

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ CP-ЗВЕЗД НА ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ. II

Ю.В. ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 30 мая 2013

Принята к печати 12 июня 2013

Величины средних поверхностных магнитных полей B_s около 120 CP-звезд приведены к моменту V класса светимости, которые постоянно изменяются за счет роста поля вследствие упрощения поверхностной структуры и одновременного ослабления поля при эволюционном изменении радиуса. Зависимость исправленных величин B_s от возраста $\log t$ звезд соответствует предположению о времени затухания поля $\tau \sim 10^9 - 10^{10}$ лет, что соответствует предполагаемой омической диссипации поля. Практически в течение всего времени пребывания магнитных звезд на Главной последовательности полный магнитный поток остается постоянным. Изменение поверхностного магнитного поля вследствие эволюционного изменения радиуса вероятнее всего происходит не по кубической зависимости, а медленнее, вследствие отклонения внутренних структур от "дипольности". По характеру распределения звезд на зависимостях B_s от возраста магнитные звезды разных типов пекулярности резко различаются, предположительно вследствие особенностей формирования из намагниченных протозвездных облаков.

Ключевые слова: CP-звезды; магнитные поля; эволюция

1. *Введение.* В предыдущей статье под номером I [1], а также в работе [2] мы исследовали изменение магнитного поля с возрастом у магнитных звезд Главной последовательности, используя зависимость среднего поверхностного магнитного поля от эффективной температуры $B_s(T_e)$, а также такую же зависимость от возраста $\log t$, но с исключением влияния эволюционного изменения радиуса. Было показано, что в обоих случаях получается неуверенный результат потому, что гелиевые, кремниевые и SrCrEu звезды ведут себя на этих зависимостях по-разному, у них разное среднее значение магнитного поля. Поэтому следует изучать поведение магнитного поля с возрастом у звезд этих трех групп отдельно. Пока неясно, чем вызвано различие свойств этих групп звезд, почему кремниевые звезды намагничены в среднем сильнее. Возможно, что они формируются из объемов протозвездных облаков, имеющих максимальные поля. В этой части работы будет учтено не только изменение поля из-за роста радиуса, но и за счет роста поля после ZAMS, которое хорошо заметно на рис.6 в работе [1], происходящего скорее всего из-за предполагаемого упрощения мелкомасштабной магнитной структуры на их поверхности. Особенности эволюции магнитного поля зависят от механизма его возникновения.

А. Наиболее вероятные механизмы происхождения магнитного поля следующие.

1) Динамо. У звезд в диапазоне температур 7000–25000 К, в котором находятся магнитные звезды, нет конвективных слоев, в которых может развиваться механизм динамо. Некоторые авторы предполагают действие динамо в конвективном ядре и вынос магнитного поля наружу. Однако расчеты показывают, что время выхода поля наружу превышает время жизни звезды на Главной последовательности [3]. Против генерации магнитного поля посредством динамо внутри конвективного [2] ядра можно привести также тот довод, что на холодных SrCrEu- звездах и горячих He-г звездах оно должно всплыть в разное время, учитывая разный путь и разный темп эволюции. Но у всех звезд поле появляется именно на ZAMS, т.е. поле внутри звезд к моменту выхода на ZAMS уже содержится [1].

Наблюдается большое разнообразие структур магнитного поля [2], которое не объясняется механизмом динамо, не наблюдается также предполагаемая прямая корреляция величины поля от скорости вращения [4], ее отсутствие соответствует реликтовой гипотезе. В работах [5-7] показано, что доля магнитных звезд по отношению к нормальным звездам растет с уменьшением $\sin i$ (рис.1). Отсюда можно предположить, что магнитными звездами (как и другими химически пекулярными объектами) становятся те звезды, которые изначально медленно вращаются. Это означает, что магнитное поле не генерируется динамо. Остается пока единственный механизм - реликтовый.

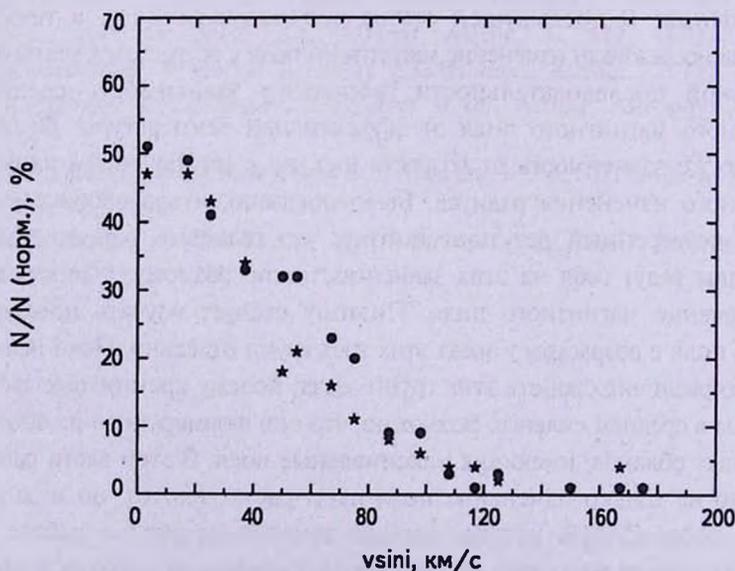


Рис.1. Рост доли химически пекулярных звезд с уменьшением скорости вращения (число CP-звезд относительно 800 нормальных звезд). Кружки - магнитные CP-звезды, звездочки - не магнитные CP-звезды.

2) Слияние с намагниченным тесным компонентом [8] - идея оригинальная, но она встречается с трудностями вследствие того, что неизвестно как поведет себя магнитное поле в случае катастрофических нестационарных процессов, происходящих вследствие 1) взаимного гравитационного возмущения при относительном движении звезд перед слиянием, и затем 2) при слиянии двух звезд. Химсостав можно "перелить" от одной звезды в другую таким путем, но не поле. Поле может разрушиться и как оно впоследствии сформируется в простую дипольную структуру неясно. Факт обнаружения двух звезд типа Ae/Be Хербига HD 200775 и V350 Ori с дипольным полем [9,10] показывает, что релаксация вначале сложного поля у них давно уже прошла, а для того, чтобы сформировалось дипольное поле от поглощенного тесного магнитного компонента нужно время, а возраст V350 Ori менее 10^7 лет. Возраст намагниченного компонента такого же порядка. Вряд ли эти две звезды могли стать магнитными таким путем.

3) Реликтовое поле, в смысле остаточное поле на магнитных звездах после формирования звезды из намагниченных протозвездных облаков - наиболее обсуждаемая гипотеза [11-13]. На начальных этапах на звезду происходит мощная аккреция, вызывающая ударные волны и зоны неустойчивости, в более поздние времена аккреция происходит в период неустойчивой фазы Ae/Be Хербига вплоть до выхода на линию нулевого возраста (ZAMS). Поэтому естественно предположить, что начальное поле имело сложную структуру. Механизм формирования в рамках реликтового механизма именно дипольного поля в таких условиях пока непонятен, в частности потому, что неизвестны детали эволюции звезд на ранних стадиях. Неизвестна переходная структура магнитного поля внутри коллапсирующего намагниченного облака. Однако ясно, что сложная структура современных полей является остатком более сложных ранних конфигураций [2]. В таких условиях в запутанном магнитном поле может возникнуть преобладающий вектор, который остается после релаксации. Таким путем первоначальная магнитная структура, по-видимому, организуется в дипольную, причем в большинстве случаев диполь почему-то располагается в плоскости экватора вращения. Очевидно, вращение играет существенную роль в формировании структур. Сильное различие величин магнитных полей у CP-звезд, вероятно, связано в первую очередь с большим диапазоном величин магнитного поля в протозвездных облаках, из которых формируются будущие магнитные звезды. Непонятно почему поле остается только у 10% звезд. Возможно, магнитные звезды образуются из самых намагниченных облаков и из самых медленных ротаторов.

В работе [1] показано, что магнитное поле быстро растет после выхода звезды на ZAMS (этот рост продолжается, вероятно, до ухода ее с Главной последовательности, см. далее) затем рост замедляется и начинает

преобладать падение поля вследствие эволюционного увеличения радиуса. Скорее всего, начальный быстрый рост связан с упорядочиванием мелкой структуры поля на поверхности, после чего остается только крупномасштабная дипольная конфигурация.

В. *Поле у молодых звезд Ae/Be Хербига.* После того, как магнитное поле на ранних стадиях эволюции у 10% будущих магнитных звезд сохранилось, а у остальных, будущих нормальных звезд, оно исчезло, оно должно было пережить нестационарный период Ae/Be звезд Хербига вплоть до выхода на Главную последовательность. Как уже было упомянуто, есть предположение, что магнитные поля остаются только у медленно вращающихся ротаторов и у звезд, образующихся из наиболее намагниченных облаков [5]. Нет достаточно надежных данных о том, что происходит на поверхности звезд Ae/Be Хербига в настоящее время и не совсем понятно, какие могут быть причины подавления сильных полей на поверхности тех звезд, которые в будущем становятся магнитными CP-звездами Главной последовательности. Делались попытки обнаружить объекты с сильным магнитным полем у звезд Ae/Be Хербига [14-16]. Для этого были отобраны звезды со слабыми ИК-избытками, у которых наименьшее экранирование диска звезды окружающей оболочкой и есть надежда получить спектральные линии самой звезды, а также объекты с наименьшими величинами $v \sin i$, как и у магнитных звезд. Совершенно определенно был сделан вывод, что у избранных объектов на поверхности сильные поля, подобные типичным магнитным звездам, отсутствуют. С другой стороны, было найдено, что некоторые звезды, выходящие, или уже вышедшие, на Главную последовательность, так называемые "Post-Ae/Be" объекты [17], имеют заметные магнитные поля. Это служит одним из признаков того, что сильные магнитные поля начинают появляться только на ZAMS. Звезда HD 200775 относится к таким объектам [18]. У HD 200775, V350 Ori, HD 101412 позднее были найдены поля, синусоидально изменяющиеся со временем как у большинства магнитных звезд [9,19]. Моделирование показало [18], что первые две звезды ориентированы на наблюдателя полюсом вращения, поэтому наблюдается область поверхности, которая не подвергалась влиянию дисковой аккреции и находится в стационарном состоянии. Но звезда HD 101412 ориентирована к наблюдателю экватором [20]. То, что сквозь аккреционный диск хорошо виден поверхностный спектр, говорит о том, что это звезда "Post-Ae/Be" Хербига. Тем не менее, наличие простого дипольного поля у нестационарных звезд типа Ae/Be Хербига представляет собой проблему. Например, в спектроскопическом исследовании [21] звезды HD 200775 отмечается, что у нее сильные изменения профилей и интенсивностей линий являются результатом столкновения ветра с оболочкой, которое вызывает последующую аккрецию окружающего вещества на звезду. Как в таких условиях выживает стационарное магнитное

поле - неясно. Причина того, почему сильные поля на видимой поверхности других молодых звезд не были обнаружены может состоять в том, что мы не видим поверхности, а видим только верхний слой протяженной дисковой структуры. Кроме того, звезда имеет перед выходом на ZAMS диаметр больше, чем на ГП, и вследствие кубической зависимости величины поля от радиуса на поверхности поле оказывается уменьшенным. Поле на поверхности может быть запутано вследствие нестационарных процессов, происходящих в настоящее время и в недавнем прошлом у молодых звезд. Большинство магнитных звезд имеют магнитные диполи в плоскости экватора вращения, т.е. в плоскости аккреционного диска, где нестационарные явления наиболее сильные.

У самых массивных O-звезд дипольное поле, очевидно, не успевает организовать и среди них нет объектов с достаточно сильными полями. Но должны быть такие, которые имеют сложные структуры. К таким звездам можно отнести HD 149438 [22]. Однако известно, что такие массивные объекты обычно слишком нестационарны и среди них мало вероятно найти стабильные объекты, у которых магнитное поле не разрушено. Поэтому обнаружение магнитного поля у таких звезд и изучение его структуры было бы интересным.

С. Поведение магнитного поля на Главной последовательности. Таким образом, на фазах эволюции "до Главной последовательности" магнитное поле проявляется слабо [35], поэтому возникает вопрос, в какой момент и почему они становятся заметными. В работе [23], обнаружено, что на зависимости среднеквадратического магнитного поля от относительного радиуса $\langle B_e \rangle (B/R_z)$ хорошо заметен рост поля в начальный период после ZAMS и, затем, его медленный спад, как это видно на рис.2а, взятом из этой работы. (R/R_z) - радиус звезды в данный момент относительно ее радиуса на ZAMS). В работе [24] подтверждено наличие такой зависимости, только там вместо $\langle B_e \rangle$ использованы средние поверхностные величины магнитного поля B_s . Такая же зависимость приведена на рис.2б, построенная по данным работы [1]. В отличие от зависимости, приведенной в [1], здесь мы использовали только те измерения B_s , которые сделаны в нескольких фазах периода вращения, а также величины, полученные из моделей. Таким образом одиночные измерения мы использовали во вторую очередь. Несколько новых звезд мы добавили. Белыми большими кружками обозначены средние величины в разных R/R_z . В указанной работе показано, что такое изменение происходит вследствие двух причин: 1) ослабления поверхностного поля за счет эволюционного увеличения радиуса и 2) усиления среднего поверхностного поля за счет, вероятно, постепенного упрощения и упорядочения поверхностной структуры (вследствие исчезновения неустойчивых мелких структур). Начальный рост магнитного поля у звезд SrCrEu- типа, который мы нашли,

подтвержден позднее в работе [25] (сильное поле проявляется только после прохождения звезды вдоль эволюционного трека 30% общего пути) он исследовался также в [5 и 26]. Изменение среднего поверхностного поля со временем происходит сильнее всего в начальный момент после ZAMS и эволюционного увеличения радиуса.

В отличие от рис.2а, б, построенного для звезд всех типов, в работе [27] была сделана попытка исследования изменений поля после ZAMS у звезд разных типов пекулярности. Для этого использовались среднеквадратические величины магнитного поля $\langle Be \rangle$. Оказалось, что магнитное поле

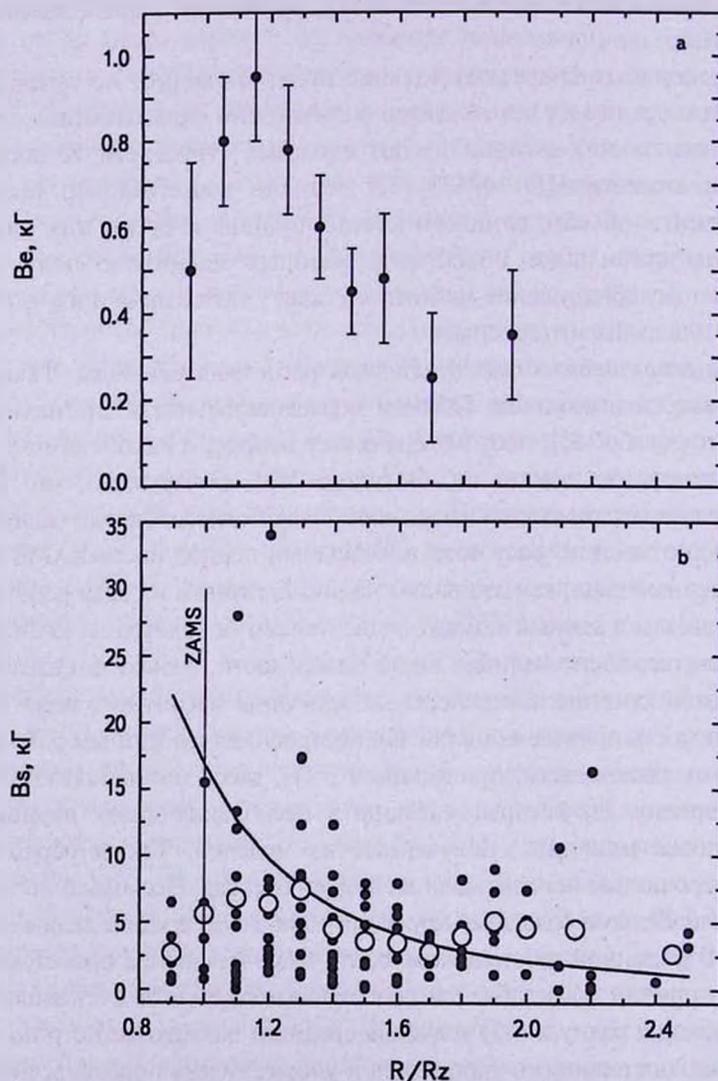


Рис.2. Изменение магнитного поля при эволюционном движении звезд поперек полосы Главной последовательности. а - зависимость для среднеквадратических величин продольного поля $\langle Be \rangle$; б - зависимость для средних поверхностных величин B_s ,

He-г звезд увеличивается с возрастом вплоть до верхней границы полосы Главной последовательности. Очевидно, темп эволюции звезд этого типа настолько высок, что упорядочивание поверхностной структуры происходит в течение всего времени пребывания их на Главной последовательности.

У звезд He-w вначале поле увеличивается, потом падает. Падение после максимума, очевидно, происходит вследствие замедления начального роста и начинающегося преобладания эффекта увеличения радиуса. Точно так же ведут себя кремниевые звезды.

У SrCrEu звезд - поле в этой работе растет так быстро (по отношению к времени жизни на Главной последовательности), что на рис.2 в [27] это незаметно. Однако на построенной в данной работе зависимости $B_s(R/R_z)$ рост поля после ZAMS у SrCrEu-звезд хорошо заметен.

Итак, сложное запутанное вначале на ZAMS поверхностное поле постепенно превращается в простую дипольную конфигурацию, наблюдаемую у большинства звезд. Очевидно, что внутри звезды дипольная конфигурация уже сформировалась, а процесс релаксаций на поверхности заметен на рис.2 в виде быстрого роста B_s [2,28] и $\langle Be \rangle$ [27] после ZAMS. У всех звезд поле появляется именно после ZAMS, как мы видели в [1,2].

Дополнительные сведения о росте поля после ZAMS показаны в работе [29]. Там приведены данные о росте содержания He у звезд He-г-типа с возрастом. На ZAMS содержание He у звезд нормальное, затем оно растет по закону $(\text{He}/\text{H}) = (0.17 \pm 0.05) R/R_z - 0.03$ при коэффициенте корреляции $R = 0.52$, достигает максимума и потом падает. Там сделано заключение, что рост содержания He происходит вследствие увеличения ветра и магнитного поля [30]. В работе [29] тоже было высказано предположение, что все химические аномалии возникают после прихода будущей СР-звезды на ZAMS, когда окружающие их газово-пылевые оболочки рассеиваются и аккреция прекращается. В этот момент атмосфера стабилизируется, растущее магнитное поле дополнительно стабилизирует верхние слои поверхности звезды, возникают условия для диффузии химических элементов, приводящей к наблюдаемым химическим аномалиям, зависящим от величины магнитного поля [31,32]. Степень химических аномалий пропорциональна величине магнитного поля, как показано в [33,34]. Мы рассматриваем коротко эту проблему потому, что рост химических аномалий после ZAMS происходит именно вследствие роста поля.

В работах [29,33] тоже показано, что при эволюционном движении звезды поперек полосы Главной последовательности поле растет, при этом аномальность содержания He у He-г и He-w-звезд растет тоже вплоть до достижения максимума, затем степень аномальности начинает уменьшаться вследствие дальнейшего уменьшения поля вследствие эволюционного роста радиуса. Из этих работ видно также, что гелиевая

аномалия появляется сразу после выхода звезды на ZAMS, когда оболочка и аккреция исчезают и атмосфера стабилизируется. Вероятно, после ZAMS содержание гелия растет также вследствие усиления ветра, упорядочения структуры поля, уменьшения турбулентности, подавляемой магнитным полем. Эта проблема детально рассматривалась также в [36].

К сожалению, начало и конец зависимости на рис. 1а недостаточно надежны вследствие наблюдательной селекции. Особенно это касается звезд типа He-г, потому что из всех звезд с аномальными линиями гелия [37] заметное поле обнаружено только у 40%. Возможно, у многих из них поле еще не успело сформироваться. Наблюдательная селекция заключается в том, что объекты с еще слабыми полями вблизи ZAMS и ослабевшими полями на верхней части полосы Главной последовательности не интересны для наблюдателя или даже трудно наблюдаемы вследствие слабого расщепления спектральных линий. Влияет также известное стремление изучать звезды с наиболее сильными полями.

Классические магнитно-переменные химически пекулярные (CP) звезды находятся в пределах полосы Главной последовательности от 7000 до 25000 К. Нижняя граница достаточно резкая имеет свое объяснение (см. далее). Однако природа верхней границы пока непонятна. Отсутствие реликтового поля у массивных O-B звезд Главной последовательности становится непонятным. Очевидно, что играют роль особенности эволюции этих звезд, которые надо установить. Поэтому следует приветствовать усилия, которые некоторые коллективы проявляют для поиска признаков присутствия магнитного поля у массивных звезд Главной последовательности. Обнаружение поля сложной структуры у O-звезды HD 149438 [22] является очень важным. Появившиеся в последнее время аппаратные и методические

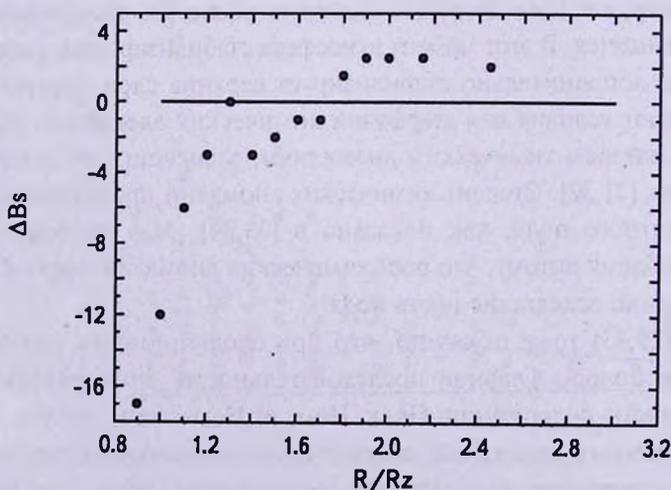


Рис.3. Величины отклонений наблюдаемых средних поверхностных величин поля B_s от предполагаемой кубической зависимости.

Таблица 1

R/R_z	k	K	$K \cdot k$	R/R_z	k	K	$K \cdot k$
0.9	0.25	6.8	1.70	1.8	1.83	0.8	1.46
1.0	0.32	2.5	0.80	1.9	2.10	0.5	1.05
1.1	0.44	1.8	0.79	2.0	2.30	0.5	1.15
1.2	0.58	1.9	1.10	2.1	2.50	0.4	1.00
1.3	0.78	1.0	0.78	2.2	2.75	0.5	1.37
1.4	1.00	1.2	1.20	2.3	3.10	0.4	1.24
1.5	1.10	1.4	1.54	2.4	3.44	0.4	1.38
1.6	1.34	1.2	1.51	2.5	3.67	0.4	1.47
1.7	1.57	1.2	1.88				

достижения, вероятно, позволят сдвинуть проблему в положительном направлении. В отличие от классических магнитных СР-звезд, атмосферы которых стабильны, О-звезды нестабильны как и Ae/Be звезды Хербига. Возникает предположение, что в таких условиях глобальные дипольные структуры реликтового магнитного поля разрушаются. Имеются методические трудности - наличие эмиссии в линиях, часто на глаз незаметной, может затруднить измерение циркулярной поляризации, а иногда и привести к неверному результату.

На рис.3 показаны отклонения $\Delta B_s = (B_s - B_x)$ средних величин B_s (белые кружки) от кубической зависимости, выведенные на основании рис.2. Ход этой зависимости с несомненностью показывает начальное быстрое изменение поля, которое затем замедляется и зависимость становится пологой, когда поле упорядочивается полностью. Интересно

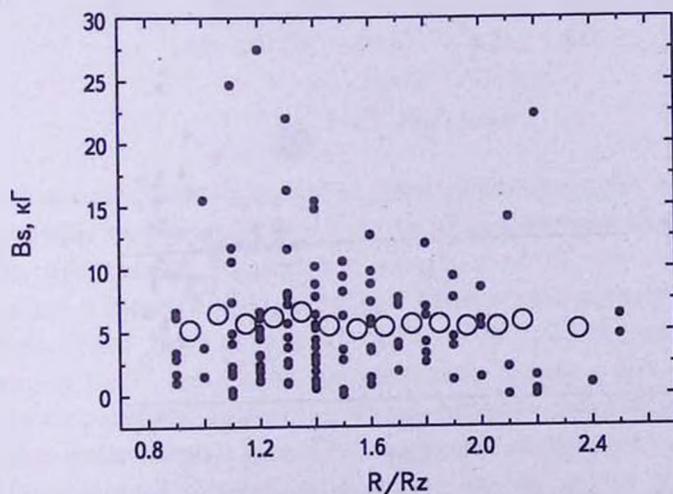


Рис.4. Изменение B_s при эволюционном движении звезд поперек полосы Главной последовательности, исправленное за эффект роста вследствие постепенной стабилизации магнитного поля и за эффект роста радиуса.

посмотреть, каково было бы поведение магнитного поля, если бы не было рассматриваемых двух эффектов.

Наблюдаемые величины B_s были исправлены за счет влияния "кубического" уменьшения, а также за счет медленного увеличения B_s , показанного на рис.3. Соответствующие коэффициенты обозначены в табл.1 как k и K . Общий коэффициент обозначен $K \cdot k$.

После исправления величин B_s с помощью коэффициентов $K \cdot k$ зависимость на рис.2b становится такой как на рис.4, который показывает, как менялось бы поле при эволюционном движении звезд поперек ГП если бы не было зависимости B_s от радиуса и если бы поле не увеличивалось за счет упрощения структуры поля. Однако здесь не учтен эффект уменьшения B_s за счет омической диссипации, который мы попытаемся определить в следующем разделе.

2. Зависимость $B_s(t)$ для звезд *SrCrEu-типа*. Возраст звезд $\log t$ определялся с помощью сетки моделей [38]. Для этого светимости звезд $\log L/L_\odot$, частично были взяты из [39,40], для ряда объектов они определены по параметрам β и M_V из каталога [41].

Звезды этого типа интересны прежде всего тем, что они изучены наиболее полно и среди них имеются объекты с максимальным возрастом, в то время как гелиевые и кремниевые звезды уходят с Главной последовательности более молодыми. На рис.5а показана зависимость $B_s(\log t)$, построенная по B_s , исправленным за влияние эволюционного изменения радиуса и роста поля за счет упрощения поверхностной структуры с

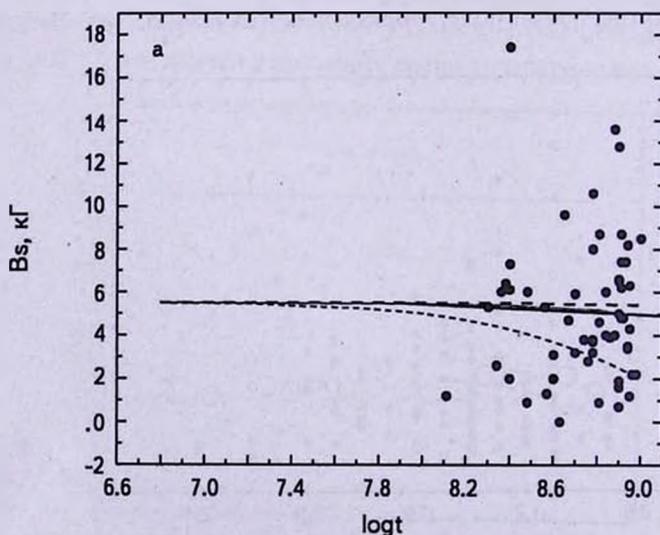


Рис.5. Изменение исправленных величин B_s с возрастом звезд. а - SrCrEu-звезды; б - Si-звезды; с - He-звезды. Толстая сплошная линия - линейная регрессия, толстая штриховая линия - экспонента при $\tau = 10^{10}$ лет, тонкая сплошная линия - экспонента при $\tau = 10^8$ лет, тонкая штриховая линия - $\tau = 10^8$ лет.

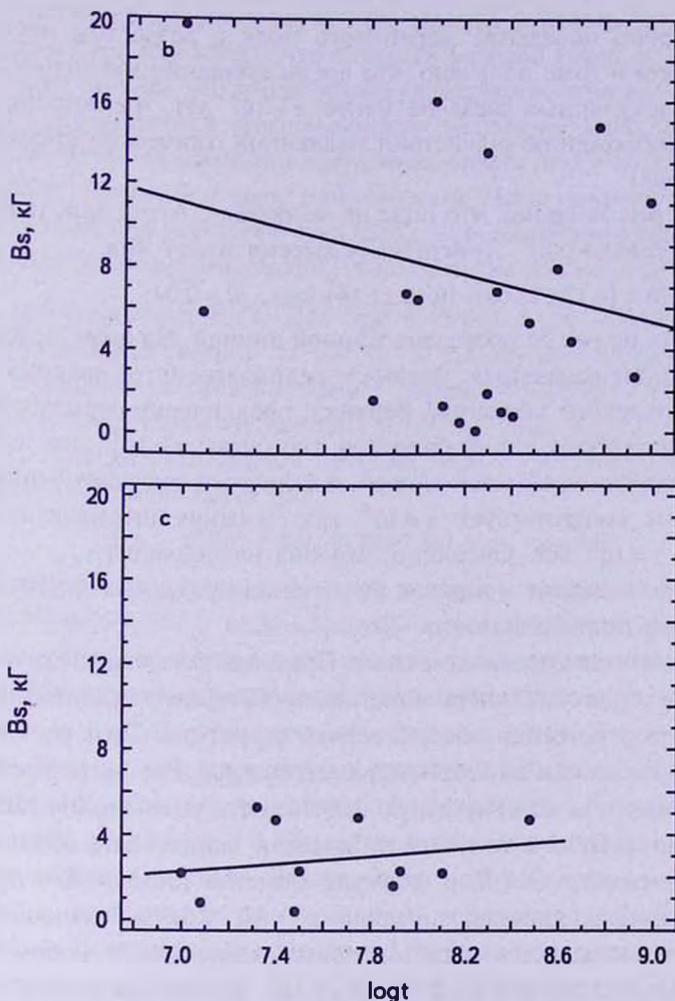


Рис.5. (Окончание).

помощью коэффициентов в табл.1. Эти звезды находятся преимущественно в диапазоне возрастов от $t = 10^3$ до $t = 10^9$ лет. Резкий обрыв зависимости справа происходит потому, что звезды с $t = 10^9$ лет преимущественно находятся в верхней кромке полосы ГП и в этом возрасте они покидают ее. Несколько звезд в нашем списке с $T_e \sim 6000$ К имеют возраст по видимому $t > 10^9$ лет. Более долгоживущие звезды с меньшими температурами не содержат магнитных полей, вероятно, вследствие того, что они прошли конвективную фазу ТГау, в которой реликтовое поле разрушилось.

Приведенные данные показывают, что на самом деле у магнитных звезд возраст t был бы больше 10^9 лет, если бы они продолжали находиться на Главной последовательности. В предыдущей статье [1] тоже

было рассмотрено поведение магнитного поля с возрастом несколько другим способом и тоже получено, что время затухания магнитного поля у химически пекулярных звезд не менее $\tau \sim 10^9$ лет, что вполне соответствует предположению о действии медленной омической диссипации магнитного поля.

Из рис.4 и рис.5а видно, что поле не меняется с возрастом, оставаясь в среднем на уровне 5 кГ. Линейная регрессия имеет вид

$$B_s = (9.12 \pm 12.68) - (0.46 \pm 1.44) \cdot \log t, \quad R = 0.04.$$

Эта зависимость на рис.5а проведена жирной линией. На этом же рисунке показаны экспоненциальные кривые предполагаемого падения поля вследствие омического затухания. Верхняя, практически горизонтальная зависимость, построена для постоянной затухания $\tau = 10^{10}$ лет, средняя зависимость, проведенная тонкой линией, практически совпадает с линейной регрессией, она соответствует $\tau = 10^9$ лет. Нижняя штриховая линия соответствует $\tau = 10^8$ лет. Очевидно, что она не подходит.

В принципе, введение поправок не изменило результат, полученный в работе [1], но подтвердило его.

Следует сделать следующее замечание. Предполагаемый спад магнитного поля вследствие омических потерь может частично компенсироваться ростом поля вследствие упрощения поверхностной структуры. Этот рост поля в конце пребывания звезды на Главной последовательности может оказаться меньше, если принять не кубическую зависимость уменьшения поля, а в меньшей степени. Дело в том, что кубическая зависимость возникает в случае, если параметр $l \ll R$, в формуле момента диполя $M = l \cdot Q$. На самом деле, как мы видели выше, величина $l \sim 0.1 - 0.5R$, и магнитное поле на поверхности уменьшается с ростом радиуса медленнее. В любом случае величина времени затухания поля будет $\tau > 10^8$. Несколько звезд в нашем списке имеют возраст порядка $\tau > 10^9$ лет. Очевидно, что полный магнитный поток в течение жизни звезды на Главной последовательности практически не изменяется. Этот результат подтверждает наш такой же вывод, сделанный в работе [23] на основании использования среднеквадратических величин магнитного поля.

3. Зависимость $B_s(t)$ для звезд S_i и S_i -типов. На рис.5б показана исправленная зависимость $B_s(\log t)$ для звезд с кремниевыми аномалиями. Первое, что бросается в глаза, это сильный разброс величин B_s и возрастов. Это может происходить потому, что очень нерезкая граница между соседними типами звезд, они сильно перекрываются по массам. Линейная регрессия приводит к некоторому наклону зависимости, но он незначим вследствие большого рассеяния точек:

$$B_s = (30.93 \pm 28.70) - (2.84 \pm 3.84) \cdot \log t, \quad R = -0.18.$$

Это свойство кремниевых звезд обсуждалось в работе I.

Можно предположить, что сильный разброс точек по величинам B_s происходит потому, что характерные размеры протозвездных облаков, из которых формируются звезды данного диапазона масс, больше и они включают больший диапазон магнитных полей, чем у звезд SrCrEu-типа. Средняя величина B_s у звезд данного типа выше средней величины для звезд SrCrEu-типа примерно на 1500 Гс. Для получения более уверенных результатов необходимо увеличить количество изученных Si-звезд.

4. *Зависимость $B_s(t)$ для звезд He-w и He-r-типов.* Искомая зависимость представлена на рис.4с. К сожалению звезд мало. Тем не менее, обращает на себя внимание в среднем меньшая величина B_s по сравнению со звездами кремниевых и SrCrEu-типов. Звезды данного типа также сильно перекрываются по возрастам с кремниевыми объектами. Линейная регрессия имеет вид

$$B_s = (-30.90 \pm 9.54) + (0.88 \pm 1.25) \cdot \log t, \quad R = 0.23.$$

Таким образом, и в этом случае нет хода B_s с возрастом, что, впрочем, неудивительно имея в виду слишком короткое время жизни гелиевых звезд на Главной последовательности. Сильное отличие полученной зависимости от графиков для Si и SrCrEu-звезд приводит к предположению об отличных условиях формирования звезд этих типов. Небольшой диапазон величин B_s , возможно, получается вследствие существенно большего объема протозвездных облаков, из которых формировались звезды с гелиевыми аномалиями, что приводит к большему усреднению неравномерного распределения магнитных полей. Важно также учесть быстрый темп эволюции He-r звезд, за короткое время магнитное поле не успевает вырасти до максимума. Действительно, в работе [27] было показано, что среди звезд с гелиевыми аномалиями очень большой процент слабомагнитных. К сожалению, слишком мало данных для звезд этого типа и для окончательного вывода об их свойствах необходимы дополнительные наблюдения.

5. *Заключение.* В предыдущей статье под номером I [1], затем в данной работе, а также в работе [2], получено несколько результатов, основные из которых следующие:

1) На основе моделирования глобальных структур магнитных полей химически около 60 пекулярных звезд (СР) сделан вывод, что все исследованные объекты имеют структуру крупномасштабной составляющей магнитного поля, соответствующую структуре магнитного диполя.

2) Форма фазовых зависимостей изменения магнитного поля с периодом вращения $B_e(\Phi)$ и $B_s(\Phi)$ определяется только положением и ориентацией магнитного диполя внутри звезды.

3) Фактически все магнитные звезды имеют магнитный диполь, в той

или иной степени смещенный из центра звезды, некоторое количество звезд имеют структуру, формируемую двумя и более смещенными из центра диполями.

4) Наблюдаемые деформации, а иногда и сложность магнитных полей CP-звезд, скорее всего, являются остатком значительных неоднородностей магнитных структур, которые были в начале формирования магнитных звезд, полная релаксация которых еще не успела завершиться. Предполагается, что магнитное поле может искажаться также в течение времени эволюции "до Главной последовательности" вследствие выпадения крупных аккреционных масс, вплоть до слияния звезды с тесным компонентом. Важно отметить, что сильно искаженные структуры встречаются как у молодых звезд, так и у звезд с значительным возрастом, около $t = 10^9$ лет. Это говорит о том, что самые долгоживущие звезды уходят с Главной последовательности, не успев завершить упрощение структур.

5) Магнитные звезды после прохождения фазы Ae/Be Хербига имеют, как правило, слабое поверхностное поле B_s , которое после выхода на ZAMS начинает расти, сначала быстро, потом медленно, вплоть до ухода звезды с Главной последовательности. Точно так же изменяется степень аномальности химсостава. Предполагается, что причина роста поля связана с постепенным упрощением мелких неоднородностей на поверхности вследствие их неустойчивости. Одновременно величины среднего поверхностного поля B_s сильно уменьшаются с возрастом вследствие эволюционного увеличения радиуса. Магнитное поле, в принципе, уменьшается также вследствие омических потерь, но они пренебрежимо малы. Оценки показали, что в результате всех перечисленных эффектов полный магнитный поток сохраняется до возраста $t = 10^9$ лет и звезда уходит с Главной последовательности не растратив его. Этот результат получен на основании исследований звезд SrCrEu-группы. Отсюда ясно, что бесполезно искать признаки уменьшения магнитного потока у звезд гелиевой и кремниевой группы, которые уходят с Главной последовательности гораздо быстрее, чем звезды SrCrEu-типа. Этот результат не противоречит предположению, что отсутствуют другие, кроме омических, источники разрушения магнитного поля и подтверждает предположение о стабильности атмосферы магнитных звезд, которая обеспечивает беспрепятственную диффузию химических элементов под действием гравитации, светового давления и ветра. Нет таких обсуждаемых источников разрушения магнитного поля как дифференциальное вращение и меридиональная циркуляция.

6) Если факт быстрого роста поля после ZAMS не вызывает сомнения, то более слабый его рост в области больших $R/R_z \geq 1.8$, показанный на рис.3, может оказаться завышенным, потому что зависимость $B_s(R/R_z)$ на самом деле не кубическая, как бывает только в случае "идеального" диполя,

а более плавная. Реально у магнитных звезд диполь имеет большие размеры ($I \sim R$), как это показано в [38]. Природа создала в магнитных звездах такую структуру магнитного поля, какую дал бы "магнитный диполь", если бы он существовал на самом деле. Дипольное приближение в пределах ошибок наблюдений хорошо соответствует наблюдательным данным. Внутри звезд нет источников магнитного поля, а найденные диполи с разной ориентацией только показывают сложную структуру магнитных полей в центральных областях. Не исключено влияние конвективного ядра.

7) Очень большой диапазон наблюдаемых величин B_s может являться одним из признаков того, что магнитное поле СР-звезд сформировалось из крайне неоднородно намагниченных протозвездных облаков. Это обстоятельство затрудняет исследование разного рода зависимостей от магнитного поля.

8) Важным результатом, связанным, очевидно, с эволюцией магнитных звезд, является различное поведение трех основных типов звезд на зависимости $B_s(\log t)$. Наблюдаемый разный разброс величин B_s у звезд разных типов пекулярности происходит, вероятно, вследствие разных характерных размеров протозвездных облаков, из которых формируются звезды разных размеров.

9) Полученные результаты не поддерживают гипотезу генерации магнитного поля посредством динамо внутри конвективного [1] ядра. На холодных SrCrEu-звездах и горячих He-г звездах оно должно всплыть в разное время, учитывая разный путь до поверхности и существенно разный темп эволюции звезд. Как мы видели [1], у звезд всех типов поле появляется именно на ZAMS.

10) Рост поля после ZAMS подтверждается ростом химических аномалий после ZAMS.

11) Из полученных в этой работе данных следует вывод, что при построении зависимостей от магнитного поля следует учитывать переменность магнитного поля (не связанную с вращением) в период жизни на Главной последовательности. То же касается и переменности химических аномалий, зависящих от величины поля.

12) Полученные результаты следует считать предварительными, для их подтверждения следует накопить больше наблюдательного материала (B_s), особенно для звезд, находящихся вблизи ZAMS и звезд, уходящих с Главной последовательности.

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

EVOLUTION OF THE MAGNETIC FIELDS OF MAIN SEQUENCE CP-STARS. II

Yu.V.GLAGOLEVSKIJ

The values of the mean surface magnetic fields B_s of around 120 CP stars are reduced to the time of luminosity class V, which are constantly changing due to the growth of the field owing to the simplification of the surface structure and the simultaneous weakening of the field in the evolutionary variation of the radius. The dependence of the corrected B_s values on the age of logt stars corresponds to the assumption of the field decay time of $\tau \sim 10^9 - 10^{10}$ years, which coincides with the expected ohmic dissipation of the field. Almost during entire lifetime of the magnetic stars on the Main Sequence the total magnetic flux remains constant. The variation in the surface magnetic field due to the evolution of the radius is not likely to occur in a cubic dependence, but slower due to the deviation of the internal structures from "dipolar". By the nature of the distribution of the dependences of B_s on age, magnetic stars of different types of peculiarities differ sharply, presumably due to the nature of formation from magnetized protostellar clouds.

Key words: *Cp-stars: magnetic fields: evolution*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, 56, 189, 2013.
2. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, 55, 369, 2012.
3. *Е.Паркер*, *Космические магнитные поля*, т.1, М., Мир, с.33, 1982.
4. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, *Magnetic stars*, Nizhny Arkhyz, 2011, p.153.
5. Ю.В.Глаголевский, *Г.А.Чунтонов*, *Бюлл. САО*, 51, 88, 2001.
6. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, 48, 229, 2005.
7. Ю.В.Глаголевский, *Е.Герт*, *Бюлл. САО*, 55, 38, 2003.
8. *А.В.Тутуков, А.В.Федорова*, *Астрон. ж.*, 87, 1, 2010.
9. *E.Alecian et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 385, 391, 2008.
10. *E.Alecian et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 400, 354, 2009.
11. *T.G.Cowling*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 105, 166, 1945.
12. *D.Moss*, *IAU Symp. No224*, Cambridge Univ. Press, 2004, p.245.
13. *A.E.Dudurov*, *Magnetic stars*, Leningrad, Nauka, 1988, p.226.
14. *Yu.V.Glagolevskij*, *Chemically peculiar and magnetic stars*, Tatranska Lomnica, 1994, p.21.
15. *Yu.V.Glagolevskij, G.A.Chountonov*, *Stellar Magnetic fields*, Moscow, 1997, p.116.

16. *Yu.V.Glagolevskij*, Magnet fields across HR dyagram, 2001, p.535
17. *Б.С.Шевченко*, Ae/Be звезды Хербига, Ташкент, Изд.ФАН, 1989.
18. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофизика, 55, 189, 2012.
19. *S.Hubri et al.*, Astron. Astrophys., 525, L4, 2011.
20. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофиз. Бюлл., 2014 (в печати).
21. *A.S.Miroshnichenko et al.*, Publ. Astron. Soc. Pacif., 110, 883, 1998.
22. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофиз. Бюлл., 2013 (в печати).
23. *Yu.V.Glagolevskij*, Magnetic stars, Leningrad, Nauka, 1988, p.206.
24. *Ю.В.Глаголевский*, *Е.Герт*, Бюлл. САО., 58, 17, 2005.
25. *S.Hubrig, M.Scholler, R.V.Yudin*, Astron. Astrophys., 428, L1, 2004.
26. *Yu.V.Glagolevskij, G.P.Topilskaya, T.A.Kartasheva*, Stellar magnetism, Sankt-Peterburg, Nauka, 1992, p.36.
27. *Yu.V.Glagolevskij, G.A.Chountonov*, Bull. SAO., 45, 105, 1998.
28. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, ASP Conf. Ser., №305, 2003, p.225.
29. *V.V.Leushin, Yu.V.Glagolevskij, P.Nort*, Magnetic fields of chemically peculiar and related stars, Moscow, 2000, p.173.
30. *G.Alecian, S.Vauclair*, Astron. Astrophys., 101, 15, 1981.
31. *Ю.В.Глаголевский*, Астрон. ж., 71, 858, 1994.
32. *Ю.В.Глаголевский*, Астрофиз. Бюлл., 62, 1, 2007.
33. *Yu.V.Glagolevskij*, Бюлл. САО., 48, 118, 1998.
34. *Ю.В.Глаголевский*, Астрон. ж., 71, 858, 1994.
35. *S.Hubrig et al.*, Proc. IAU Symp., №259, 2008, p.395.
36. *V.V.Leushin, Yu.V.Glagolevskij, P.North*, Magnetic fields of chemically peculiar and related stars, Moskow, 2000, p.171.
37. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, Magnetic stars, Nizhny Arkhyz, 2011, p.153.
38. *S.Ekström, C.Georgy et al.*, Astron. Astrophys., 537, A146, 2012.
39. *S.Hubrig et al.*, Astron. Astrophys., 539, 352, 2000.
40. *J.D.Landstreet et al.*, Astron. Astrophys., 470, 685, 2007.
41. *A.E.Gomez et al.*, Astron. Astrophys., 336, 953, 1998.