

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СР-ЗВЕЗД НА ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ. III

Ю.В.ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 20 ноября 2013

Принята к печати 19 февраля 2014

Оценки возрастов магнитных звезд показали, что самые старые магнитные звезды имеют возраст $t = 10^8$ лет. Найлены признаки того, что постоянная затухания магнитного поля из-за омических потерь $\tau \gg 10^8$ лет, что подтверждает теоретические расчеты. Это подтверждает также предположение, что в атмосферах магнитных звезд нет никаких причин, кроме омического затухания, разрушающих магнитное поле вплоть до того момента, когда на звезде начинается конвекция. Изменение поверхностного магнитного поля со временем фактически определяется только двумя одновременно действующими в противоположном направлении факторами - уменьшением поля вследствие увеличения радиуса звезд и увеличением поля за счет релаксации мелких структур. Получены дополнительные данные о том, что уменьшение среднего поверхностного магнитного поля с эволюционным ростом радиуса звезд происходит практически по кубической зависимости. Этот результат подтверждает предположение, что крупномасштабная конфигурация магнитных полей приближается к дипольной.

Ключевые слова: *звезды: магнитные поля СР-звезд*

1. **Введение.** В работах I и II [1,2] для исследования изменения магнитного поля звезд Главной последовательности были использованы средние величины B_s поверхностных магнитных полей 120 звезд, оцененные разными авторами по непосредственным измерениям и методом моделирования. В первую очередь, была сделана попытка уточнить время жизни магнитного поля у химически пекулярных звезд, которое вследствие омических потерь предполагается равным $\tau = 10^{10} - 10^{11}$ лет для звезд с радиусом $R > 1.5 R_\odot$. Это важно потому, что исчезновение поля быстрее, чем τ будет указывать на наличие дополнительных источников потерь, таких как меридиональная циркуляция, дифференциальное вращение, турбулентия и др. Как было упомянуто в работах [1,2], оценки разных авторов времени существования полей колеблются в пределах $\tau = 10^8 - 10^{10}$ лет. Наши оценки величины τ , сделанные в работе [3] по звездам в скоплениях разного возраста, нельзя считать достаточно надежными, потому что использовались данные для звезд всех типов пекулярности вместе. Но в работе [1] показано, что звезды основных типов пекулярности- He, Si и SrCrEu имеют существенно разные средние величины поля, что искажает искомые зависимости. Еще сильнее оказалось влияние непрерывного изменения магнитного поля от

практически нулевого значения вблизи ZAMS (Zero Age Main Sequence) до максимального вблизи полосы звезд V класса светимости, возникающего вследствие двух накладывающихся процессов: 1) роста поля вследствие его поверхностной релаксации и 2) одновременного падения поля вследствие эволюционного увеличения радиуса звезды. Несмотря на столь сложное взаимодействие всех факторов, совершенно очевидно, что существуют реальные магнитные звезды с предельным возрастом $t = 10^9$ лет, но не более. Это на два порядка меньше теоретического предела. Надо только понять, изменяется ли полный поток магнитного поля с течением времени и что происходит со звездами после достижения возраста $t = 10^9$ лет.

2. Изменение поля при эволюционном увеличении радиуса.

В первую очередь надо уточнить закон изменения поля вследствие увеличения радиуса. В работе [2] для исключения влияния эволюционного изменения радиуса средние величины поверхностных магнитных полей B_s приводились к моменту, когда они принадлежали, или будут принадлежать V классу светимости, т.е. когда их относительный радиус $R/R_{ZAMS} = 1.4$ (далее R/R_z). При этом предполагалось, что поверхностное магнитное поле уменьшается при эволюционном увеличении радиуса по кубической зависимости как поле точечного диполя, у которого расстояние между магнитными зарядами $l \ll R$, а величина поля изменяется с расстоянием от диполя как $B = q \cdot l / R^3$ (q - заряд монополя, R - радиус звезды). В результате исправления величин B_s за влияние эволюции получилось, что среднее поле с возрастом не меняется вплоть до предельной величины $t = 10^9$ лет, и звезд с большим возрастом не существует. Оказалось также, что кроме уменьшения поля вследствие увеличения радиуса, надо учесть еще быстрый начальный рост поля после ZAMS, происходящий за счет релаксации сложной поверхностной структуры. Наблюдаемые сейчас крупномасштабные неоднородности поля свидетельствуют о том, что в начальных стадиях эволюции поле было неоднородным. Наблюдаемый вектор магнитного поля $\mathbf{B}_{cp} = \mathbf{B} + \Sigma \mathbf{B}_i$, где $\mathbf{B}$ - вектор глобального дипольного поля, $\mathbf{B}_i$ - векторы полей неоднородностей, i - число неоднородностей. Неоднородности на поверхности постепенно исчезают вследствие неустойчивости за время, пропорциональное квадрату характерных размеров неоднородностей. На ZAMS'e у звезды наблюдается в основном только верхний слой неоднородного поля, возмущенного аккреционными процессами, которое за счет релаксации мелких неоднородностей вначале быстро исчезает, после чего начинает проявляться основное дипольное поле. Вероятно, дипольное поле внутри звезды, которое успело сформироваться до достижения Главной последовательности, организует поле поверхностных структур. Таким образом, кроме глобального магнитного поля дипольной формы на поверхности звезды должны наблюдаться мелкие неоднородности, намагниченные в разных направлениях.

Как видно из работы [4], размеры l магнитных диполей у СР- звезд получаются порядка долей радиуса звезд и условие $l \ll R$, не выполняется. Следовательно, напряженность магнитного поля изменяется с расстоянием от диполя медленнее, чем получается при кубической зависимости. В работе [5] предполагалось падение поля по квадратическому закону. Нам неизвестна реальная величина этой степени, и неизвестно как она влияет на результат приведения B_s -звезд к $R/R_z = 1.4$, поэтому для выяснения степени ее влияния на приведенные величины был выполнен вариант с учетом квадратического закона и результат сравнен с данными при предположении кубической зависимости.

На рис.1а точками показаны наблюдаемые средние величины B_s на разных R/R_z . Следует заметить, что самая левая точка $R/R_z = 0.9$ - средняя

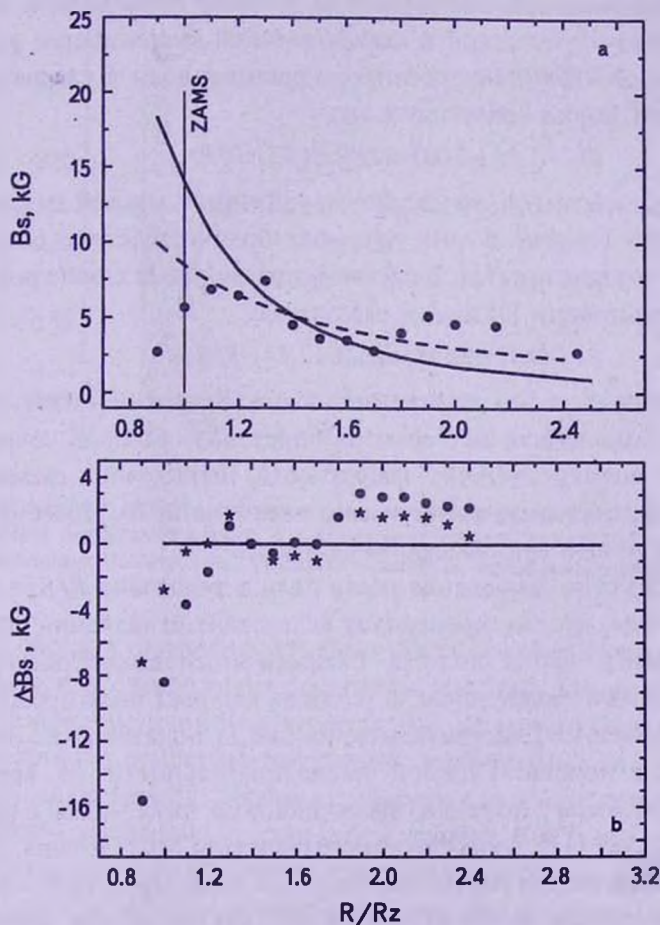


Рис.1. Изменение среднего поверхностного магнитного поля B_s в течение эволюции звезды поперек полосы Главной последовательности. а - Кружки - измеренные величины; сплошная линия - кубический закон изменения, штриховая линия - квадратический закон изменения. б - Отличие ΔB_s средних наблюдаемых величин B_s от кубической (кружки) и квадратической зависимостей (звездочки).

величина B_s по трем Ae/Be-звездам Хербига, которые уже сформировали свое дипольное поле [6,7]. Вообще же, среднее поле молодых звезд, выходящих на ZAMS, имеет порядок сотни гаусс [8-10]. Поэтому левая часть зависимости $B_s - (R/R_z)$ на самом деле должна изменяться быстрее. Степень роста поля после ZAMS должна быть уточнена после увеличения количества наблюдательных данных. Сплошной линией проведена кубическая зависимость, штриховой - квадратическая. На рис.1b показано отличие ΔB_s в отдельных фазах средних наблюдаемых величин B_s от кубической (кружки) и от квадратической зависимостей (звездочки). Из рис.1a и 1b видно, что величины B_s изменяются со временем не только из-за увеличения радиуса (уменьшаются), но также вследствие релаксации (увеличиваются) поверхностной тонкой структуры магнитного поля из-за их неустойчивости [2]. Все наблюдаемые средние величины B_s были приведены к моменту $R/R_z = 1.4$ с учетом кубической и квадратической зависимостей отдельно.

Зависимость $B_s - (R/R_z)$, построенная по исправленным за квадратический эффект данным, имеет следующий вид

$$B_s = (1.55 \pm 2.00) + (2.49 \pm 1.33) \cdot R/R_z,$$

т.е. угол наклона небольшой, но достаточно уверенный; угловой коэффициент равен 1.9σ . Это говорит о том, что рост поля вследствие релаксации полностью не компенсируется. В случае исправления B_s с использованием кубической зависимости [2] имеем следующее

$$B_s = (9.12 \pm 12.68) + (0.46 \pm 1.44) \cdot R/R_z.$$

Наклон отсутствует, а это показывает, что кубический закон ближе к реальному. К сожалению, нет способа определить степень точнее. Для более точной оценки степени зависимости необходимо существенно увеличить количество звезд с известными величинами B_s . Поэтому впредь мы учитываем только кубическую зависимость.

На рис.1b заметно замедление роста поля в диапазоне $R/R_z = 1.3 - 1.7$. Мы предполагаем, что это происходит вследствие замедления движения звезды в верхней части полосы Главной последовательности, где эволюционный трек делает зигзаг, в то время как рост поля продолжается с прежней скоростью. Действительно, на рис.2a показано как движется звезда поперек полосы Главной последовательности со временем. Зависимость построена с помощью эволюционного трека звезды с радиусом $R = 1.5 R_\odot$ на ZAMS [11], соответствующего звездам SrCrEu-типа. Хорошо видно, что радиус звезды плавно меняется до момента $R/R_z = 1.9$, затем, в диапазоне возрастов от $0.9 \cdot 10^9$ до $1.4 \cdot 10^9$ лет, ее радиус фактически остается неизменным, после чего звезда продолжает увеличиваться в размерах. Следовательно, скачек B_s на рис.1b после $R/R_z = 1.9$ происходит за счет не прекращавшегося роста магнитного поля вследствие релаксации поверхностной структуры при постоянном радиусе.

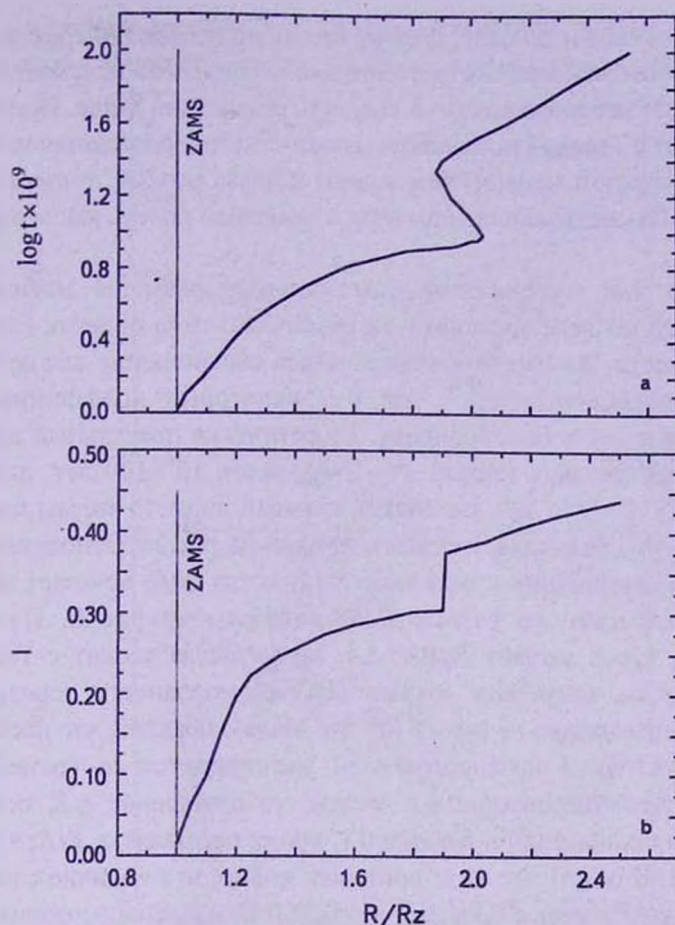


Рис.2. Изменение свойств магнитных звезд при их эволюционном движении поперек полосы Главной последовательности. а - изменение возраста звезд SrCrEu-типа на разных R/R_z . б - изменение минимальных размеров магнитных неоднородностей на разных R/R_z .

Таким образом, очевидно, что факт роста поверхностного магнитного поля с возрастом определяется достаточно надежно. Он не противоречит предположению, что поверхностная структура магнитного поля неоднородна, хотя и достаточно стабильна (отсутствует турбулентия) для поддержания диффузионных процессов. Степень неоднородности уменьшается с возрастом, а оставшиеся неоднородности становятся крупнее. Как было сказано выше, полный вектор магнитного поля состоит из суммы основного "дипольного" вектора и мелкомасштабной составляющей, которая должна влиять только на ширину спектральных линий.

Максимум изменения поля может происходить для разных групп звезд на разных R/R_z , потому что его положение зависит от того, когда кубическая зависимость начинает преобладать над зависимостью роста поля. У He-звезд

этот момент происходит раньше, потому что их движение поперек полосы Главной последовательности быстрее. Вначале после ZAMS исчезают самые мелкомасштабные неоднородности, и скорость релаксации выше. Поскольку He-звезды уходят с Главной последовательности быстро, релаксация успевает происходить в среднем меньше, чем у звезд с более низкой температурой. Поэтому среди He-звезд меньше объектов с заметным полем, как это видно из работы [10].

Посмотрим как изменяются минимальные размеры магнитных неоднородностей по мере эволюции звезды SrCrEu-типа поперек Главной последовательности. Для этого использовалось соотношение для времени жизни неоднородности $t = k \cdot r^2$, где k - некоторый коэффициент, а r - характерный размер неоднородности. Теоретически предельный возраст магнитного поля звезды с массой $M = 2M_{\odot}$ равен 10^{10} - 10^{11} лет, диаметр звезды на ZAMS $D = 2.17 \cdot 10^6$ км. Максимальный диаметр звезды примем равным $5.5 \cdot 10^6$ км. Величины t сняты с кривой на рис.2а. Относительные величины r (по отношению к величине $r=1$, когда поле исчезает за счет омической диссипации) на разных R/R_z показаны на рис.2б. Из этого рисунка видно, что в момент $R/R_z \sim 2.4$, когда звезда уходит с Главной последовательности, могут еще сохраняться неоднородности порядка 0.4 конечного диаметра звезды, т.е. до $\sim 2 \cdot 10^6$ км. Можно показать, что поскольку максимальная величина неоднородностей увеличивается со временем и одновременно увеличивается радиус звезды, то отношение r/R остается приблизительно постоянным и равным 0.1, кроме промежутка $R/R_z = 1 - 1.1$, где оно меньше. В результате этой прикидки видно, что наличие сложных магнитных структур у звезд с большим возрастом не является неожиданным. Их время жизни только в разы, а не на порядки, меньше времени жизни дипольной составляющей магнитного поля.

3. *Предельный возраст магнитных звезд.* В предыдущих работах [1,2] описаны способы оценок возрастов изучаемых магнитных звезд. На рис.3а самые долго живущие звезды SrCrEu-типа нанесены на диаграмму Герцшпрунга-Рессела. Обозначения там следующие: сплошной линией обозначена Начальная Главная последовательность (ZAMS), толстой штриховой линией обозначена верхняя граница ZAMS. Цифры относятся к разным изохронам и обозначают возраст в единицах 10^4 лет. Буквами Т обозначены эволюционные треки. Тонкой штриховой линией справа обозначена граница, достигнув которую при своем эволюционном движении, звезды теряют дипольное магнитное поле, не достигнув верхней границы Главной последовательности. Таким образом, часть звезд разных типов пекулярности достигает верхней границы полосы Главной последовательности и покидает ее в разном возрасте (см. рис.3б и рис.3с) и теряет дипольное поле. Интереснее выглядит положение самых старых объектов, к которым относятся самые

правые холодные звезды на рис.3а правее изохроны $t=10^9$ лет. На диаграмме видно, как и на зависимостях $B_s-(\log t)$ в предыдущих работах [1,2], что,

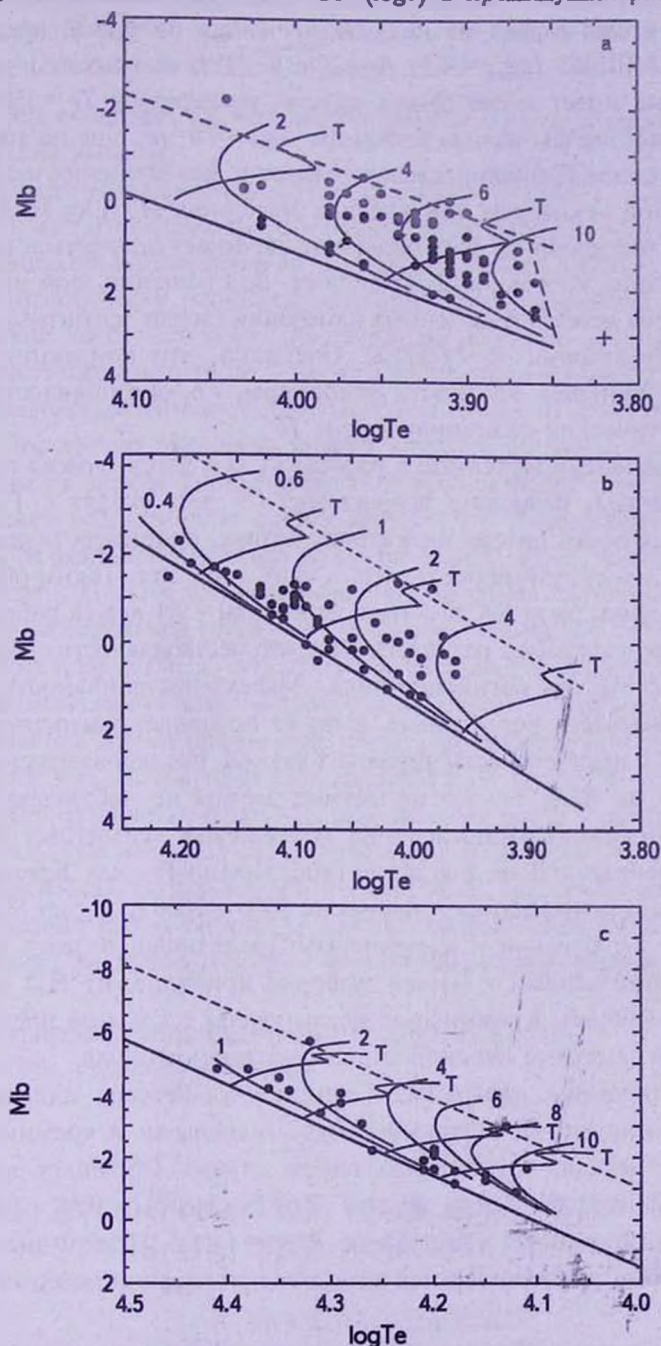


Рис.3. Магнитные звезды разных типов пекулярности на диаграмме Гершпрунга-Рессела. а - звезды SrCrEu-типа (цифры рядом с изохронами - возраст в 10^9 лет), крестик - самая старая звезда HD 101065); Т - эволюционные треки. б - то же, что на (а) для звезд Si-типа. с - то же, что на (а) для звезд He-r+He-w-типов, но цифры - возраст в 10^9 лет.

звезды движутся вдоль эволюционных треков вправо и вверх до тонкой штриховой линии, после этого исчезают. Возраст этих звезд немного более $\log t = 9.0$ лет. Самая старая из них, обозначенная на рис.3а крестиком справа, это HD 101065 ($\log g = 4.2$, $B_s = 2300$ G [12], ее возраст $\log t = 9.1$, $R/R_{\text{ZAMS}} = 1.1$, она имеет также самую низкую температуру $T_e = 6500$ K.

Самые правые звезды вблизи изохроны $\log t = 9.0$ лет еще не достигли верхней части полосы Главной последовательности. Без сомнения магнитное поле исчезает при некоторых критических значениях M_b и $\log T_e$. Можно предположить, что в данной фазе эволюции начинает появляться поверхностная конвекция, которая разрушает поле. Для решения этой интереснейшей проблемы необходимы точные измерения слабых магнитных полей у звезд с температурами $T_e < 6000$ K. Очевидно, что конвекция легче образуется при меньшей плотности атмосферы, т.е. она появляется при некоторых критических величинах $\log g$ и T_e .

Учитывая данные, полученные в работах [1,2] и здесь, можно предположить, что звезды, имеющие возраст $\log t < 9$ лет, уходят с Главной последовательности без потери магнитного потока, например, постоянная затухания поля из-за омических потерь $\tau = 10^{10} - 10^{11}$ лет. Таким образом, предельный возраст звезд SrCrEu-типа равен $\log t = 9.1$ лет (в работе [13] $\log t = 9.0$). Этот результат еще раз показывает, что нестабильность атмосферы губительно действует на магнитное поле. Эффект нестабильности делит звезды на магнитные и нормальные, а также подавляет магнитное поле при достижении верхней части полосы Главной последовательности, в результате чего на $R/R_z > 2 - 2.5$ магнитные звезды не наблюдаются.

На рис.3b показано распределение кремниевых магнитных звезд с известными величинами B_s на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Кремниевые и SrCrEu-звезды перекрываются в диапазоне 8400 - 10600 K за счет SiSrCrEu звезд, которые мы отнесли к кремниевым. Предельный возраст звезд с кремниевыми аномалиями в нашей выборке принадлежит HD 143473, имеющей $\log t = 8.66$ лет. Кремниевые звезды уходят с Главной последовательности, имея заметные неоднородности магнитного поля.

На рис.3с показана диаграмма Герцшпрунга-Рессела для звезд с аномальными линиями He. Граница между гелиевыми и кремниевыми звездами более четкая, чем в предыдущем случае. Обращает на себя внимание концентрация звезд вблизи ZAMS, потому что основное количество звезд находится в диапазоне $R/R_z = 1 - 1.5$. В этом диапазоне магнитное поле быстро увеличивается вследствие релаксации поверхностной структуры.

Учитывая, что у звезд с большими массами эволюция происходит быстрее, очевидно, что величина поля не успевает достигнуть заметного уровня и на $T_e \sim 24000$ K (в нашей выборке это HD 64740, $\log t = 7.08$) магнитные звезды

исчезают. Это замечание было высказано и в [1,2]. Небольшое магнитное поле $B_s = 828$ Гс найдено пока только у звезды O- типа HD 149438 [15,16], имеющей $T_e = 30000$ К. Не исключено, что имеет место также эффект неустойчивости атмосфер таких звезд.

4. Заключение. На основании данной работы и работ [1,2] сделаем следующие выводы:

1) Предельный возраст магнитных звезд $t = 10^9$ лет, после достижения которого магнитное поле на поверхности у них исчезает, вероятно, вследствие возникновения конвекции. При температурах выше 18000 К магнитное поле звезд статистически начинает ослабляться и прерывается на $T_e \sim 24000$ К вследствие того, что темп эволюции звезд велик и сложная структура поверхностного магнитного поля не успевает релаксировать. Не исключено, что сказывается нестационарность в верхних слоях атмосфер.

2) Достаточно уверенно можно утверждать, что магнитное поле на поверхности звезды уменьшается с возрастом вследствие эволюционного увеличения радиуса звезд приблизительно по кубическому закону. Основываясь на результатах моделирования магнитных полей, можно предположить, что степень должна быть меньше, чем в случае "точечного" магнитного диполя, но вероятнее всего она не сильно отличается от 3.

3) Рост поля после ZAMS за счет релаксации мелких структур, очевидно, происходит на самом деле быстрее, чем наблюдается. Наблюдаемое изменение "размывается" двумя причинами: 1) за счет ошибок величин R/R_z и 2) за счет того, что звезды приходят на ZAMS не точно на $R/R_z = 1$.

4) Нет признаков того, что при подходе звезд к возрасту $t = 10^9$ лет магнитное поле начинает падать вследствие омического эффекта. Очевидно, что постоянная затухания магнитного поля на самом деле $\tau > 10^9$, что подтверждает вывод работы [17] и результаты теоретических оценок для звезд таких радиусов, которые имеют магнитные звезды.

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

THE EVOLUTION OF MAGNETIC FIELDS OF CP STARS ON THE MAIN SEQUENCE. III

Yu.V.GLAGOLEVSKIY

Age estimates of magnetic stars have shown that the oldest magnetic stars have ages of $t = 10^9$ years. Indications are found that the magnetic field decay

constant due to the ohmic losses is $\tau \gg 10^9$ years, confirming the theoretical calculations. This confirms the assumption that in the atmospheres of magnetic stars there are no factors, other than ohmic damping, destroying the magnetic field until the time when convection starts. The variation of the surface of the magnetic field over time is actually determined by only two factors, simultaneously acting in the opposite directions - the reduction of the field due to the increased radius of the stars and the increase of the field due to the relaxation of small structures. There is additional evidence that the decrease in the average surface magnetic field with the evolutionary increasing stellar radii is cubic dependence. This result supports the assumption that the large-scale configuration of the magnetic fields approaches the dipole pattern.

Key words: stars: magnetic fields of CP stars

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, **56**, 189, 2013.
2. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, **56**, 441, 2013.
3. Ю.В.Глаголевский, В.Г.Ключкова, И.М.Копылов, *Астрон. ж.*, **64**, 360, 1987.
4. Yu.V.Glagolevskij, *Astrophys. Bull.*, **66**, 144, 2011.
5. Yu.V.Glagolevskij, *Magnetic stars*, Leningrad, Nauka, 1988, p.206.
6. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, **55**, 189, 2012.
7. Ю.В.Глаголевский, *Астрофиз. Бюлл.* (готовится к печати).
8. Yu.V.Glagolevskij, *Chemically peculiar and magnetic stars*, Tatranska Lomnica, 1994, p.21.
9. Yu.V.Glagolevskij, G.A.Chountonov, *Stellar magnetic fields*, Moscow, p.116, 1997.
10. Yu.V.Glagolevskij, G.A.Chountonov, *Bull. SAO*, **45**, 105, 1998.
11. S.Ekstrem, C.Georgy et al., *Astron. Astrophys.*, **537**, A146, 2012.
12. D.Schulyak et al., *Astron. Astrophys.*, **520**, A88, 2010.
13. A.E.Gomez et al., *Astron. Astrophys.*, **336**, 953, 1998.
14. Yu.V.Glagolevskij, *Bull. SAO*, **53**, 33, 2002.
15. J.-F.Donati et al., *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **370**, 629, 2007.
16. Yu.V.Glagolevskij, *Astrophys. Bull.*, 2014 (в печати).
17. Yu.V.Glagolevskij, *Magnetic stars*, Leningrad, "Nauka", 1988, p.206.