

ВЕКОВАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУР МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МАГНИТНЫХ СР-ЗВЕЗДАХ

Ю.В.ГЛАГОЛЕВСКИЙ, А.Ф.НАЗАРЕНКО

Поступила 8 апреля 2019

Принята к печати 13 сентября 2019

Исследованы структуры магнитных полей звезд разного возраста. Не найдены изменения положения и ориентации магнитных диполей с возрастом. Сделан вывод об отсутствии глобальных движений внутри магнитных звезд, таких как дифференциальное вращение, меридиональная циркуляция и др. Приведены доводы в пользу предположения, что магнитные звезды вращаются твердотельно. Выводы не касаются поведения конвективных ядер.

Ключевые слова: *звезды: магнитные поля - звезды: эволюция - звезды: магнитные структуры - звезды: возрасты*

1. *Введение.* Исследование геометрии магнитных полей химически пекулярных звезд и их стабильности имеет ключевое значение в проблеме происхождения и эволюции звезд этого типа. По мере накопления наблюдательных данных изменялись и уточнялись знания о природе магнитных СР-звезд. В частности, решение проблемы вековой стабильности структур магнитного поля важно для решения проблемы магнитного динамо. Год за годом мы все больше начинаем понимать что такое магнитные химически пекулярные СР-звезды.

Пионерские работы Бэбкока [1,2] посвящены открытию первых магнитных звезд, имеющих структуры магнитного поля, подобные теоретическому магнитному диполлю.

Шварцшильд [3] и Стиббс [4] разработали теорию наклонного магнитного ротатора с магнитным диполем в центре звезды.

Бэбкок [5,6] высказывал мнение, что по виду профилей спектральных линий магнитное поле не принадлежит отдельным пятнам, как на Солнце, звезда намагничена целиком и структура поля имеет доминирующий дипольный характер, хотя присутствие мультиполей высокого порядка возможно. Он также ввел понятие наклонного магнитного ротатора.

Дейч [7-11] изучал магнитные звезды в рамках модели жесткого наклонного ротатора с диполем в центре звезды. Однако он заметил, что не все звезды имеют магнитный диполь в центре.

Бэбкок [12] обсуждает модель наклонного ротатора для магнитных звезд и утверждает, в частности, что в них не может быть дифференциального вращения, которое быстро разрушило бы наблюдаемые структуры магнитного поля. Возможно, сильное магнитное поле обеспечивает внутреннюю жесткость магнитных звезд.

Бем-Витензе [13,14] исследованы свойства центрального диполя, а также сферически-несимметричные структуры магнитных структур.

Престон [15] впервые исследовал ориентацию магнитных диполей внутри звезд. Он обнаружил наличие преимущественной ориентации магнитных диполей в плоскости экватора.

Пайпер [16] подтвердила правильность гипотезы о том, что все магнитные звезды являются наклонными ротаторами с осями диполей, наклоненными к оси вращения, и что нет никаких признаков перемещения ни магнитного поля, ни химических аномалий по поверхности, т.е. магнитная звезда ведет себя как жесткий ротатор.

Ландстрит [17] исследовал структуры магнитного поля звезд при предположении наклонного к оси вращения (на угол β) центрального диполя и смещенного диполя. Его исследование смещенных из центра диполей, также как и исследование сложных структур с помощью моделирования, оказалось важным для решения проблемы происхождения магнитных звезд.

Престон [18], на основании работы Стиббса [4], разработал простейший вариант модели наклонного ротатора с диполем, находящимся в центре звезды. На ранних этапах разными авторами было успешно выполнено много работ с применением этой модели. Престон допускал присутствие мультиполей высокого порядка, но он считал, что преобладающий компонент - дипольный.

Штифт [19,20] усовершенствовал теорию смещенного магнитного диполя, которая позволяет исследовать диполь в любой точке внутри звезды, наклоненный на любой угол к оси вращения. Смещение диполя также может быть в любом направлении. Разработанная методика позволила объяснить некоторые непонятные тогда свойства магнитных звезд.

Важнейший вывод сделал Матисс [21] о том, что не заметно, чтобы на структуры магнитных полей налагалось мелкомасштабное поле, потому что нет существенного поглощения на номинальной длине волны в центре линии, расщепленной в магнитном поле. Оказывается, что магнитное поле покрывает всю поверхность. Такое мнение целиком поддерживает аналогичное мнение Бэбкока [5,6]. Но слабые остатки мелкомасштабной фракции, по-видимому, все еще наблюдаются на магнитных звездах [22].

2. Моделирование магнитных полей. Мы посчитали достаточно обоснованными предположения разных авторов о дипольных структурах

магнитного поля химически пекулярных звезд. На основе этого предположения нами была создана программа [23-26] для моделирования крупномасштабных структур магнитного поля на основе использования фазовых зависимостей продольного $Be(\Phi)$ или среднего поверхностного $Bs(\Phi)$ магнитного поля, полученных разными авторами. Программа дает возможность подбирать положение и ориентацию виртуальных магнитных диполей внутри звезд методом последовательных приближений так, чтобы наблюдаемая и вычисленная фазовые зависимости отличались бы не более, чем на 3σ на всех фазах периода изменений магнитного поля звезд. Программа позволяет задавать любое количество диполей внутри звезд. При этом получаются все основные параметры магнитного поля - среднее поверхностное магнитное поле Bs , магнитное поле на полюсах Bp , угол наклона оси диполя к плоскости экватора α , расстояние диполя от центра звезды Δa , меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности, а также теоретические фазовые зависимости $Bs(\Phi)$ и $Be(\Phi)$. На основании полученных данных оказалось возможным вычислить распределение крупномасштабного магнитного поля и силовых линий в любом разрезе внутри звезды. Особенно интересны такие распределения в плоскости магнитного диполя для сложных двухдипольных и трехдипольных структур [27-29]. К настоящему времени подробно описаны 120 моделей [30-32]. Столь большое количество исследованных одинаковой методикой звезд позволяет окончательно решить проблему о дипольной (точнее полоидальной) структуре крупномасштабной фракции магнитных полей CP-звезд.

Одним из важнейших результатов моделирования является получение средних поверхностных величин магнитного поля Bs . Их использование в статистических работах предпочтительней часто применяемых средних квадратических значений $\langle Be \rangle$, которые зависят от угла наклона звезды к лучу зрения. Правильность моделей проверена по звездам, магнитное поле которых измерено по расщепленным компонентам в неполяризованном свете [21]. Уверенность в результатах подтверждается также тем, что моделирование звезд по фазовым зависимостям $Be(\Phi)$ и $Bs(\Phi)$ приводит к одинаковым параметрам. Это обстоятельство указывает не только на правильность моделирования, но и на правильность измерений. Вследствие неравномерного распределения химических элементов по поверхности, величины параметров, особенно величина магнитного поля, зависят некоторым образом от того, по каким линиям измерялось поле. При статистических исследованиях это создает некоторое рассеяние точек на зависимостях. Этого недостатка практически нет при измерениях магнитного поля по линиям водорода. Распределение магнитного поля по поверхности и внутри звезд практически не зависит от этого эффекта. Возрасты магнитных звезд в работе [32] определены по

эволюционным трекам из работы [33].

Интересно, что крупномасштабное магнитное поле центрального диполя наблюдается только у $\sim 16\%$ магнитных звезд, в остальных случаях структура поля описывается смещенным диполем или она является многодипольной. В работах [34,35] показано, что на основании результатов моделирования наблюдаемые магнитные структуры можно разделить на 4 основных типа: 1) магнитный диполь расположен в центре звезды; 2) диполь смещен из центра вдоль оси диполя; 3) диполь смещен из центра поперек силовых линий и 4) сложные структуры, описываемые двумя или тремя диполями.

Для многих звезд число измерений и точность недостаточны для выяснения типа структуры, поэтому для них задавалась (присваивалась) структура центрального диполя. Таких звезд в табл.1 27%. Надо отметить, что такое представление приводит к параметрам, достаточно близким к точным результатам и их можно использовать в статистических исследованиях. Ценность серии наших работ по исследованию структур магнитных полей состоит в том, что они выполнены единой методикой.

Таблица 1

ДОЛЯ ЗВЕЗД С РАЗНОЙ СТРУКТУРОЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Структура крупномасштабного поля	Доля звезд, %
Центральный диполь	16
Смещенный вдоль оси диполь	34
Смещенный диполь поперек оси	12
Двух- и трехдипольная структура	11
Неизвестная структура	27

3. *Вековая стабильность магнитных структур.* Среди исследованных магнитных звезд с разными структурами имеются как очень молодые с возрастом $t = 10^6$ лет, так и предельно старые объекты с $t = 10^9$ лет. Наша задача состояла в том, чтобы определить, есть ли признаки вековых изменений в структурах. Изменение структур магнитного поля со временем может указывать на то, что внутри магнитных звезд существуют движения масс, такие как меридиональная циркуляция, дифференциальное вращение, турбулентия и т.д. Из обзора, приведенного во *Введении*, видно, что уже на ранних стадиях изучения магнитных звезд возникали предположения о стабильности структур магнитных полей. Но на очень больших временах изменения могут быть заметными. Теоретически время омической диссипации магнитного поля может происходить за время $t = 10^{10} - 10^{11}$ лет, хотя макси-

мальный возраст магнитных звезд $t = 10^9$ лет. Существование магнитных звезд такого возраста с простыми структурами магнитного поля, соответствующими центральному диполю, лежащему в плоскости экватора, уже достаточно хорошо демонстрирует необычайно высокую стабильность магнитных структур звезд. Легче можно себе представить, что крупномасштабные движения вещества внутри звезд приведут простые дипольные конфигурации к сложным, но не наоборот. Тем более, что омическая диссипация, натяжение силовых линий и другие эффекты действуют в сторону упрощения структур.

В табл.2 и рис.1 отобраны данные для двух групп звезд - предельно молодых и предельно старых, имеющих структуры магнитного поля центрального диполя, ориентированного во всех случаях вблизи плоскости экватора. Температура, величина магнитного поля и возраст взяты из работы [32]. В последнем столбце L приведена ссылка на работу, в которой получена модель магнитного поля звезды, в том числе параметр α - угол наклона оси диполя

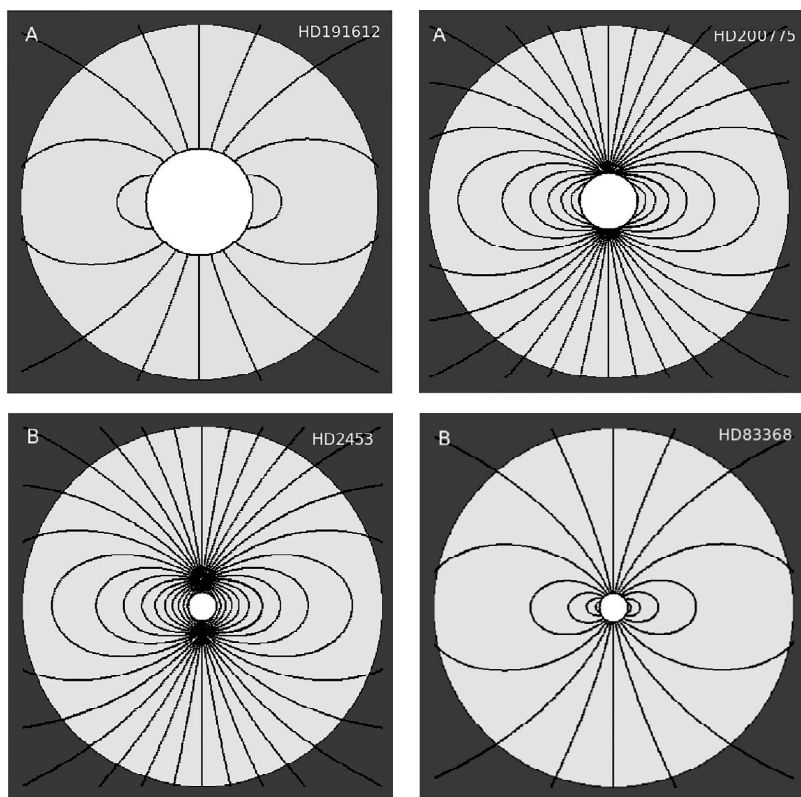


Рис.1. Схемы магнитных силовых линий в звездах с центральным диполем. А - молодые звезды (левый рисунок HD191612, правый рисунок HD200775). В - старые звезды (левый рисунок HD2453, правый рисунок HD83368).

Таблица 2

ЗВЕЗДЫ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ДИПОЛЕМ

HD	$T_{\text{эф}}$, K	B_s , Гс	α , град.	t , год	L
191612	35000	600	22	10^6	36
200775	17000	3951	0	10^6	37
2453	8230	3737	10	$8 \cdot 10^8$	34
83368	7770	8400	0	$8 \cdot 10^8$	38

к плоскости экватора. Пример, приведенный в табл.2, показывает, что возраст не оказывает на структуру магнитного поля никакого влияния - диполи у самых старых звезд остаются в центре звезды, угол α остается малым. Самые старые звезды примерно в 800 раз старше молодых. Если бы внутри звезд существовало перемещение масс, то вследствие вмерзновенности магнитного поля структура его изменялась бы, в старых звездах центральный диполь не мог бы сохраниться. На рис.1 показаны внутренние структуры указанных звезд. Круги в центре показывают положение конвективного ядра, размеры его соответствуют температуре.

В табл.3 и рис.2 приведены такие же данные для звезд, у которых магнитный диполь смещен вдоль его оси. Параметр Δa показывает величину смещения диполей в единицах радиуса звезды. Из данных этой таблицы можно сделать вывод, аналогичный предыдущему. Угол α у старых звезд по-прежнему мал, величина смещения диполя Δa остается такого же порядка. Максимальное отношение возрастов отобранных звезд порядка 100.

В нашем списке звезд с диполями, смещенными поперек их оси, нет объектов с существенно разными возрастами, поэтому мы их не рассматриваем. Данные для звезд с двухдипольными структурами приведены в табл.4 и рис.3. Параметры приведены только для основного, сильного диполя. Из таблицы видно, что одинаковые конфигурации наблюдаются как среди молодых, так и среди старых объектов. В таблице мы также не замечаем признаков вековых изменений структур магнитного поля. Различия в расположении диполей есть, но они связаны с большим разнообразием конфигураций магнитного поля

Таблица 3

ЗВЕЗДЫ С ДИПОЛЕМ, СМЕЩЕННЫМ ВДОЛЬ ЕГО ОСИ

HD	$T_{\text{эф}}$, K	B_s , Гс	α , град.	Δa , R	t , год	L
64740	23840	849	16	0.20	10^7	39
101412	9500	535	13	0.13	10^7	36
55719	8720	6501	5	0.23	$6 \cdot 10^8$	40
166473	7760	7649	15	0.28	10^9	40

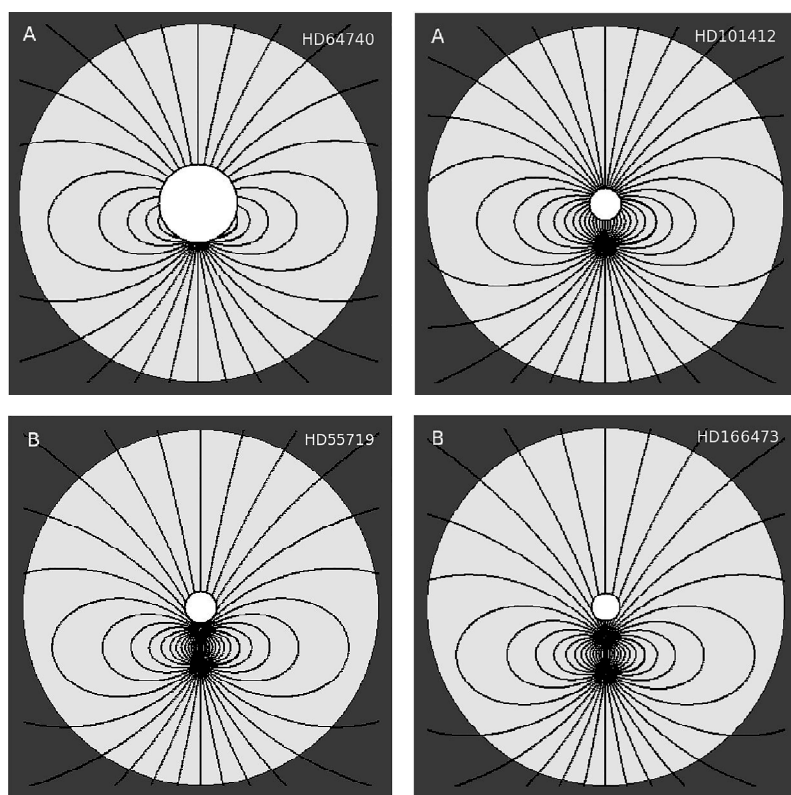


Рис.2. Схемы магнитных силовых линий в звездах со смещенными вдоль их оси диполями. А - молодые звезды (левый рисунок HD64740, правый рисунок HD101412). В - старые звезды (левый рисунок HD55719, правый рисунок HD166473).

в родительских протозвездных облаках и какой-либо зависимости от возраста нет. На основании данных, представленных в таблицах, делаем заключение, что магнитные звезды стабильны и вращаются твердотельно. Максимальное отношение возрастов звезд в табл.4 порядка 400.

Таблица 4

ЗВЕЗДЫ С ДВУМЯ ДИПОЛЯМИ

HD	T_{eff} , К	B_s , Гс	α , град.	Δa , R_s	t , год	L
35502	16060	6500	10	0.15	$2 \cdot 10^6$	38
142301	16250	6425	3	0.4	10^7	38
137909	7910	5620	5	0.18	$8 \cdot 10^8$	38
152107	8820	4100	7	<0.5	$5 \cdot 10^8$	38

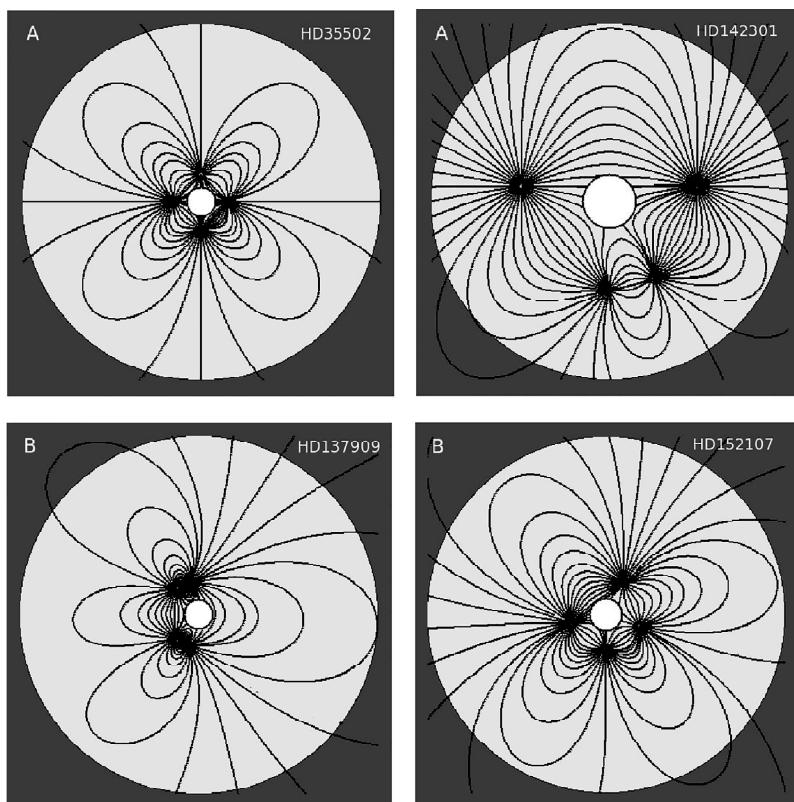


Рис.3. Схемы магнитных силовых линий в звездах с двумя диполями. А - молодые звезды (левый рисунок HD35502, правый рисунок HD142301). В - старые звезды (левый рисунок HD137909, правый рисунок HD152107).

4. *О твердотельности вращения магнитных звезд.* Есть возможность рассмотреть проблему стабильности структур по-другому. При моделировании магнитных структур мы получаем два параметра - α и Δa . Эти параметры очень чувствительны к изменениям структуры поля. Данные для построения зависимостей α и Δa от возраста взяты из работ [31,32]. На рис.4а приведены зависимости $\alpha(\log t)$ для Si+SrCrEu объектов, на рис.4б для He-r+He-w звезд. Изменений с возрастом на обоих рисунках не заметно, угловые коэффициенты прямой регрессии незначимы. На рисунках штриховой линией обозначена граница, внутри которой находятся звезды с диполями в плоскости экватора. На рис.5а, б показаны зависимости $\Delta a(\log t)$ для тех же групп звезд. На них тоже нет хода с возрастом. Из рассмотрения всех рисунков можно сделать вывод, что структуры магнитного поля с возрастом не меняются. Создается впечатление, что звезды с гелиевыми аномалиями

имеют только $\alpha = 0 - 20^\circ$, но, возможно, это возникает вследствие малой статистики. Рассмотренные примеры еще раз подтверждают постоянство структур магнитного поля в течение всей жизни магнитных звезд на Главной последовательности. Вследствие вмороженности магнитного поля, полученный вывод с очевидностью демонстрирует твердотельное вращение магнитных звезд. Этот результат позволяет окончательно отвергнуть гипотезу магнитного динамо.

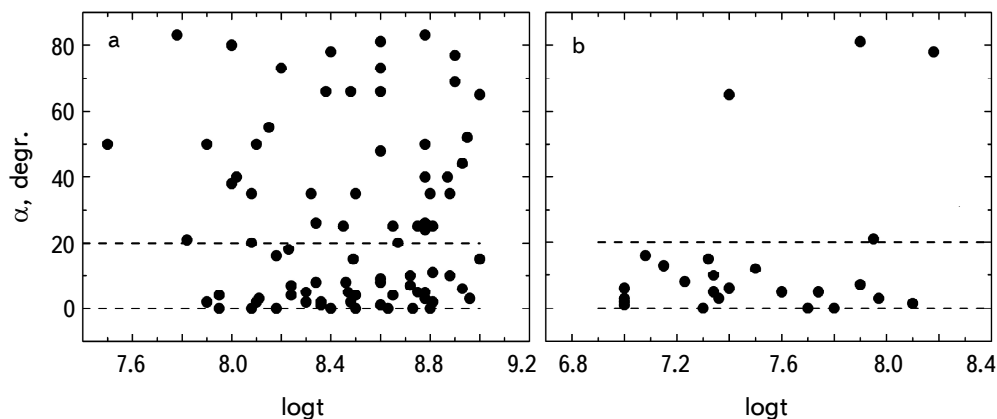


Рис.4. Изменение параметра α с возрастом. а) Изменение угла α у звезд (Si+SrCrEu)-типов, б) изменение α у звезд (He-r+He-w)-типов.

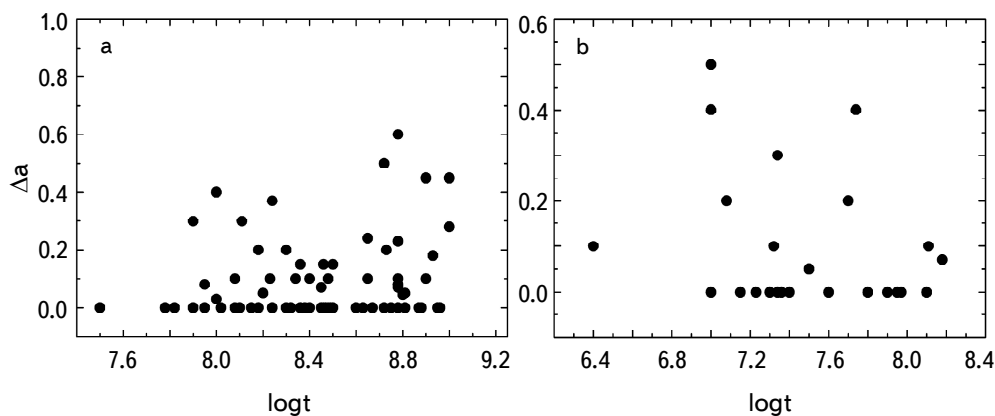


Рис.5. Изменение параметра Δa с возрастом. а) Изменение параметра Δa у звезд (Si+SrCrEu)-типа, б) изменение параметра Δa у звезд (He-r+He-w)-типа.

5. Обсуждение. На рис.1-3 показаны распределения силовых линий в плоскости экватора для всех рассмотренных звезд. Круг в центре звезд показывает положение конвективного ядра, диаметр которого зависит от температуры. Внутри этого круга полоидальное магнитное поле отсутствует. Рис.1 соответствует звездам с центральным диполем, рис.2 - это звезды с

смещенным вдоль оси диполем, рис.3 демонстрирует звезды с двойным диполем. В каждой группе левые два рисунка А относятся к молодым звездам, правые два В - к старым. При рассмотрении всех рисунков мы видим, что в каждой группе старые и молодые звезды имеют структуры с одинаковыми характерными чертами. Особенно интересны структуры с диполем в центре. Какие-либо неустойчивости внутри звезд могут симметричную конфигурацию привести к более сложной, но не наоборот. К сожалению, звезд со смещением диполя поперек оси и с трехдипольной структурой слишком мало для выявления устойчивости.

Дополнительно к сказанному напомним, что в работе [31] изучены распределения $N(\alpha)$ для долгоживущих звезд (Si+SrCrEu)-типа и коротко живущих (He-r+He-w)-типов отдельно. Оказалось, что в основных чертах оба распределения одинаковы. Они показывают преимущественную ориентацию в плоскости экватора магнитных диполей в звездах всех типов пекулярности [15,41]. Эти свойства свидетельствуют о устойчивости конфигураций магнитного поля со временем.

В табл.1 показано, что доля звезд всех возрастов с магнитным полем центрального диполя равна 16%. Очевидно, что при наличии внутри звезд каких-либо крупномасштабных движений вещества при условии замороженности магнитного поля, такие конфигурации не могли бы существовать. Это замечание, впрочем, относится и к другим конфигурациям, но пример дипольной конфигурации более впечатляет.

Предположение о твердотельном вращении магнитных звезд и отсутствии в них крупномасштабных движений масс не касается конвективного ядра. Проблема состоит только в одном: вращается ли конвективное ядро относительно стабильной части звезды. Если оно вращается с другой угловой скоростью, то в пограничном слое силовые линии навиваются в тороидальную структуру и поле усиливается. Происходит генерация тороидального поля, которое должно всплыть на поверхности. Поскольку это не наблюдается, то остается единственный вывод - ядро вращается синхронно со всей массой звезды.

После детального изучения всех имеющихся в нашем распоряжении модельных структур магнитных звезд, мы сделали окончательный вывод, что магнитные звезды вращаются твердотельно. Это подозревали также ранние исследователи. Опыт предыдущих исследований предсказывал также отсутствие всяких движений масс внутри магнитных протозвезд, как мы полагаем, вследствие их медленного вращения и частично вследствие замороженности магнитного поля. Именно отсутствие всяких движений вещества при медленном вращении внутри магнитных звезд сохраняет их магнитные конфигурации в течение всей их жизни на Главной последовательности. Можно считать, что с момента образования лучистой молодой магнитной звезды с возрастом $t=0$, крупно-

масштабная структура магнитного поля остается стабильной. Исследования звезд со сложными структурами магнитного поля показывают, что их свойства несовместимы с гипотезой тороидально-полоидальных конфигураций магнитных звезд [42].

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
Россия, e-mail: glagol@sao.ru

THE SECULAR STABILITY OF MAGNETIC STRUCTURES OF MAGNETIC STARS

Yu.V.GLAGOLEVSKIY, A.F.NAZARENKO

The structures of the magnetic fields of stars of different ages are investigated. No changes in the position and orientation of the magnetic dipoles with age were found. It was concluded that there are no global motions inside magnetic stars, such as differential rotation, meridional circulation, etc. Arguments were made for the assumption that magnetic stars rotate solid-state. The conclusions do not concern the behavior of convective nuclei.

Keywords: *stars: magnetic fields - stars: evolution - stars: magnetic structures - stars: ages*

ЛИТЕРАТУРА

1. *H.W.Babcock*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **59**, 112, 1947.
2. *H.W.Babcock*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **59**, 260, 1947.
3. *M.Schwarzschild*, Astrophys. J., **112**, 222, 1950.
4. *D.W.N.Stibbs*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **110**, 395, 1950.
5. *H.W.Babcock*, Astrophys. J., **56**, 116, 1951.
6. *H.W.Babcock*, Astrophys. J., **114**, 1, 1951.
7. *A.J.Deutsch*, Astrophys. J., **105**, 283, 1947.
8. *A.J.Deutsch*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **68**, 92, 1956.
9. *A.J.Deutsch*, Vistas in Astronomy, **2**, 1421, 1956.
10. *A.J.Deutsch*, Handbuch der Physik, **51**, 689, 1958.

11. *A.J.Deutsch*, IAU Symp. No6, 209, 1958.
12. *H.W.Babcock*, in Stellar atmospheres, Ed. J.L.Greenstein (The University of Chicago press), 1960.
13. *E.Z.Bohm-Vitenze*, Astrophys. J., **64**, 326, 1966.
14. *E.Z.Bohm-Vitenze*, in Modern Astrophysics, Ed. M.Hack (Gauthier-Villars,Paris, 1967), p.112.
15. *G.Preston*, Astrophys. J., **150**, 547, 1967.
16. *D.M.Pyper*, Astrophys. J. Suppl., **18**, 347, 1969.
17. *J.D.Landstreet*, Astrophys. J., **159**, 1001, 1970.
18. *G.Preston*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **83**, 571, 1971.
19. *M.J.Stift*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **172**, 133, 1975.
20. *M.J.Stift*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **183**, 433, 1978.
21. *G.Mathys*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **123**, 353, 1997.
22. *O.Kochukhov*, *S.Bagnulo*, *G.Wade*, Astron. Astrophys., **414**, 613, 2004.
23. *E.Gerth*, *Yu.V.Glagolevskij*, *G.Scholz*, in Stellar magnetic fields, Eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, 1997, p.67.
24. *E.Gerth*, *Yu.V.Glagolevskij*, ASP Conf. №305, 2003.
25. *E.Gerth*, *Yu.V.Glagolevskij*, Bull. SAO, **56**, 25, 2003.
26. *E.Gerth*, *Yu.V.Glagolevskij*, in Magnetic stars, Ed. Yu.V.Glagolevskij, I.M.Kopylov, 2003, p.152.
27. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **72**, 305, 2017.
28. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **72**, 418, 2017.
29. *Yu.V.Glagolevskij*, *A.F.Nazarenko*, Astrophys. Bull., **73**, 201, 2018.
30. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophysics, **56**, 173, 2013.
31. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophysics, **59**, 321, 2016.
32. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **74**, 72, 2019.
33. *S.Ekstrem et al.*, Astron. Astrophys., **537**, A146, 2012.
34. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **66**, 144, 2011.
35. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **66**, 158, 2011.
36. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **71**, 453, 2016.
37. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophysics, **55**, 169, 2012.
38. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **71**, 43, 2016.
39. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **67**, 264, 2012.
40. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophys. Bull., **70**, 89, 2015.
41. *G.W.Preston*, The Magnetic and Related stars, Ed. by R.Cameron, (Mono Book Corp., Baltimore, 1967), p.3.
42. *J.Braithwaite*, *A.Nordlung*, Astron. Astrophys., **450**, 1077, 2006.