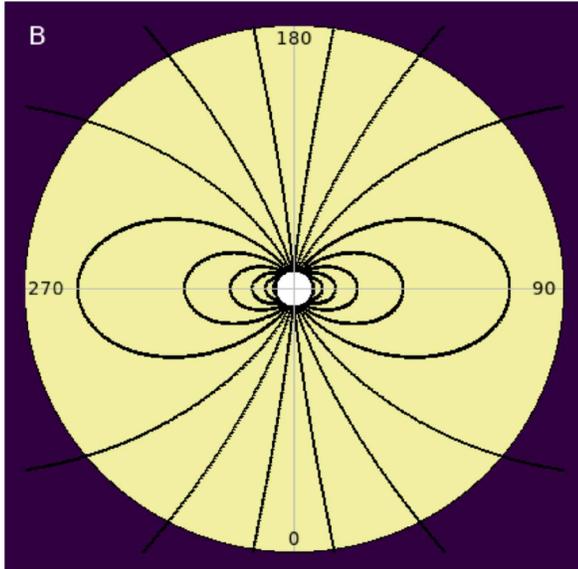
The central dipole, $\alpha=0^\circ$ The young star HD191612 $t=10^6$ yearsThe old star HD83368 $t=8 \cdot 10^8$ years

Рис. 1. Распределение силовых линий магнитного поля внутри звезды в случае моделей центрального диполя: (А) — при предположении «точечного» диполя с $\Delta a = 0$ (в случае молодой звезды), (В) — при предположении реального «длинного» диполя $\Delta a > 0$ (в случае старой звезды).

водим единственную схему, в которой ось диполя лежит в плоскости экватора (рис. 1А,В).

На рисунках показаны два варианта распределения поля внутри звезды: А — в случае предположения «точечного» диполя с $\Delta a = 0$ (молодая звезда), В — в случае реального «длинного» диполя с $\Delta a > 1$ (старая звезда). Круги в центре пока-

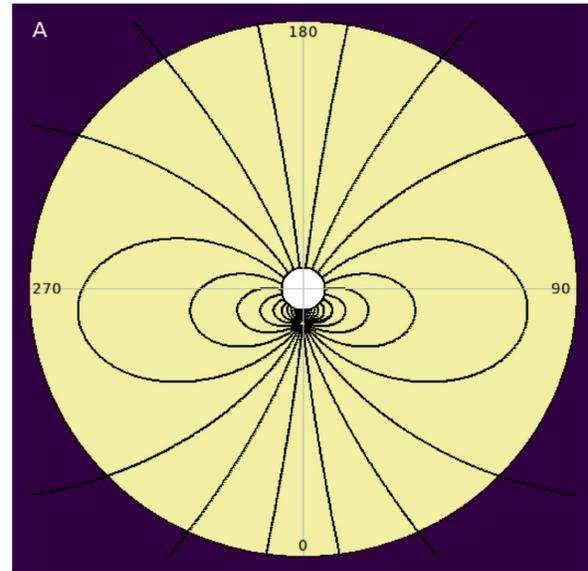
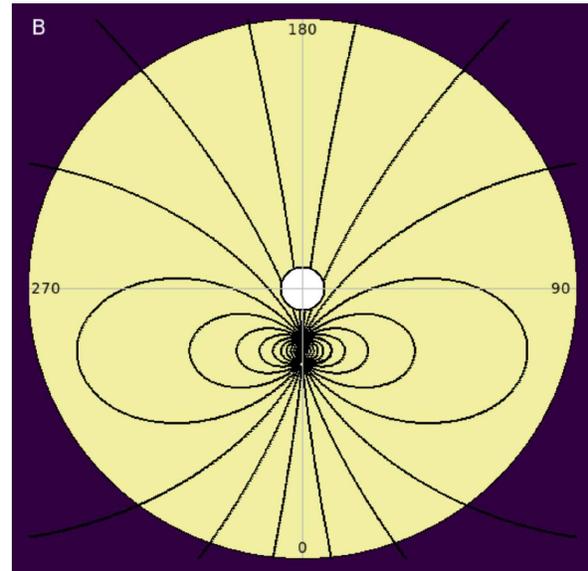
The displaced dipole, $\alpha=0^\circ$ The young star HD101412 $t=10^7$ yearsThe old star HD166473 $t=10^9$ years

Рис. 2. Распределение силовых линий магнитного поля внутри звезды в случае моделей смещенного вдоль оси диполя: (А) — при предположении реального «длинного» диполя с $\Delta a > 0$ в случае молодой звезды, (В) — при предположении реального «длинного» диполя $\Delta a > 0$ в случае старой звезды.

зывают приблизительные размеры конвективного ядра, в соответствии с температурой. Рисунок 1В показывает, как на самом деле распределены силовые линии. Силовые линии сходятся в центре звезды, а не в местах предполагаемых монополей. Видно, что общая картина распределения силовых линий в достаточном приближении одинакова. Такие же примеры можно сделать и в случае сме-

щенных диполей. При моделировании параметры диполя выбираются так, чтобы модельные силовые линии совпадали бы с наблюдаемыми линиями вблизи поверхности.

Силовые линии не могут проходить через конвективное ядро, потому что конвекция внутри ядра разрушает магнитное поле. В результате силовые линии крупномасштабного поля обходят конвективное ядро. Но это не значит, что виртуальные монополи должны обязательно находиться вне конвективного ядра. Они могут находиться внутри, куда сходятся продолжающиеся извне модельные силовые линии. В области с максимальной плотностью вещества магнитное поле должно было бы иметь тоже максимальную величину, если бы не конвективное ядро. «Выталкивание» силовых линий из области конвективного ядра приводит к сгущению силовых линий по его поверхности и усилению магнитного поля вокруг него. Очевидно, что здесь должно возникнуть неравновесное состояние, которое необходимо изучить в будущем.

3. МОДЕЛИ СО СМЕЩЕННЫМ ДИПОЛЕМ ВДОЛЬ ЕГО ОСИ

Магнитные диполи смещены на величину $\Delta a > 0.05$ (расстояние до средней точки между монополями) от центра звезды (рис. 2). Знаки в таблице 2 показывают в сторону какого монополя произошло смещение. Ошибка этой величины имеет порядок 0.05–0.1. Долгота обоих монополей в данном варианте выбирается как $\lambda = 0^\circ$ или 180° . Рисунки показывают структуру поля в плоскости оси диполя. В работе Glagolevskij and Nazarenko (2018) обсуждалась проблема искажения первоначального протозвездного намагниченного фрагмента после сжатия его в звезде под действием неравномерной плотности в звезде. В случае смещения его из центра звезды вдоль оси магнитного диполя намагниченная область, вероятно, будет тоже искажаться в сторону центра звезды. Внутри конвективного ядра полоидальное магнитное поле отсутствует.

4. МОДЕЛИ СО СМЕЩЕННЫМ ДИПОЛЕМ ПОПЕРЕК ЕГО ОСИ

В этих моделях в таблице 3 вводится дополнительный параметр — долгота каждого монополя λ (рис. 3). В отличие от предыдущих двух вариантов в данном случае модель показывает, что монополи находятся на расстоянии $r_{(R^*)}$ между собой. Ошибка величины Δa может достигать 0.1–0.15 радиуса звезды. Внутри конвективного ядра полоидальное магнитное поле отсутствует.

У нескольких объектов (HD 15144, HD 151965, HD 188041 и HD 119419) оси диполей оказываются под малым углом к оси вращения. При такой

Таблица 2. Звезды с диполем, смещенным вдоль его оси

HD	Type	T_{eff}, K	B_s, G	R, R^*	$\Delta a, R^*$	α, \circ	Refs
12288	SrCrEu	8300	7879	0.08	-0.08	±24	[1]
12447	Si+	9020	782	0.09	+0.20	0	[2]
14437	SrCrEu	10800	7665	0.10	+0.15	±2	[2]
37017	He-r	19900	2144	0.18	+0.10	±12	[3]
37479	He-r	22530	4312	0.19	+0.10	±15	[3]
49606	He-w	13800	141	0.13	-0.20	±21	[4]
55719	Si	8720	6501	0.09	-0.23	±5	[4]
59435	SrCrEu	8600	3234	0.08	+0.20	±40	[5]
62140	SrCrEu	7980	1566	0.08	-0.045	0	[5]
64740	He-r	23840	849	0.21	+0.20	±16	[5]
65339	SrCrEu	8350	13700	0.08	-0.45	±77	[6]
70331	Si	14300	12312	0.14	+0.03	±2	[7]
71866	SrCrEu	8450	3470	0.08	-0.05	±2	[5]
75049	SrCrEu	9350	28140	0.09	-0.10	±18	[3]
79158	He-w	13060	1762	0.12	+0.10	±2	[5]
81009	SrCrEu	8120	8301	0.08	+0.10	±69	[4]
101412	Ae	9500	535	0.08	-0.13	±13	[7]
112413	SrCrEu	11280	2600	0.12	+0.10	±9	[6]
116458	He-w	10000	4676	0.10	+0.07	±78	[6]
118022	SrCrEu	9050	1270	0.09	+0.10	±25	[6]
124224	Si	12280	2200	0.12	-0.30	±3	[6]
133029	Si+	11030	6157	0.10	-0.30	±35	[8]
133880	Si	12000	5300	0.11	-0.20	±16	[7]
147010	Si+	7400	12000	0.07	+0.45	±65	[6]
318107	Si+	11800	13307	0.11	+0.11	±5	[4]
166473	SrCrEu	7760	7649	0.08	-0.28	±15	[4]
187474	Si+	10240	5317	0.10	-0.10	±66	[6]
188041	SrCrEu	8450	3663	0.09	-0.07	±83	[6]
196178	Si	13600	1847	0.13	-0.15	±40	[8]
200311	Si+	13500	8568	0.13	+0.08	±4	[1]
215441	Si	15960	34000	0.15	+0.03	±80	[9]

Refs: [1] — Glagolevskij and Gerth (2005); [2] — Glagolevskij and Gerth (2010); [3] — Glagolevskij (2012a); [4] — Glagolevskij and Nazarenko (2015); [5] — Glagolevskij (2010); [6] — Glagolevskij (2011b); [7] — Glagolevskij (2014b); [8] — Glagolevskij and Nazarenko (2016); [9] — Glagolevskij (2009).

конфигурации модельная структура определяется с меньшей уверенностью.

Звезд со смещением диполей вдоль их оси в однопольных структурах много больше, чем звезд со смещением диполя поперек силовых линий. Это, несомненно, связано с условиями гравитационного коллапса в присутствии магнитного поля. Коллапс вдоль силовых линий происходит легче, чем поперек.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрим еще раз проблемы, обсуждаемые в статьях Gerth and Glagolevskij (2000; 2003a; 2007), Gerth et al. (1997), Glagolevskij (2011a; 2017), Glagolevskij and Nazarenko (2017a; b; 2018), а также результаты этой работы. Методика моделирования, представленная в этих работах, основана на предположении, что структуры магнитных полей имеют полоидальный характер, которые описываются в первом приближении виртуальными теоретическими магнитными диполями, у которых расстояние между монополями не равно нулю. Моделирование более 120 звезд подтвердили это предположение.

Наблюдается большое разнообразие структур и величин магнитных полей, которое может свидетельствовать о наличии таких же разнообразных свойств в протозвездных родительских облаках. В пределах наших настоящих представлений можно предполагать, что наблюдаемые однодипольные и многодипольные структуры ни в нестационарной фазе Хаяши, ни в фазе молодых звезд НАеВе (Ае/Ве Хербига) формироваться не могут. Других предположений пока нет. В молодых стационарных звездах с лучистым переносом возникают условия, при которых происходит релаксация запутанного в фазе Хаяши магнитного поля в полоидальные структуры.

Несмотря на разнообразие структур, наблюдается несколько основных типов магнитных крупномасштабных конфигураций: 1) диполь находится в центре звезды, 2) диполь смещен вдоль его оси, 3) диполь смещен поперек его оси, 4) внутри находится два или три смещенных поперек оси диполя. Наблюдается преимущественная ориентация магнитных диполей в пределах $\alpha = 0-20^\circ$. В этом диапазоне углов количество звезд на 1° в 5 раз больше, чем в диапазоне $\alpha = 20-90^\circ$. Этот факт подтверждает правильность механизма «магнитного» торможения, которое избирательно по отношению к углу α протозвездных облаков, разработанного в (Glagolevskij and Nazarenko 2015).

Нет признаков того, что структуры магнитного поля формируются каким-либо другим механизмом, кроме реликтового. Исходя из этой гипотезы, можно предполагать, что звезды с центральным

Таблица 3. Звезды с диполем, смещенным поперек его оси

HD	Type	T_{eff}, K	$R_{(R^*)}$	$\Delta a, R$	α, deg	λ, deg	$r_{(R^*)}$	Refs
21699	He-w	15170	0.14	0.4	0	0	0.28	[1]
				0.4	0	55		
25267	Si	12150	0.10	0.37	7	280	0.14	[2]
				0.37	7	310		
40312	Si	10310	0.10	0.3	5	110	0.12	[1]
				0.3	5	0		
119419	Si	11120	0.10	0.05	+73	0	0.03	[1]
				0.05	-73	45		
126515	SrCrEu	9260	0.09	0.4	0	0	0.3	[1]
				0.3	0	45		

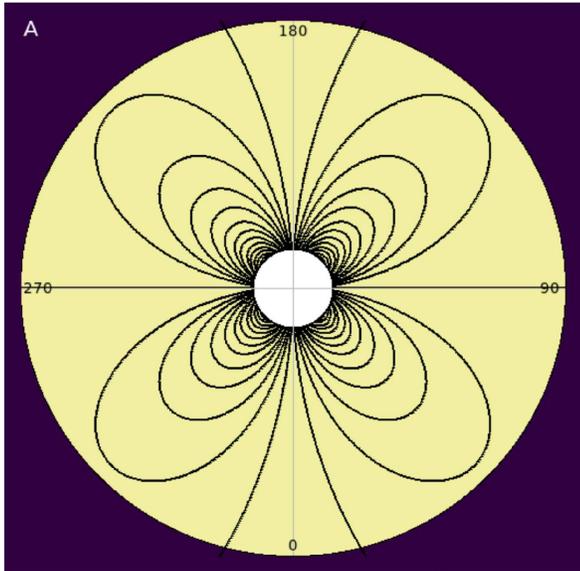
Refs: [1] — Glagolevskij (2011b); [2] — Glagolevskij and Nazarenko (2015).

магнитным диполем ($\Delta a = 0$) произошли либо из равномерно намагниченного протозвездного облака, либо из облака, в котором величина поля пропорциональна плотности Glagolevskij (2014a). Если облако намагничено неравномерно, или величина поля не пропорциональна плотности, то возникает протозвезда с максимумом магнитного поля, не совпадающим с центром гравитации ($\Delta a \neq 0$).

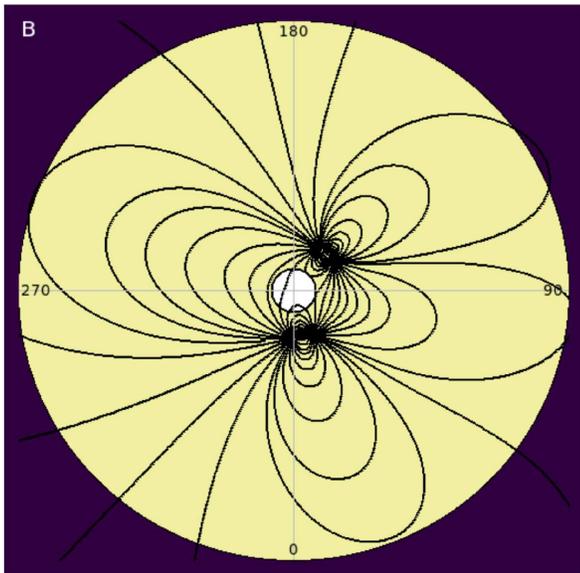
Среди промоделированных нами однодипольных звезд 34 (39%) оказались с центральным диполем и 36 (41%) со смещенным диполем. В то же время звезд со сложной крупномасштабной структурой относительно мало — 19%. У большого числа звезд точная модель не установлена вследствие недостатка точных измерений. Большое число звезд с центральным диполем свидетельствует о том, что ни в нестационарной фазе Хаяши, ни в более поздних периодах жизни молодых звезд НАеВе нет процессов, искажающих крупномасштабные структуры магнитного поля, которые сформировались в фазе гравитационного коллапса. Этот факт показывает также, что нет крупномасштабных движений внутри магнитных звезд, и звезды вращаются твердотельно. Эта проблема уже обсуждалась в работах Glagolevskij (2017), Mouschovias and Paleologou (1979).

Существует мнение, что в нестационарной фазе Хаяши происходят процессы, приводящие только к мелкомасштабным пертурбациям магнитного поля, вызывающим формирование структур типа жгутов, ячеек, волокон и др. (Moss 2004), остатки которых наблюдаются и в настоящее время (Kochukhov

The two-dipole structure, $\alpha = 0^\circ$



The young star HD35502 $t = 2.5 \cdot 10^7$ years



The old star HD137909 $t = 8 \cdot 10^8$ years

Рис. 3. Распределение силовых линий магнитного поля внутри звезды в случае моделей смещенных поперек оси диполей: (А) — при предположении реального «длинного» диполя с $\Delta\alpha > 0$ в случае молодой звезды, (В) — при предположении реального «длинного» диполя $\Delta\alpha > 0$ в случае старой звезды.

et al. 2004) на фоне глобальных крупномасштабных полоидальных структур. Они быстро исчезают вследствие, в основном, омической диссипации и остаются только крупномасштабные магнитные структуры, которые из-за медленной омической диссипации могут сохраняться теоретически до

$t = 10^{10} - 10^{11}$ лет. Напомним, что максимальное время жизни звезд SrCrEu-типа равно $t = 10^9$ лет.

Крупномасштабная полоидальная фракция магнитного поля стабильна, так как время омического распада магнитного поля пропорционально квадрату размеров этих структур. Это показывает, что за время жизни магнитных звезд на Главной последовательности полный магнитный поток остается практически неизменным, тем более у массивных быстро эволюционирующих объектов. Учитывая то, что магнитное поле разрушается в основном только вследствие омической диссипации, трудно предположить, что внутри старых звезд существует любая другая структура, более сложная, чем полоидальная.

Мелкомасштабные искажения магнитных структур, произошедшие в нестационарной фазе Хаяши, приводят к уменьшению общего магнитного поля, наблюдаемого у молодых НАеВе звезд. Наличие большого числа звезд с двух- и трехдипольными долго живущими структурами противоречит предположению Braithwaite and Nordlund (2006) об обязательном присутствии тороидальной компоненты.

Среди исследованных звезд есть как очень молодые, так и очень старые объекты. Сложные структуры и структуры с центральным диполем встречаются среди тех и других. При исследовании переменности магнитных полей и их структур, связанной с вращением, выяснилось, что форма фазовых зависимостей определяется только положением и ориентацией магнитных диполей внутри звезд. Долговременная стабильность структур, при условии вмороженности магнитного поля, позволяет предполагать полное отсутствие внутри звезд меридиональной циркуляции, дифференциального вращения и других глобальных перемещений масс. Например, звезды HD 965, HD 12098, HD 24712, HD 38823, HD 147010 имеют возраст $\lg t = 8.9 - 9.0$, а HD 35298, HD 37022, HD 191612, HD 200775, V381 Ori — $\lg t = 6.0 - 7.0$.

Мы видим различие в возрасте в два порядка. Все эти звезды имеют структуру центрального диполя. Такой же пример можно привести для звезд со смещенным вдоль оси диполем HD 64740 ($\lg t = 7.08$) и HD 166473 ($\lg t = 9.00$). За такое громадное время жизни конфигурация магнитного поля не изменилась. Величины смещения из центра у них одинаковые. Очевидно, что магнитные звезды вращаются твердотельно. Вероятно, этому способствует медленное вращение и вмороженность магнитного поля. Существование значительного числа звезд с симметричными относительно центра дипольными структурами свидетельствует об отсутствии в прошлом процессов, искажающих их. Приходим к предположению, что ни в нестационарной фазе Хаяши, ни в фазе НАеВе (Ае/Ве Хербига)

нет процессов, искажающих крупномасштабные структуры магнитного поля, которые сформировались в фазе гравитационного коллапса.

Магнитные звезды после прохождения фазы НАеВе имеют слабое магнитное поле, которое после выхода на ZAMS начинает расти вследствие омического распада мелких структур, вследствие эффекта натяжения магнитных силовых линий, а также исчезновения верхних нестационарных слоев. Это приводит к тому, что отношение крупномасштабной и мелкомасштабной фракций магнитного поля постепенно растет, вплоть до конца жизни магнитной звезды — $t = 10^9$ лет. Но на зависимости (величина поля — возраст) рост магнитного поля продолжатся только в течение половины времени их жизни на Главной последовательности (Glagolevskij 2018), после чего оно уменьшается вследствие преобладающего действия эволюционного увеличения радиуса.

Значительной проблемой является влияние конвективного ядра на близлежащие к нему области магнитного поля. Чтобы сохранить общий поток магнитные силовые линии должны огибать конвективное ядро. «Выталкивание» силовых линий из области конвективного ядра должно приводить к сгущению силовых линий и усилению магнитного поля вокруг него. Нарушение полоидальной структуры, очевидно, должно приводить к аномальным градиентам магнитного поля в этой области и возникновению неравновесного состояния, которое необходимо изучить в будущем.

Кажется, что звезды с простыми однодипольными конфигурациями должны терять момент вращения на ранних стадиях эволюции сильнее, чем со сложными структурами Mouschovias and Paleologou (1979). Попытка найти признаки такого поведения не привела к успеху. Слишком мала статистика, кроме того, потеря момента вращения зависит от многих факторов — от величины магнитного поля, массы протозвезды, длительности ее эволюции Glagolevskij (2017). Все эти свойства сложным образом переналагаются, приводя к большому разбросу точек на искомым зависимостях.

При рассмотрении схем распределения силовых линий на рис. 1, 2, 3 надо учитывать, что виртуальных монополей на самом деле нет. Силовые линии в области предполагаемых диполей реально имеют полоидальную структуру, но параметры диполя выбираются при моделировании так, чтобы наблюдаемые и теоретические силовые линии на некотором расстоянии от диполя, тем более в верхних слоях звезды, совпадали. Несмотря на разнообразие структур магнитных полей, среди них наблюдаются некоторые общие свойства, например:

а) оси диполей в случае сложных, двух- и трехдипольных структур, чаще направлены перпендикулярно радиусам звезды. Расчеты показывают, что намагниченная в звезде область сплющивается, вытягиваясь в направлении, перпендикулярном радиусу вследствие влияния градиента плотности;

б) в однодипольных структурах смещение диполей происходит преимущественно вдоль радиусов, что, несомненно, связано с условиями коллапса в присутствии магнитного поля. Коллапс вдоль силовых линий происходит легче, чем поперек, поэтому звезд со смещением поперек силовых линий мало;

в) в многодипольных структурах диполи направлены всегда в сторону разных зарядов. Повидимому, такие конфигурации в протозвездных намагниченных облаках более устойчивы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. W. Babcock, *Astron. J.* **56**, 116 (1951).
2. J. Braithwaite and Å. Nordlund, *Astron. and Astrophys.* **450** (3), 1077 (2006).
3. E. Gerth and Y. V. Glagolevskij, in *Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, ed. by Y. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (Nizhnij Arkhyz, 2000), pp. 151–157.
4. E. Gerth and Y. V. Glagolevskij, *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory* **56**, 25 (2003a).
5. E. Gerth and Y. V. Glagolevskij, *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory* **56**, 25 (2003b).
6. E. Gerth and Y. V. Glagolevskij, in *Physics of Magnetic Stars*, ed. by I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, O. M. Neizvestnaya, and V. M. Shapoval (Nizhnij Arkhyz, 2007), pp. 148–168.
7. E. Gerth, Y. V. Glagolevskij, and G. Scholz, in *Stellar Magnetic Fields*, ed. by Y. Glagolevskij and I. Romanyuk (Nizhnij Arkhyz, 1997), pp. 67–75.
8. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **64** (1), 62 (2009).
9. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **65** (1), 34 (2010).
10. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **66** (2), 144 (2011a).

11. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **66** (2), 144 (2011b).
12. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **55** (2), 169 (2012a).
13. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **67** (3), 264 (2012b).
14. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57** (3), 315 (2014a).
15. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 305 (2014b).
16. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **59** (3), 321 (2016).
17. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 305 (2017).
18. Y. V. Glagolevskij, in press (2018).
19. Y. V. Glagolevskij, in press (2020).
20. Y. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory* **58**, 31 (2005).
21. Y. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Astrophysical Bulletin* **65** (2), 164 (2010).
22. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **70** (1), 89 (2015).
23. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 453 (2016).
24. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *ASP Conf. Ser.* **510**, 245 (2017a).
25. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **72** (4), 411 (2017b).
26. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysical Bulletin* **73** (2), 201 (2018).
27. O. Kochukhov, S. Bagnulo, G. A. Wade, et al., *Astron. and Astrophys.* **414**, 613 (2004).
28. D. Moss, *IAU Symposium* **224**, 245 (2004).
29. T. C. Mouschovias and E. V. Paleologou, *Astrophys. J.* **230**, 204 (1979).
30. G. W. Preston, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **83** (495), 571 (1971).

Probable Inner Magnetic Structures of Magnetic Stars. II.

Yu. V. Glagolevskij¹ and A. F. Nazarenko¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The features of the simplest inner structures of a magnetic field, the central dipole and the shifted dipole, are considered. Their secular stability, solidity of rotation, and a great variety of orientations of magnetic dipoles and magnitudes of magnetic fields are noted.

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