

DOI: 10.54503/0571-7132-2023.66.2-245

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ Ae/Be ЗВЕЗДЫ HD190073

Ю.В.ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 15 марта 2023

Принята к печати 22 мая 2023

Сделана попытка объяснить внезапное изменение поверхностной структуры магнитного поля звезды HD190073, типа HАе/Ве, при предположении переменной нестационарности верхних слоев звезды, которая происходит вследствие аккреции и горения дейтерия. Одновременно приведены данные, которые противоречат предположению генерации магнитного поля внутри конвективного ядра.

Ключевые слова: *Ae/Be звезды: HD190073: магнитное поле*

1. *Введение.* В работе [1] описывается внезапное (с точки зрения длительности жизни звезды до Главной последовательности (ГП)) формирование нового магнитного ротатора Ae/Be Хербига (HАе/Ве) HD190073 и делается попытка объяснения этого явления. Наше представление об этом событии существенно отличается. В данной работе внезапное появление дипольного магнитного поля объясняется с точки зрения сценария происхождения и эволюции магнитных Ар звезд, рассмотренного в ряде работ [2-5]. Однако сначала всего рассмотрим структуру магнитного поля звезды.

2. *Модель магнитного поля HАе/Ве звезды HD190073.* В работе [1] приводятся основные, необходимые нам, параметры звезды: $T_{eff} = 9250$ К, $R = 3.6 R_{\odot}$. В работе [6] определены среднее значение $v \sin i = 4.3$ км/с и период вращения звезды $P = 39.8$ сут. Используя известную формулу линейной скорости экваториальной области $v = 50.6 R / P = 4.55$ км/с [7], получаем величину угла $i = 71^{\circ}$ (при предположении, что формула действительна для звезд HАе/Ве). В работе [6] приведены данные о предельных величинах синусоидального изменения продольного магнитного поля $B_e = -35 \div +55$ Гс. Наблюдательные данные 2012г. хорошо воспроизводятся с помощью синусоидальной кривой, что говорит об обнаружении вращательной периодичности изменений параметров. Таким образом, в этот период времени звезда вела себя как наклонный магнитный ротатор. Из-за недостаточного количества данных невозможно точно определить структуру магнитного поля звезды, поэтому предполагаем наиболее вероятную модель центрального магнитного диполя. Моделирование

выполнено методом, разработанным в [8]. В результате получены следующие параметры: среднее поверхностное магнитное поле $B_s = 45$ Гс, магнитное поле на магнитных полюсах $B_p = \pm 66$ Гс, угол наклона оси диполя к плоскости экватора вращения $\alpha = 30^\circ$. Очевидно, что звезда имеет все признаки магнитных Ар-объектов, кроме относительной слабости поля. Но НАе/Ве звезды, как правило, обладают слабым и даже очень слабым полем, что имеет свои объяснения (см. далее, раздел 5). В настоящее время известны и другие примеры магнитных НАе/Ве звезд, например HD72106, 101412, 200775, V381 Ori [9]. На рис.1 приведена диаграмма эволюционных треков, где изучаемая звезда HD190073 обозначена звездочкой, а остальные кружками. Штриховой линией показана линия рождения [10], на которой звезды частично освобождаются от газопылевого облака и становятся видимыми. Звезда HD190073 находится на половине пути между линией рождения и ZAMS. Это значит, что она все еще окружена оболочкой, а внутренняя магнитная структура магнитного поля еще не успела сформироваться до конца. В этот период аккреция продолжается, но в более слабой степени, чем в период "до линии рождения", а также продолжается поверхностное горение дейтерия [10], звезда продолжает сокращаться.

Следует сделать отдельное замечание относительно сильного отклонения звезды HD200775 ($T_{\text{эфф}} = 17000$ K) от ZAMS. Она находится вне зоны видимости звезды в стадии НАе/Ве, но поскольку магнитное поле у нее измерено и видны фотосферные спектральные линии, то это значит, что она уже прошла момент ZAMS и эволюционирует в пределах полосы ГП.

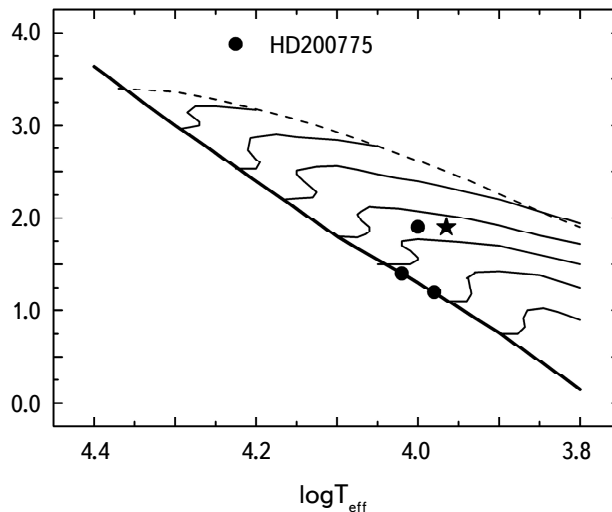


Рис.1. Эволюционные треки на диаграмме Герцшпрунга-Рессела и положение изучаемых НАе/Ве звезд на ней (см. текст). Звездочкой отмечено положение HD190073.

Следует заметить, что у эмиссионных звезд абсолютная болометрическая величина M_b может быть определена с большой ошибкой.

3. Главная проблема: поведение магнитного поля HD190073 со временем. Рассмотрим теперь результаты исследования звезды HD190073, выполненного в работе [6], и попытаемся проанализировать приведенный в этой работе сценарий эволюции ее магнитного поля. Все наблюдения показали признаки зеемановского эффекта в спектрах, что указывает на то, что HD190073 звезда магнитная. Авторы считают, что магнитное поле, заметное в течение многих лет, имеет реликтовое происхождение.

За 2005–2009гг. зеемановский эффект казался постоянным. В этот период не было заметных изменений ни в фотосферных спектральных линиях, ни в линиях окружающей оболочки. В связи с этим Катала [1] предложил 3 гипотезы отсутствия переменности магнитного поля: 1) звезда видна с полюса вращения, 2) магнитная ось и ось вращения совпадают, 3) период вращения слишком велик по сравнению с длительностью наблюдений. Но в 2012г. [6] было замечено, что величина магнитного поля изменяется с периодом 40 дней, поэтому гипотеза 1) исключается. Более того, факт периодичности вращения около 40 дней опровергает гипотезу 3). Поэтому Катала оставил для рассмотрения единственный вариант - до 2011г. магнитная ось совпадала с осью вращения.

За 2009 и 2011гг. произошли изменения, которые повлияли на конфигурацию (наклон) магнитного поля. Период изменений, равный 40 сут, подходит почти ко всем данным 2012г., но не очень хорошо подходит к данным 2011г. Данные 2011г., не отличаются сильной переменностью, они более хаотичны, чем данные 2012г. Авторы [6] предполагают, что в течение сезона наблюдений 2011г. структура поля поменяла свою внутреннюю геометрию, и вариации из-за вращения составляли лишь незначительную часть наблюдаемых изменений. В 2011г. магнитное поле еще не достигло стабильной дипольной конфигурации.

В 2012г. возникла уже стабильная синусоидальная модуляция магнитного поля (всего за три года!). Естественно предположить, что эта модуляция происходила из-за вращения с периодом 40 сут. Таким образом, в этот период звезда вела себя уже как наклонный магнитный ротатор.

4. Возможное объяснение поведения магнитного поля. Согласно работы [6] поведение магнитного поля HD190073 заключается в следующем. Возникшее конвективное ядро генерирует полоидальное динамо-поле, которое взаимодействует с полоидальным реликтовым полем на границе конвективного ядра. Взаимодействие между ними вызывает изменение геометрии, поле становится наклонным, т.е. возникает конфигурация наклонного магнитного ротатора.

Данная гипотеза требует, чтобы начальным условием было совпадение оси вращения и направления полоидального поля. Опыт показывает, что это достаточно редкое событие. Второе требование заключается в необходимости возникновения генерации достаточно сильного полоидального поля, сравнимого с реликтовым. Третье требование заключается в том, чтобы вращение конвективного ядра и звезды происходило бы с одинаковым периодом. Иначе на границе конвективного ядра могут возникнуть значительные неустойчивости [11]. Трудности представленного предположения заключаются в следующем:

а) Гипотеза формирования магнитного поля в конвективных ядрах Ар звезд в настоящее время не имеет физических оснований [3]. Тема дискутировалась в течение многих лет, пока не утвердилась реликтовая гипотеза [12-14]. Поддержка реликтовой гипотезы, в частности, формулируется в [3]. Это главная причина, отвергающая гипотезу магнитного динамо в магнитных звездах.

б) Полоидальное магнитное поле, возникшее в области конвективного ядра, не успеет всплыть до конца жизни ($t = 10^9$ лет) звезды на ГП [15,16], тогда как у звезды HD190073, возраст которой всего $t \approx 10^6$ лет, переориентация по всему объему звезды и всплытие новой структуры предполагается в течение одного-двух лет (раздел 3). Учитывая медленную скорость всплытия магнитных структур можно было бы сразу отказаться от предлагаемого авторами сценария. Но рассмотрим и другие свойства магнитных полей звезд, не поддерживающие предлагаемую гипотезу.

в) Напряженность магнитного динамо-поля зависит от скорости вращения звезды, а такая зависимость у магнитных звезд отсутствует (рис.2, см. разд. 4г).

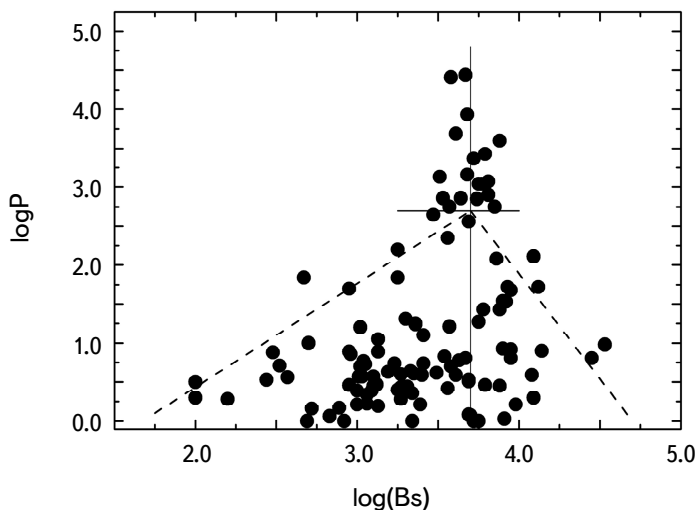


Рис.2. Зависимость периода вращения магнитной звезды от величины магнитного поля (пояснение в тексте).

Следует ожидать также существование зависимости $\alpha(\log P)$, потому что чем быстрее скорость вращения, тем сильнее генерируемое поле, и тем сильнее его влияние на величину реликтового поля и на угол α , в соответствии с предположением [6]. Такая зависимость приведена на рис.3, где линейная регрессия (1) не показывает наличия зависимости.

$$\alpha = (23.4 \pm 4.2) + (2.5 \pm 3.1)T_{eff}. \quad (1)$$

Таким образом, нет признаков работы динамо-механизма и его влияния на наклон α .

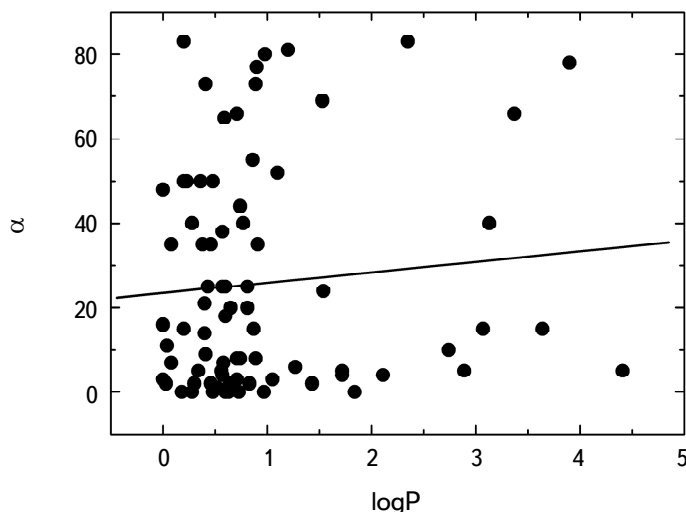


Рис.3. Средняя величина угла α не зависит от величины периода вращения. Звезды с $P > 100^d$ фактически не вращаются.

Другое замечание состоит в том, что магнитные звезды с $\log P > 2$ фактически не вращаются (рис.2), динамо-механизм у них не мог генерировать магнитное поле вообще. В то же время звезды в диапазоне $\log P > 2$ имеют магнитное поле и у них наблюдаются все углы α , как у быстро вращающихся магнитных звезд в диапазоне $\log P = 0.5 - 1$.

г) Рассмотрим зависимость на рис.2 $\log P(\log Bs)$ [17] более подробно. Левая часть зависимости показывает, что чем сильнее магнитное поле, тем медленнее вращается звезда. Эта зависимость, наряду с другими данными, показывает, что магнитное поле не генерируется путем динамо-механизма, но она является следствием произошедшего "магнитного" торможения магнитных протозвезд. Четкость зависимости свидетельствует о том, что она не искажена в течение эволюции каким-либо дополнительным эффектом. Однако правая половина зависимости как будто противоречит левой, но она возникает вследствие более тесного взаимодействия сильного поля с окружающим

протозвезду облаком. В работе [18] делается предположение, что при сильных полях магнитосфера протозвезды начинает влиять на большие объемы окружающих облаков, теряя эффективность потери момента вращения.

Дополнительно к сказанному следует рассмотреть следующую особенность рис.2. Процесс потери момента вращения с участием магнитного поля произошел только в случае тех звезд, которые имеют $\log P \leq 2 - 2.5$, тогда как объекты с $\log P \geq 2 - 2.5$ не испытывали "магнитного" торможения [18]. Предполагается [19], что малый момент вращения им достался от самого "медленного" конца начального распределения скоростей вращения магнитных протозвезд. Это свойство дополнительно можно видеть из рис.4, где показано распределение звезд по периодам вращения $N/N_{\max}(\log P)$. По характеру распределения магнитные звезды состоят из двух групп с $\log P \leq 2 - 2.5$ и $\log P \geq 2 - 2.5$, обозначенных как А и В. Распределение периодов звезд группы А близко к гауссовому, тогда как распределение периодов звезд группы В нарушает эту закономерность. При построении зависимостей от величины магнитного поля с использованием звезд с $\log P \geq 2 - 2.5$ возникает большой разброс точек, но если использовать объекты с $\log P \leq 2 - 2.5$, то разброс получается минимальным. Таким образом, происхождение и эволюция звезд группы В чем-то отличаются от звезд группы А. Предположительно, они не испытывали потерю момента вращения с участием магнитного поля. На рис.2 видно, что периоды вращения этих звезд не зависят от величины магнитного поля, все они имеют поле порядка 5 кГс. Это связано с крайней избирательностью методики измерений [20] у звезд SrCrEu типа по величинам B_s и $v \sin i$. Оценки B_s возможны только у тех объектов, у которых B_s

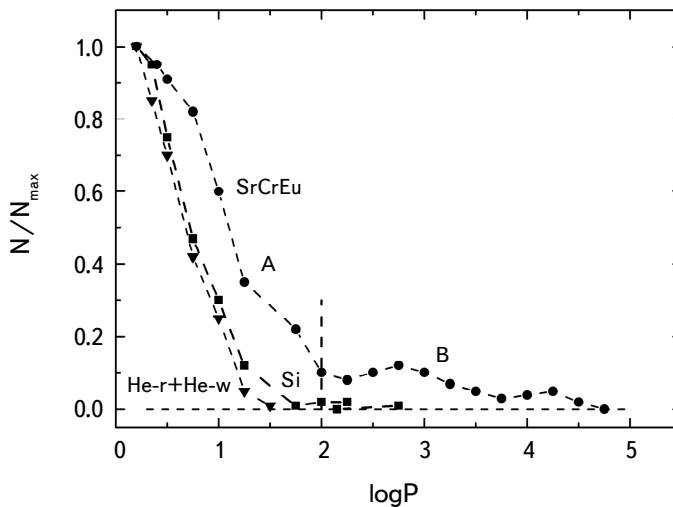


Рис.4. Распределение магнитных звезд разных типов пекулярности по величинам периодов вращения.

максимальны а $v \sin i$ минимальны. Для звезд других типов пекулярности данная методика не использовалась, поэтому на рис.4 нет объектов с $\log P \geq 2 - 2.5$, но очевидно, что они должны быть.

д) Конвективное ядро имеется у всех магнитных Ap-звезд, но нет признаков того, что генерируемое в нем полоидальное магнитное поле как-то влияет на структуру и величину поля всех известных магнитных звезд в течение их эволюции. Если всплытие искаженного магнитного поля в какой-либо звезде происходит в период эволюции на ГП, то это явление будет замечено. Чем больше возраст звезды, тем сильнее должен быть изменен угол α . Исследование магнитных конфигураций Ap-звезд показало их исключительную стабильность в течение всего времени жизни на ГП [21,22], которая обеспечивается высокой проводимостью и динамической стабильностью звездного вещества. На рис.5 показана зависимость углов наклона магнитных диполей к плоскости экватора вращения у звезд разных возрастов [21]. Линейная регрессия не показывает никаких признаков зависимости, структуры магнитного поля Ap-звезд совершенно стабильны во времени.

$$\alpha = (40 \pm 70) - (1.8 \pm 8.4) \log t. \quad (2)$$

Магнитные звезды вращаются твердотельно. Таким образом, в данном случае нет признаков работы динамо-механизма и его влияния на структуру магнитных полей Ap-звезд.

е) Итак, генерируемое в ядре поле, как предполагается в [6], должно влиять, в первую очередь, на наклон магнитного поля в звезде. Однако хорошо известно преимущественное направление магнитных полей по

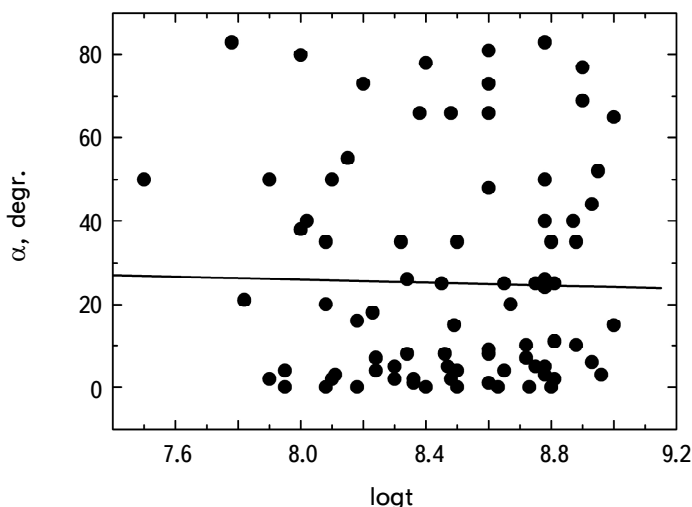


Рис.5. Демонстрация стабильности величины угла α со временем.

отношению к плоскости экватора вращения, оно характерно малыми углами α . В настоящее время это свойство объясняется избирательностью механизма потери момента вращения магнитных протозвезд по отношению к ориентации $\alpha < 20^\circ$ магнитного поля [19,21,23-25] и никоим образом не связано с генерацией магнитного поля в конвективном ядре. Эта зависимость показана на рис.6а и она четко показывает преимущественную ориентацию магнитных

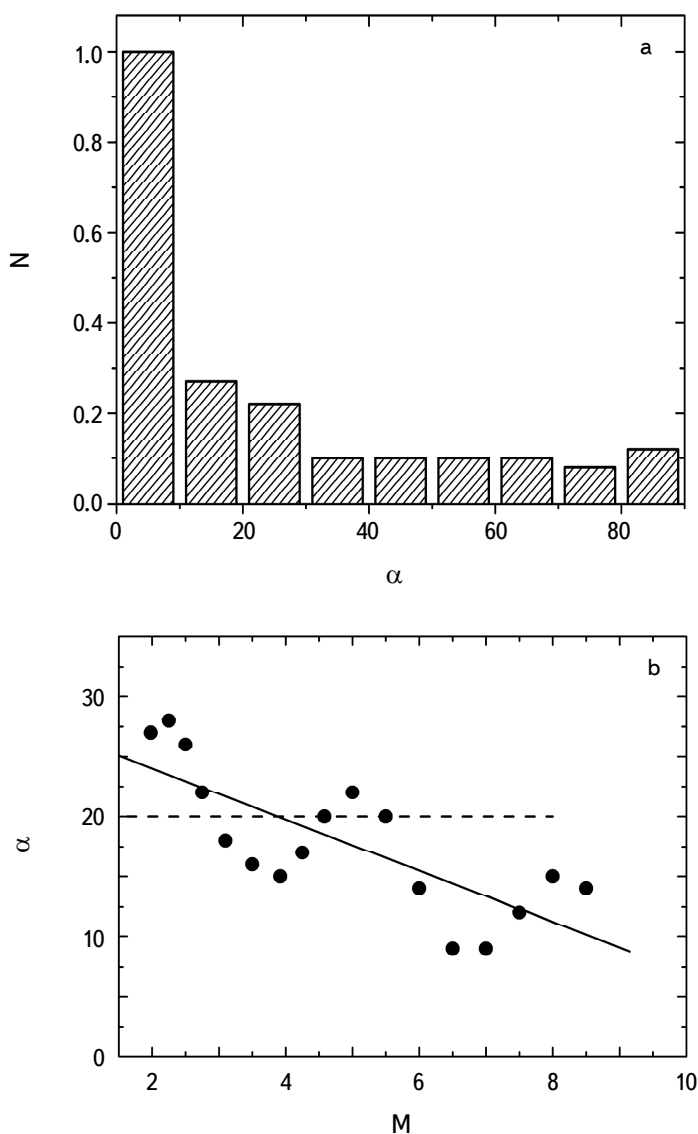


Рис.6. Демонстрация зависимости потери момента вращения от угла α . а) Количество звезд с малыми углами α преобладает. б) Доля звезд с малыми углами α больше среди массивных объектов. Объяснение в тексте.

диполей внутри звезд. Количество звезд на 1° в диапазоне $\alpha = 0 - 20^\circ$ в 7 раз превышает количество звезд на 1° в диапазоне $\alpha = 20 - 90^\circ$. Процесс отбора звезд с $\alpha < 20^\circ$ происходит на стадии эволюции магнитных протозвезд, и если бы существовал эффект переориентации α под действием генерированных магнитных полей, то зависимость на рис.6а исчезла бы. С другой стороны, если бы иерархия начальных магнитных полей оказалась бы под действием иерархии генерированных полей, то вряд ли это привело к наблюдаемой на рис.6а закономерности. Дополнительно к сказанному представляем рис.6b, где показана зависимость средней величины угла α у звезд разной массы. Оказывается, что доля малых углов α у массивных звезд больше, чем у мало массивных. Как это связано с потерей момента вращения? Получается, что требование малой величины угла в случае потери момента вращения массивных звезд более критично, чем в случае маломассивных объектов.

ж) Очевидно, следует ожидать, что величина угла наклона оси диполя к плоскости экватора вращения α зависит от величины магнитного поля B_s звезды. При слабом поле B_s влияние генерируемого поля будет сильнее. Такая зависимость показана на рис.7, причем линейная регрессия и здесь не показывает наличия зависимости, а это значит, что не существует влияния предполагаемого динамо-поля на величины B_s магнитных звезд и на ориентацию магнитных полей.

$$\alpha = (22.8 \pm 3.7) + (0.31 \pm 0.55) B_s. \quad (3)$$

В конце данного рассуждения следует сделать замечание, что напряженность

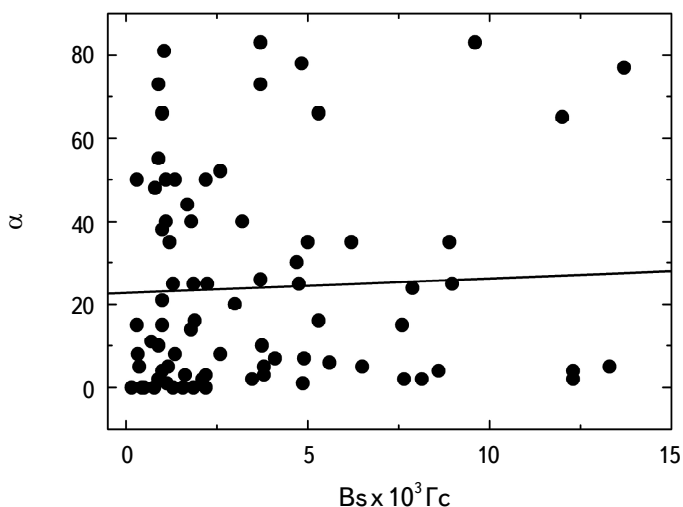


Рис.7. Средняя величина угла α не зависит от величины магнитного поля звезды.

реликтового магнитного поля в звездах колеблется в очень широких пределах и трудно понять, искажено ли оно внешними воздействиями в процессе эволюции. Но сохранение таких заметных зависимостей как $\log P(\log Bs)$ на рис.2 и $N(\alpha)$ на рис.6 после потери момента вращения указывает на отсутствие значительных искажающих эффектов.

5. Новое объяснение поведения магнитного поля HD190073.

В данной работе предлагается иное объяснение поведения магнитного поля HD190073. Для этого рассмотрим вероятную реликтовую гипотезу формирования и эволюции магнитных звезд в период эволюции от нестационарной фазы до ZAMS, которая обсуждалась, в частности, в [2,3,19]. Как бы ни была запутана первоначальная структура магнитного поля у магнитной протозвезды, полный вектор всегда будет иметь некоторую среднюю величину и направление. После нестационарной фазы, очевидно, магнитная структура протозвезды усложняется по сравнению с ранним периодом времени, но основная полоидальная составляющая по всем признакам сохраняется. Это мы видим, в частности, на основании зависимости периода вращения от величины среднего поверхностного магнитного поля $\log P(\log Bs)$ (рис.7), которая сформировалась на ранних этапах в период потери момента вращения протозвезды. После нестационарной фазы возникает конвективно устойчивая лучистая молодая звезда, но с конвективным ядром внутри и аккреционным диском. Конвективное ядро разрушает магнитную структуру внутри себя, но вокруг ядра первоначальная структура остается без изменений. Поскольку молодая звезда динамически стабильна, то после нестационарной фазы в ней сохраняется крупномасштабная полоидальная структура, а мелкомасштабная составляющая сразу же начинает подвергаться омической диссипации за время, обратно пропорциональное квадрату размеров магнитных ячеек (неоднородностей). К моменту выхода HАе/Ве звезды к ZAMS мелкие неоднородности "выгорают" и остается начальная крупномасштабная полоидальная структура, которая в первом приближении описывается теоретическим магнитным диполем и у магнитных звезд малой массы сохраняется до возраста $t = 10^9$ лет. На поверхности HАе/Ве звезды наблюдается мелкомасштабная поверхностная турбулентность, образующаяся в результате аккреции и горения дейтерия [10]. Турбулентность разрушает поверхностное магнитное поле и экранирует внутреннюю структуру поля, и только иногда его можно заметить у некоторых магнитных HАе/Ве объектов, когда поверхностная неустойчивость слабеет. После выхода звезды на ZAMS аккреция и поверхностное горение дейтерия прекращаются и силовые линии внутренней структуры магнитного поля всплывают на поверхность. Медленное вращение магнитных звезд приводит к их динамической стабильности и диффузии химических элементов. Такие звезды

становятся типичными магнитными химически пекулярными объектами. Такова наша точка зрения на сценарий эволюции магнитных HАе/Ве звезд. В период "до линии рождения" нет возможности наблюдать поверхность звезды, но после этого наблюдаются периоды времени, когда турбулентия моментами уменьшается и есть возможность получать спектроскопические данные о поверхностных слоях. В момент таких "окон" становится видимой атмосфера и можно изучить переменность циркулярной поляризации. Такие периоды, очевидно, могут быть достаточно кратковременными по сравнению с длительностью фазы HАе/Ве, что и наблюдается у звезды HD190073. Уже ранние наблюдения показывали сильную фотометрическую и спектральную переменность звезд HАе/Ве [10,26,27], вызванную нестабильностью поверхностных слоев. Переменная интенсивность турбулентии вызывает нестабильное поведение силовых линий магнитного поля, запутывание, потерю направления и напряженности поля. Приведенный анализ еще раз показывает отсутствие признаков магнитного динамо в конвективном ядре магнитных звезд.

6. Заключение. Итак, в конвективном ядре как у звезды HD190073, так и у всех магнитных Ар-звезд нет признаков работы магнитного динамо. По всем признакам эта звезда находится в стадии эволюции "до ZAMS", на поверхности которой продолжают происходить нестационарные явления, вызванные слабой аккрецией, а также турбулентией из-за поверхностного горения дейтерия. Оба процесса крайне нестабильные во времени, в результате чего спектральные свойства звезды изменяются в широких пределах. В минимуме активности поверхностные слои стабилизируются вместе с магнитным полем. В момент выхода звезд на ZAMS турбулентия и горение дейтерия прекращаются, верхний слой атмосферы стабилизируется и силовые линии внутреннего дипольного магнитного поля всплывают на поверхность. В процессе рассмотрения данной проблемы еще раз приведены данные против гипотезы динамо в магнитных звездах. Из приведенного списка литературы видно, что на основании современных данных наиболее вероятной гипотезой происхождения магнитных звезд продолжает оставаться реликтовая.

PECULIARITIES OF THE MAGNETIC FIELD BEHAVIOR OF THE Ae/Be STAR HD190073

Yu.V.GLAGOLEVSKIY

An attempt is made to explain the sudden change in the surface magnetic field structure of the H Ae/Be-type star HD190073 under the assumption of variable non-stationarity of the upper layers of the star, which occurs due to accretion and deuterium burning. At the same time, we present data that contradict the assumption of magnetic field generation within the convective core.

Keywords: *Ae/Be stars: HD190073: magnetic field*

ЛИТЕРАТУРА

1. C.Catala et al., Astron. Astrophys., **462**, 293, 2007.
2. Yu.V.Glagolevskij, Astrophysics, **57**, 315, 2014.
3. Yu.V.Glagolevskij, Astrophys. Bull., **72**(3), 305, 2017.
4. Yu.V.Glagolevskij, Astrophys. Bull., **76**(3), 100, 2021.
5. Yu.V.Glagolevskij, Astrophys. Bull., **76**(4), 435, 2021.
6. E.Alecian et al., Astron. Astrophys., **549**, L8, 2013.
7. M.Netopil et al., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **468**, 2745, 2017.
8. E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij, Bull. SAO, **56**, 25, 2003.
9. Yu.V.Glagolevskij, Astrophys. Bull., **74**(1), 66, 2019.
10. F.Palla, S.W.Stahler, ASP Conf. Ser., **62**, 391, 1994.
11. Yu.V.Glagolevskij, Astrophysics, **63**(3), 376, 2020.
12. T.G.Cowling, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **105**, 166, 1945.
13. L.Spitzer, Diffuse matter in space, New York, Interscience Publication, 1968.
14. L.Mestel, in Magnetic and Related Stars, Ed. by R.C.Cameron, p.101, 1967.
15. E.Parker, Cosmical magnetic fields, Clarendon press, Oxford, 1979.
16. M.Schuessler, A.Paehler, Astron. Astrophys., **68**, 57, 1978.
17. Yu.V.Glagolevskij, Astrophysics, **59**(3), 321, 2016.
18. Yu.V.Glagolevskij, Astrophys. Bull., **77**(2), 166, 2022.
19. Yu.V.Glagolevskij, Astrophys. Bull., **76**(3), 100, 2021.
20. Yu.V.Glagolevskij, Astrophys. Bull., 2023 (in press).
21. Yu.V.Glagolevskij, Astrophysics, **59**(3), 321, 2016.
22. Yu.V.Glagolevskij, A.F.Nazarenko, Astrophysics, **62**(4), 491, 2019.
23. T.Ch.Mouschovias, E.V.Paleologou, Astrophys. J., **230**, 204, 1979.
24. G.W.Preston, Astrophys. J., **150**, 547, 1967.
25. J.D.Landstreet, Astrophys. J., **159**, 1001, 1970.
26. V.S.Shevchenko, The Herbig Ae/Be stars, FAN, Tashkent, 1989.
27. N.S.Schulz, From Dust to Stars, Chichester, 2004, (Chapter 6).