

УДК 524.35

ЗАМЕЧАНИЯ О РАЗЛИЧИИ СВОЙСТВ АМ- И АР-ЗВЕЗД

© 2021 Ю. В. Глаголевский^{1*}¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

Поступила в редакцию 31 января 2020 года; после доработки 20 октября 2020 года; принята к публикации 20 октября 2020 года

Проведен сравнительный анализ свойств Ар- и Ам-звезд. Показано, что основные различия в формировании и эволюции этих объектов обусловлены влиянием магнитного поля у Ар-звезд.

Ключевые слова: *звезды: химически пекулярные*

1. ВВЕДЕНИЕ

Практически с самого начала исследований магнитных Ар-звезд и немагнитных металлических Ам, HgMn, λ Boo и других химически пекулярных (CP) звезд середины полосы диаграммы Герцшпрунга–Рессела было известно, что они вращаются примерно в 2–2.5 раза медленнее нормальных звезд, занимая при этом ту же область диаграммы. Абт в 1965 г. задавал вопрос, почему быстро вращающиеся ($100\text{--}250\text{ км с}^{-1}$) звезды имеют нормальный химический состав, а медленно вращающиеся ($0\text{--}100\text{ км с}^{-1}$) — аномальный? Он предположил (Abt 1965), что медленное вращение необходимо для формирования химически пекулярных звезд. Следом возникли другие вопросы: по какой причине у Ам-звезд при наличии химических аномалий нет магнитного поля, почему у них другие характерные химические аномалии, отсутствует известное для Ар-звезд неравномерное распределение химических элементов по поверхности? Далее мы попытаемся разобраться в некоторых деталях происхождения и эволюции магнитных и немагнитных химически пекулярных звезд. Предварительно эти проблемы обсуждались в работе Glagolevskij (2014).

2. СВОЙСТВА Ам-ЗВЕЗД

2.1. Основные параметры

Ам-звезды имеют такие же эффективные температуры T_{eff} , как и самые холодные Ар-звезды SrCrEu-типа пекулярности, находящиеся в пределах $T_{\text{eff}} = 7000\text{--}9000\text{ К}$. Это видно, в частности, из распределения Ар- и Ам-звезд по возрастам рис. 1a и 1b (см. также Glagolevskij 2019). Средний радиус магнитных SrCrEu-звезд в этом диапазоне температур $R/R_{\odot} = 2.23 \pm 0.16$ (Glagolevskij

2019), и он равен среднему радиусу у Ам-звезд, у которых $R/R_{\odot} = 2.55 \pm 0.33$ (Lane and Lester 1984) (см. таблицу 1). Величины $\lg g$, диапазон температур, как видно из таблицы 1, соответствуют положению Ам-звезд в пределах диаграммы Герцшпрунга–Рессела (R/R_z — радиус звезды относительно ее же радиуса на Главной последовательности нулевого возраста (ZAMS)). Это значит, что Ам-звезды имеют такой же, как и Ар-звезды, эволюционный статус, тоже имеют лучистый перенос энергии в атмосферах, то есть атмосферы у них не конвективные, как у звезд с массой $M/M_{\odot} < 2$ (Palla and Stahler 1993; 1994). По всем признакам это такие же звезды, как SrCrEu-объекты, имеющие $T_{\text{eff}} < 9000\text{ К}$, только без магнитного поля.

В таблице 1 приведены эффективные температуры T_{eff} из работы Lane and Lester (1984), определенные по распределению энергии в непрерывном спектре, и наши $T_{\text{bg}}^{\text{eff}}$, оцененные по параметру ($B2 - G$) женеvской фотометрии с помощью калибровки Hauck and North (1993). Видно, что системы температур практически не различаются. Это вывод, который будет обсуждаться в дальнейшем.

2.2. Формирование Ар- и Ам-звезд и скорости их вращения

На рис. 2a показано распределение Ар- и Ам-звезд по скоростям вращения $v \sin i$, построенное на основании работ Abt and Morrell (1995), Glagolevskij (2017b). Видно, что эти звезды имеют совершенно одинаковые распределения. Это указывает на то, что мы имеем дело с одинаковыми звездами. На рис. 2b показано распределение (Ар + Ам)-звезд и «нормальных» звезд без магнитного поля, имеющих нормальный химический состав (зависимости построены на основании статьи Abt and Morrell (1995)). Смещение пика

*E-mail: glagol@sao.ru

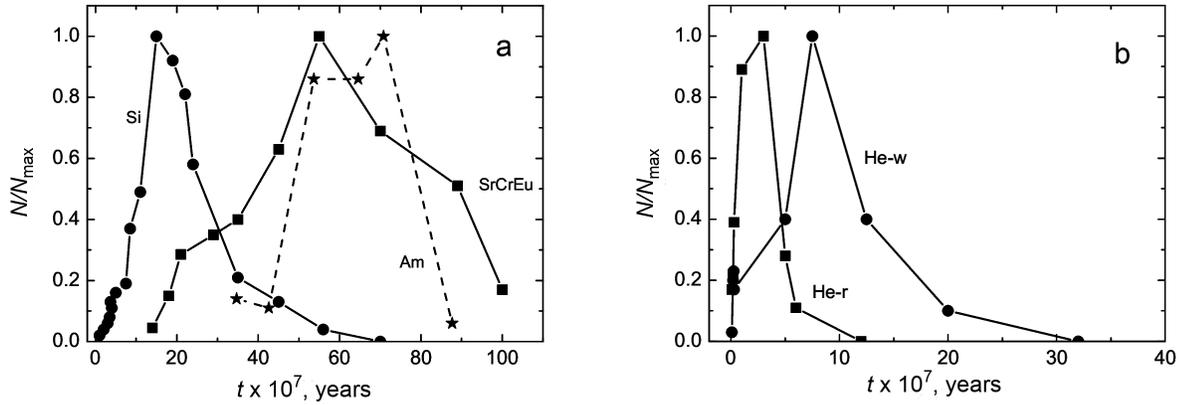


Рис. 1. Распределение химически пекулярных звезд по возрасту: (a) — Si-, SrCrEu- и Am-звезды, (b) — He-r и He-w-звезды.

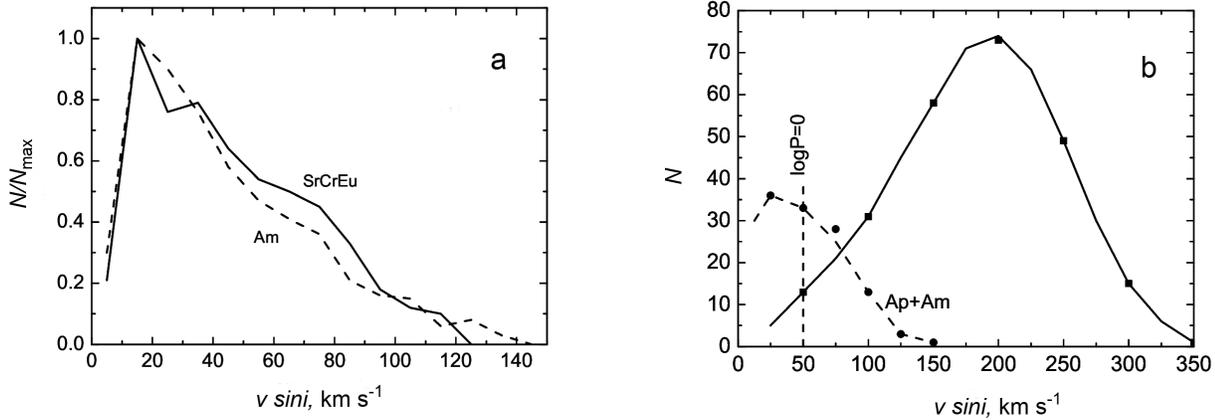


Рис. 2. Распределение звезд по скоростям вращения $v \sin i$: (a) — SrCrEu-звезд (штриховая линия), Am-звезд (сплошная линия), (b) — (Ar + Am)-звезд (штриховая линия), нормальных звезд (сплошная линия).

распределения (Ar + Am)-звезд показывает, что они потеряли момент вращения вследствие работы какого-то механизма. Так, магнитные Ар-звезды, как предполагается, потеряли момент вращения на стадии эволюции магнитных протозвезд с помощью механизма «магнитного торможения», предложенного в работе Mouschovias and Paleologou (1979) и других работах этих авторов. Этот механизм хорошо объясняет такие выдающиеся свойства магнитных звезд как преимущественную ориентацию магнитных диполей в пределах $\alpha = 0-20^\circ$ относительно плоскости экватора, частично малую, 10%, долю магнитных звезд.

Если \mathbf{J} — угловой момент вращения протозвездного облака, \mathbf{B} — вектор магнитного поля, то магнитное торможение в случае $\mathbf{J} \perp \mathbf{B}$ может

изменить угловой момент протозвездной эволюции на несколько порядков величины за время меньшее, чем 10^6 лет. Это время уменьшается, если сжатие продолжается. Эффективность магнитного торможения много выше в случае $\mathbf{J} \perp \mathbf{B}$, чем когда $\mathbf{J} \parallel \mathbf{B}$. Потеря момента вращения на более поздних стадиях эволюции маловероятна при тех больших плотностях, которые существуют у звезд НАеВе (Dudorov and Tutukov 1990, Mouschovias and Paleologou 1979). Что касается Am-звезд, то потеря момента вращения у них произошла без участия магнитного поля, предположительно, посредством приливного взаимодействия с близким компонентом (Abt 1961; 1965).

Авторы статьи Abt and Snowden (1973) нашли, что почти 100% Am-звезд являются спектроско-

Таблица 1. Параметры звезд

HD	T_{eff} , К	$T_{\text{bg}}^{\text{eff}}$, К	$\lg g$	R/R_{\odot}
27628	6900	7200	3.6	2.0
27749	7000	7200	3.4	2.0
27962	8700	8950	4.3	2.5
28546	7300	7550	3.8	2.0
29140	7800	8000	4.0	3.1
40136	7000	7000	4.1	1.8
40932	8180	8050	4.0	—
78362	7110	7000	3.1?	—
95608	8900	9000	4.2	4.6
189849	7500	7950	3.5	2.4

пических двойными, тогда как среди Ар-звезд таких систем только около 20%, то есть среди Ар-звезд наблюдается хорошо известный дефицит тесных двойных. Он возникает, по-видимому, вследствие недостаточного для разделения момента вращения магнитного протозвездного облака из-за «магнитной» потери момента вращения. В то же время, число визуальных двойных среди Ар-звезд оказывается нормальным.

Многие авторы пытались объяснить потерю момента вращения звезд в момент эволюционного выхода на Главную последовательность (ГП), но очевидно, что это событие произошло до выхода звезды на ГП, потому что на ZAMS они уже являются типично медленными ротаторами. Магнитные протозвезды потеряли момент вращения в течение гравитационного коллапса до достижения нестационарной фазы Хаяши, потому что в этой фазе происходит запутывание и ослабление магнитного поля (см. раздел 2.5). В результате на стадии НАеВе потеря момента вращения становится маловероятной. При скорости вращения магнитной протозвезды, превышающей некоторую критическую величину V_c , в ней возникает дифференциальное вращение (Glagolevskij 2017a), при котором внутренние области вращаются быстрее (Moss 1974; 1975). Вследствие вмороженности, магнитное поле закручивается в тороидальную форму, не обнаруживаемую в будущей звезде зеемановской методикой. Звезда становится «нормальной», хотя и «магнитной» внутри. Других гипотез пока нет.

В период эволюции звезд на ГП, медленное вращение у Ар- и Ам-ротаторов приводит к условиям, обеспечивающим стабилизацию атмосферы, в которой происходит беспрепятственная диффузия химических элементов под действием гравитации,

лучевого давления и ветра, а также твердотельное вращение (см. далее). Медленное вращение, как замечено в работах Abt (1965), Abt and Morrell (1995), является критическим свойством, позволяющим появляться химическим аномалиям в атмосферах звезд.

Исследуя визуально двойные звездные системы, Абт пришел к заключению, что Ам-звезды иногда встречаются в паре с нормальными, с Ар- или Ам-звездами. Проблема состоит в том, как из единого облака возникают магнитные Ар- и немагнитные Ам-звезды? Очевидно, в общем турбулизованном протозвездном облаке могут встречаться намагниченные области, из которой сформировалась магнитная звезда, и области без магнитного поля, из которой сформировалась Ам-звезда. Небольшая часть Ар- и Ам-звезд могла возникнуть в случае их изначально медленного вращения, из левого конца распределения по скоростям (рис. 2b). В таких случаях могли сформироваться магнитные звезды с периодами вращения в десятки лет. Часто обсуждаемая в литературе проблема десятипроцентной доли химически пекулярных звезд, по-видимому, может быть объяснена не только избирательным к углу α механизмом торможения Ар-звезд, но и тем, что степень торможения на самом деле невелика, в результате чего магнитные звезды формируются из самых медленных ротаторов распределения (рис. 2b). Исходя из этого, можно предположить, что многолетние периоды вращения Ар-звезд, достигающие $30\,000^{\text{d}}$ (γ Equ), возникают не столько вследствие потери момента вращения в протозвездной стадии, сколько из-за их начальной медленной скорости.

На рис. 3 показана зависимость $\lg P$ от B_s для магнитных звезд. Из нее видно, что действительно существует эффект «магнитного» торможения протозвезд, зависящий от величины магнитного поля, но он приводит к периодам только до $P \approx 100^{\text{d}}$, что на три порядка меньше максимальных величин. Рисунок 3 показывает также, что потеря момента вращения наиболее эффективна в случае некоторой определенной величины магнитного поля у протозвезд, которая в звездной стадии равна $B_s \approx 6.5$ кГс. Почему при больших величинах магнитного поля эффективность «торможения» падает, пока неясно.

Таким образом, магнитные звезды делятся на две категории: с нормальными и экстремальными периодами P . Экстремальных звезд мало, но из-за своих выдающихся величин P они сильно искажают связанные с ними изучаемые зависимости. Их влияние становится практически незаметным, если используются данные только для звезд с $P < 50^{\text{d}}-100^{\text{d}}$. До сих пор точно неизвестно, при какой величине магнитного поля Ам-звезда становится «металлической», а Ар-звезда перестает

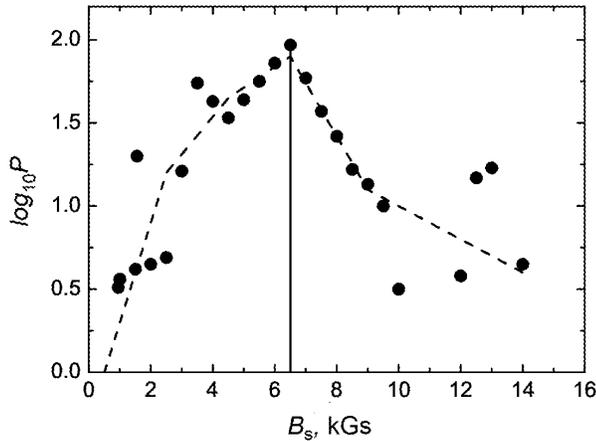


Рис. 3. Зависимость величины периода вращения от среднего поверхностного магнитного поля.

быть пекулярной. Предполагается, что при значении, менее 10 Гс (Aurière et al. 2010).

2.3. Другие гипотезы о формировании «нормальных» и химически пекулярных Ар- и Ам-звезд

В предыдущем разделе мы показали наше представление о формировании Ар, Ам и «нормальных» звезд. Существуют другие гипотезы:

А. Абт предполагал, что быстрое вращение может вызвать в стадии эволюции на ГП меридиональную циркуляцию, которая возникает при быстром вращении звезд и которая «размешивает» поверхностное вещество, создавая нормальное содержание (Abt 1965). В медленно вращающихся Ар- и Ам-объектах меридиональная циркуляция не возникает, особенности химического состава сохраняются. Возражение состоит в том, что отделение Ар- и Ам-звезд от «нормальных» объектов произошло в период гравитационного коллапса (Glagolevskij 2017b). Ар- и Ам-звезды наблюдаются уже среди поздних НАеВе объектов и на ZAMS, даже такие, как быстро эволюционирующие звезды с гелиевыми аномалиями He-g и He-w-типа. Меридиональная циркуляция процесс очень медленный, длительность оборота циркуляции составляет 10^8 лет, тем не менее быстро эволюционирующие He-g и He-w-звезды со всеми своими свойствами появляются на ZAMS так же, как Ам- и Ар-объекты SrCrEu-типа (Glagolevskij 2020) (см. рис. 4). На рис. 1b видно, что они уходят с ГП в возрасте 10^7 лет. Это значит, что меридиональная циркуляция не существует ни в Ар-звездах во всем диапазоне масс, ни в Ам-звездах. Только SrCrEu-объекты имеют возраст порядка 10^8 – 10^9 лет, у них действие меридиональной циркуляции можно было бы заметить. Отсутствие меридиональной циркуляции доказывает также тот факт, что в

течение всей своей жизни Ар-звезды вращаются твердотельно (Glagolevskij and Nazarenko 2019). Очевидно, Ам-объекты тоже.

В. Авторы Strittmatter and Norris (1971) предполагали, что в намагниченной звезде на ГП может возникнуть такое отношение магнитной энергии к вращательной, при которой меридиональная циркуляция увлечет поле внутрь звезды. Поле не участвует в торможении, поэтому она остается быстрым ротатором, что происходит в случае нормальных звезд. Если отношение выше критического, то циркуляция не может преодолеть противодействие магнитного поля, оно участвует в процессе торможения звезды, возникает магнитная звезда. Таким образом, эти авторы придерживаются точки зрения, что процесс формирования магнитной звезды происходит на ГП, что противоречит наблюдательным данным (Dudorov and Tutukov 1990) (см. далее). Согласно предыдущей гипотезе, потеря момента вращения происходит на стадиях эволюции «до фазы Хаяши». Ар- и Ам-звезды наблюдаются уже на ZAMS.

С. Mestel and Moss (1977) считают, что на ГП у звезд возникает меридиональная циркуляция. Она загоняет магнитное поле внутрь объекта при быстром вращении и звезда становится «нормальной». Замечания о роли меридиональной циркуляции такие же, как в предыдущих гипотезах.

Д. На основании теории меридиональной циркуляции Michaud (1970) нашел, что в Ар-звездах в течение жизни на ГП диффузия химических элементов может происходить только при скорости вращения звезды менее 90 км с^{-1} , а у Ам-звезд меньше 120 км с^{-1} (Michaud 1982, Michaud et al. 1983). Мы вынуждены сделать такие же замечания относительно роли меридиональной циркуляции, как в предыдущих пунктах. Очевидно, что исследуемые звезды обладают стабильной атмосферой, в которой возникает возможность практически беспрепятственной диффузии химических элементов, но у Ам-звезд она происходит без влияния магнитного поля, а у магнитных Ар-звезд возникает неравномерное распределение химических элементов и изменяется химический состав вследствие влияния магнитного поля на дрейф ионов, которые могут двигаться только вдоль силовых линий. Существует зависимость (рис. 5) степени аномальности химического состава (параметр Z_0 Женевской фотометрии: $Z_0 = Z(\text{Ar}) - Z(\text{norm})$) от величины магнитного поля (Glagolevskij et al. 2004, Moss 1974), возникающая вследствие подавления микротурбулентности магнитным полем. При среднем поверхностном магнитном поле $B_s > 4$ – 5 кГс зависимость становится менее крутой вследствие полного подавления микротурбулентности (Glagolevskii 1994, Glagolevskij et al. 2007; 2004; 2006). Диффузия

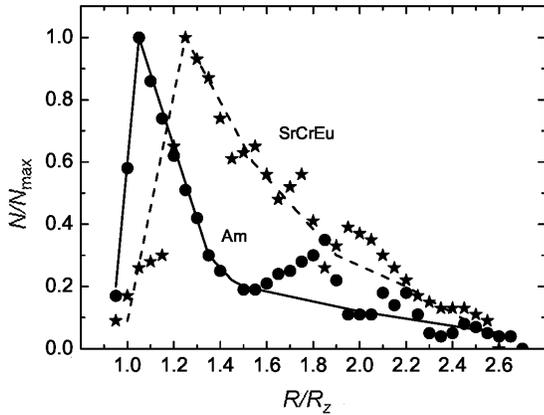


Рис. 4. Распределение химически пекулярных звезд поперек полосы ГП: звездочки — SrCrEu-звезды, кружки — Am-звезды.

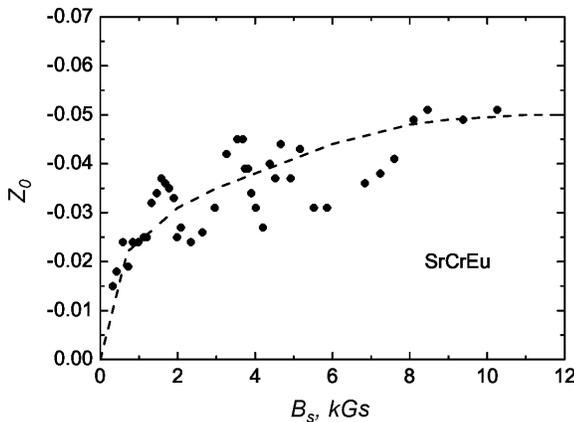


Рис. 5. Зависимость параметра Z_0 женеvской фотометрии от величины среднего поверхностного магнитного поля.

стронция у Ar-звезд происходит за 10^4 лет, гелия — за 10^5 – 10^6 лет, металлов — более миллиона лет (Michaud et al. 1976). Наблюдательные данные показывают, что химические аномалии возникают уже в момент прихода звезд на ZAMS (см. рис. 4).

Имеются достаточно убедительные доводы в пользу предположения об отсутствии крупномасштабных перемещений масс внутри магнитных звезд и о твердотельности их вращения (Glagolevskij 2018). В работах Glagolevskij (2007), Strittmatter and Norris (1971) приводятся наблюдательные данные, противоречащие предположению о существовании меридиональной циркуляции в магнитных звездах. Очевидно, что медленно вращающиеся Am-звезды имеют такое же свойство.

Исходя из сказанного выше, можно сделать интересное предположение, что значительная часть быстро вращающихся «нормальных» звезд, сформировавшихся из намагниченных протозвездных

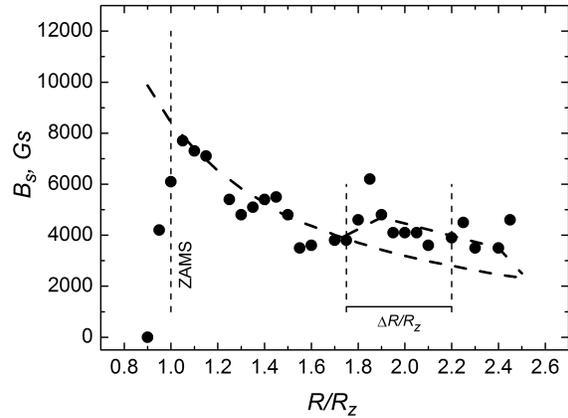


Рис. 6. Изменение величины среднего поверхностного магнитного поля при эволюционном движении звезд поперек полосы ГП.

облаков, содержит сильное тороидальное магнитное поле во внутренних областях, которое не обнаруживается стандартной зеемановской методикой. Небольшая часть звезд, вероятно, не имеет внутренних магнитных полей, если они сформировались из не намагниченных облаков.

2.4. Поведение Ar- и Am-звезд на ГП

Число магнитных звезд на ГП сильно изменяется с возрастом. На рис. 4 показано распределение магнитных звезд всех типов пекулярности (звездочки, 105 объектов) и металлических звезд (кружки, 240 объектов), а на рис. 6 дано изменение их среднего поверхностного магнитного поля. Число звезд и магнитное поле после ZAMS растут вместе с усилением химических аномалий. Зависимости распределения N/N_{\max} от R/R_z для Ar- и Am-звезд (рис. 4) показывают, что химические аномалии появляются уже на ZAMS. В этот момент происходит стабилизация верхних слоев атмосферы вследствие медленного вращения и прекращения аккреции, и начинается рост магнитного поля. На $R/R_z = 1.2$ наблюдается максимум N/N_{\max} для Ar-звезд, что соответствует положению звезд V класса светимости, затем происходит его уменьшение. Максимум магнитного поля наступает раньше, на $R/R_z = 1.05$. Это различие пока непонятно.

Максимальное значение N/N_{\max} у Am-звезд (рис. 4) приходится на $R/R_z = 1.05$ (обсуждение см. далее). В промежутке $R/R_z = 1.9$ – 2.2 на зависимости для Ar-звезд наблюдается скачек N/N_{\max} вследствие прохождения «зигзага» на эволюционном треке, который показан на рис. 7. Из этого рисунка видно, что на $R/R_z = 2.2$ (точка A) звезда совершает поворот, после которого

она приходит в точку В, при этом радиус уменьшается. После точки В происходит увеличение радиуса, причем за время выполнения «зигзага» радиус увеличивается в 1.1 раза (точка С). В пределах диапазона А–С звезда проходит три раза, поэтому величина N/N_{\max} на зависимости $N/N_{\max}(R/R_z)$ увеличивается. Уменьшение радиуса в области $\Delta R/R_z$ приводит к увеличению магнитного поля, которое заметно на рис. 6. Область зависимости $R/R_z > 2.2$ на рис. 6 не надежна вследствие малого количества изученных звезд. Эту проблему мы продолжим рассматривать в разделе 2.8.

Итак, зависимости на рис. 4 отличаются: число металлических звезд после ZAMS растет быстрее числа Ар-звезд. Максимум изменения N/N_{\max} для Ам-звезд приходится на значение $R/R_z = 1.05$, а у Ар-звезд — на $R/R_z = 1.2$. Для вычисления R/R_z температуры для всех звезд выборки получены единым методом, по В2–G индексу женеvской фотометрии, с помощью калибровки (Abt and Morrell 1995). Тригонометрические параллаксы взяты из базы данных SIMBAD¹, величины R/R_z получены как в работе Glagolevskij (2019). После максимума величина N/N_{\max} у Ам-звезд уменьшается значительно быстрее, скачек N/N_{\max} в момент внутренней перестройки более сильный, хотя они в одинаковой степени зависят от основных параметров, величин $\lg g$, T_{eff} и степени замедления эволюционного движения поперек полосы ГП. После прекращения аккреции атмосфера стабилизируется и возникают условия диффузии химических элементов.

Почему происходит падение N/N_{\max} после максимума? На ГП растет радиус звезд, изменяются $\lg g$ и T_{eff} и критерии классификации. Кроме того увеличивается скорость эволюционного движения звезды поперек полосы ГП, вследствие чего $\Delta N/\Delta R$ постепенно уменьшается. С возрастом изменяются критерии классификации, а они разные у Ар- и Ам-звезд из-за различия химического состава. В отличие от Ам-звезд у магнитных звезд на ход зависимости $N/N_{\max}(R/R_z)$ влияет магнитное поле, потому что степень химической аномальности (например, выражаемой параметром многоцветной фотометрии Z_0) зависит от величины магнитного поля (см. рис. 5) (Glagolevskii 1994, Glagolevskij 2007). На рис. 8, построенного на основании рис. 6 и рис. 5, видно как изменяется параметр Z_0 у магнитных звезд при их эволюционном движении поперек полосы ГП. Фактически этот рисунок отражает влияние магнитного поля на критерий классификации Ар-звезд. Магнитное поле усиливает критерий.

¹<https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

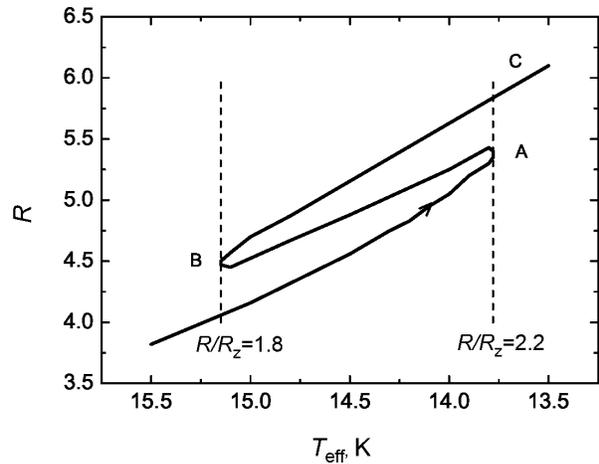


Рис. 7. Эволюционная «петля» (или «зигзаг») звезды с массой $5M_{\odot}$.

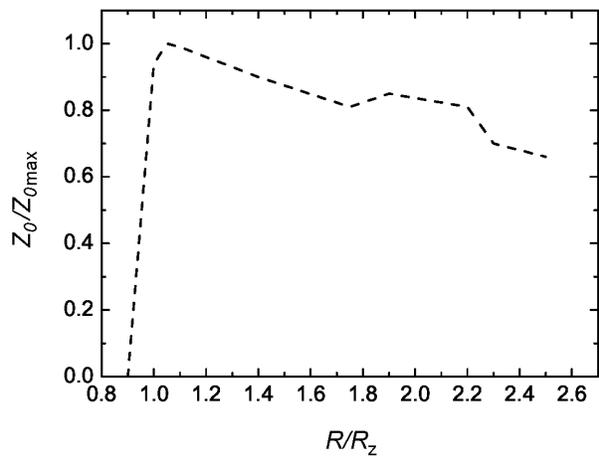


Рис. 8. Изменение параметра Z_0 у магнитных звезд при эволюционном движении поперек полосы ГП.

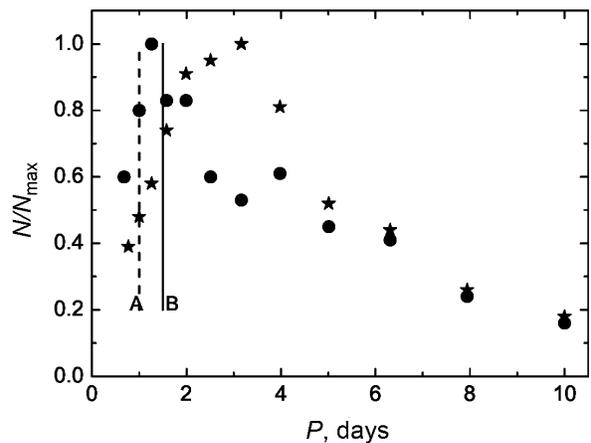


Рис. 9. Распределение магнитных звезд по периодам вращения P . Звездочки — магнитные звезды SrCrEu- и Si-типов, кружки — звезды He-r, He-w-типов.

Заметим, что особенности поведения звезд по всей ширине ГП (мы имеем в виду всю ширину полосы, в которой наблюдаются магнитные звезды) мы можем рассматривать в основном с качественной стороны, потому что для количественных оценок наблюдательного материала пока недостаточно. Изменение N/N_{\max} в эволюционном «зигзаге» для Am-звезд происходит в пределах $R/R_z = 1.55-1.85$, а у Ar-объектов — $R/R_z = 1.85-1.95$. Пока неясно, почему возникает это различие. Впечатление таково, что температуры Am-звезд имеют систематический сдвиг. Но наши оценки эффективных температур практически не отличаются от T_{eff} , представленными в таблице 1 и в работе Aurière et al. (2010). Последние определены по распределению энергии в непрерывном спектре.

Мы предполагали (Glagolevskij 2015), что рост числа Ar-звезд после ZAMS связан только с ростом магнитного поля — чем оно сильнее, тем сильнее аномальность химического состава (см. рис. 5 и 8), сильнее критерии отбора, больше вероятность отнести звезду к семейству CP-звезд. Но физическое состояние обоих типов звезд в одинаковой степени зависит от изменения T_{eff} и $\lg g$. Поэтому различия зависимостей на рис. 4 обусловлены не только влиянием поля у Ar-звезд, но и разным химическим составом, и, как следствие, различием поведения критериев отбора.

Магнитные CP-звезды характеризуются сильными линиями поглощения He, Si, Sr, Cr, Eu и других редкоземельных элементов, а также ослабленными линиями Ca, Mg и He в некотором диапазоне температур. У Am-звезд другие особенности: у них усилены спектральные линии других элементов, таких как Fe, Zn, Sr, Zr, Ba, при этом ослаблены линии Ca и Sc. Am-звезды классифицируются по линии Ca II K как A3, по бальмеровским линиям как A7, по линиям металлов как F0. Таким образом, у Ar- и Am-звезд разные критерии отбора. У Ar-звезд аномальность химического состава заметно зависит от величины магнитного поля, как мы видели выше, вследствие дополнительной стабилизации атмосферы магнитным полем, у Am-звезд химический состав зависит только от стабильности атмосферы. Желательно было бы проследить, как меняются интенсивности критериев отбора по мере эволюционного движения звезд поперек полосы ГП. Для полного понимания роли каждого эффекта нужен расчет эффективности диффузии химических элементов, ответственных за критерии отбора. Это задача будущих исследований.

2.5. Момент отделения Ar- и Am-звезд от «нормальных» объектов

Очевидно, что «магнитное торможение» происходит в период эволюции «до ГП», потому что

медленно вращающиеся магнитные звезды с дипольным полем мы наблюдаем уже в стадии поздних HАеВе (Alecian et al. 2008; 2009, Glagolevskij 2012). Потеря момента вращения у Am-звезд тоже произошла на ранних стадиях эволюции путем приливного взаимодействия после процесса разделения протозвездного облака на тесные компоненты. Распределения Ar- и Am-звезд по $v \sin i$ перекрываются с нормальными звездами, это видно на рис. 2b (Abt and Morrell 1995). Это значит, что знания скорости вращения $v \sin i$ недостаточно для определения того, имеет ли звезда нормальный или аномальный спектр. Нами было показано (Glagolevskij 2017b, Glagolevskij and Gerth 2003) распределения звезд по величинам $v \sin i$ для немагнитных Am-, HgMn- и магнитных He-g + He-w- и SrCrEu-звезд отдельно. Оказывается, что распределения одинаковые и у магнитных, и у немагнитных объектов, причем они коренным образом отличаются от распределения нормальных звезд.

Зависимости $N/N_{\max}(v \sin i)$ для магнитных Ar- и не магнитных Am-звезд, показанные на рис. 2, одинаковые. Это доказывает, что магнитное поле не участвует в разделении звезд на химически пекулярные и нормальные. В процессе разделения действует только эффект медленного вращения. Распределения занимают достаточно широкий диапазон перекрытия $v \sin i$ вследствие влияния угла i . Величине $P = 1^{\text{d}}$ соответствуют звезды со средним значением $v \sin i \approx 50 \text{ км с}^{-1}$ (рис. 2b), на котором происходит разделение химически пекулярных и нормальных звезд. Знание периодов вращения P оказывается достаточным, чтобы определить, будет ли звезда иметь нормальный или аномальный спектр.

Периоды вращения для Am-звезд неизвестны, но очевидно, что разделение Am и нормальных звезд происходит при такой же величине P , как и у магнитных звезд SrCrEu-типа пекулярности, то есть на $P = 1^{\text{d}}-1^{\text{d}}.5$. Это видно на рис. 9, который показывает распределение периодов для SrCrEu-звезд (звездочки), а также He-g и He-w-звезд (кружки). Зависимость построена по данным Glagolevskij (2019). Граница достаточно резкая, причем она почти не зависит от массы звезды. Предположительно причиной ее возникновения может быть дифференциальное вращение протозвездного облака при некоторой критической скорости V_c , которая на стадии звезд соответствует $P = 1^{\text{d}}-1^{\text{d}}.5$. Других предположений пока нет.

Как говорилось выше, магнитные протозвезды потеряли момент вращения на стадии коллапса путем передачи его окружающим облакам, Am-звезды потеряли момент вращения посредством

приливных взаимодействий с тесным компонентом. А двойных систем среди Ам-звезд почти 100%, среди магнитных — меньше 20%. Тесные пары возникают в том случае, если удельный угловой момент протозвездного облака $l > 10^{20} (M/M_{\odot})^{23} \text{ см с}^{-1}$ (Bodenheimer 1981, Tutukov 1983). Таким образом, будущие Ам-звезды теряют момент вращения после разделения на компоненты тоже в стадии протозвезд. После разделения Ам-звезды имеют массы холодных Ар-звезд и дальнейшая их эволюция проходит одинаково.

Период нестационарной стадии Хаяши, вероятно, не позволяет продолжить процесс потери момента вращения ни путем «магнитного» торможения, ни путем приливных взаимодействий. Поэтому потеря момента вращения и разделение должны закончиться до фазы Хаяши. Вряд ли этот процесс возможен в период НАеВе стадии вследствие запутанного и ослабленного магнитного поля у молодых Ар-звезд. В этот период происходит постепенная релаксация магнитного поля в лучистой звезде, продолжающаяся в более медленном темпе после выхода ее на ZAMS.

Что касается отделения Ам-звезд от нормальных, то оно происходит так же, как у Ар-звезд — до нестационарной фазы. В фазе Хаяши происходит полное запутывание внутренних областей, поэтому аномальный химический состав возникает только после выхода их на ZAMS. Поэтому делаем окончательное предположение, что отделение «нормальных» звезд от Ар-объектов произошло на ранней стадии эволюции после потери момента вращения посредством «магнитного» торможения (Mouschovias and Paleologou 1979) протозвезд, а отделение Ам-объектов от «нормальных» звезд происходит после потери момента вращения путем приливного взаимодействия с тесным компонентом, когда скорость вращения преодолела критическую величину V_c . Ам-звезды приходят на ZAMS в возрасте $\lg t = 8.65$ лет, а He-г-звезды — в $\lg t = 6.76$ лет (рис. 1). И те, и другие уже сформировались к этому моменту как медленные ротаторы. Поэтому на ГП рассматриваемые процессы происходить не могут. Небольшая доля Ар-звезд могла возникнуть из самых медленных ротаторов из левой части распределения (рис. 2b, сплошная линия). К таким объектам можно отнести те, которые имеют периоды вращения не более десятков лет.

После потери момента вращения исчезают условия разделения магнитной протозвезды на компоненты, поэтому среди магнитных Ар-звезд наблюдается дефицит тесных двойных. Этот процесс ограничивается началом нестационарной фазы Хаяши, при которой магнитное поле приобретает сложную структуру в виде слоев, жгутов

и др. и ослабляется (Dudugov 1990, Moss 2004), хотя в работе Larson (1969) высказывается возможность полного отсутствия фазы Хаяши у звезд с массами больше, чем $2M_{\odot}$. Тем не менее, в фазе НАеВе действительно наблюдаются очень слабые магнитные поля. По этой причине потеря момента вращения и разделение на компоненты в стадии НАеВе невозможно. Что касается Ам-звезд, то не исключено, что в фазе НАеВе происходит продолжение приливных взаимодействий и потеря момента вращения.

Возникает вопрос, почему Ам-звезды находятся в узком диапазоне масс и они самые холодные среди химически пекулярных звезд, а магнитные — в широком диапазоне масс? Ам-звезды, как и Ар, имеют минимальную массу порядка $1.6M_{\odot}$, у звезд с меньшей массой атмосферы конвективные, в которых процесс диффузии химических элементов не происходит. Самые массивные Ам-звезды имеют в среднем массу $M = 2.5M_{\odot}$. Чем ограничивается эта величина? Почему протозвезда с большей массой не формируется в Ам-звезду? Можно предположить, что это происходит вследствие слишком сильной зависимости величины l от массы, как это было показано выше: протозвезды большей массы начинают формироваться только в широкие пары.

2.6. Разные комбинации в системах «Ам-звезда + компонент»

Abt (1965) отмечает, что встречаются тесные пары Ам + Ам, Ам + нормальная звезда, Ам + Ар. На основании сказанного выше можно предполагать, что формирование первых двух вариантов вопросов не вызывает, но последний представляют собой проблему. Разделение из общего протозвездного облака на тесные компоненты, при котором один не имеет магнитного поля, представляется проблематичным. Возможно, в протозвездном облаке существуют флуктуации плотности и магнитного поля. Эту проблему следует исследовать специально.

2.7. Стабильность атмосфер

Стабильность атмосфер в Ар- и Ам-звездах — это результат медленного вращения и является наблюдаемым фактом. В нестабильной атмосфере диффузия химических элементов невозможна (Glagolevskii 1994). Максимальное время жизни Ар- и Ам-звезд составляет $t = 10^9$ лет, после чего они уходят с ГП. По аналогии с Ар-объектами у Ам-звезд, очевидно, следует тоже предполагать твердотельное вращение. В течение всего времени жизни у Ар-звезд не заметны искажения магнитных структур. Это видно, в частности, из постоянства магнитных конфигураций в течении

всей жизни звезды (Glagolevskij 2018, Glagolevskij and Nazarenko 2019). Влияние магнитного поля на «твердость» невелико, потому что этим свойством обладают как звезды с сильным полем, так и с предельно слабым. Магнитные звезды с полем 20–50 Гс имеют химические аномалии и неравномерное распределение химических элементов такие же, как и у звезд с полем в несколько тысяч гаусс.

2.8. Изменение скорости вращения Ar - и Am -звезд с возрастом при их эволюционном движении поперек полосы ГП

Абт заметил, что скорости вращения $v \sin i$ у Ar - и Am -звезд уменьшаются с возрастом в результате потери момента вращения на ГП (Abt 1979). У Ar -звезд это видно на рис. 10а, у Am -звезд — на рис. 10b, построенных нами по средним величинам $v \sin i$ в узких диапазонах $\Delta R/R_z = 0.1$. Используются звезды с периодами $P < 50^d$. Прямые зависимости это линии регрессии, в пределах ошибок они одинаковые у обоих типов звезд. Данный результат показывает, что это одинаковые звезды. Вертикальными линиями А и В проведены границы, в которых происходит перестройка внутренних областей звезд. Большой разброс наблюдаемых величин $v \sin i$ происходит из-за влияния угла наклона звезд i , приводящего к большой неуверенности полученных зависимостей, поэтому изменения $v \sin i$ из-за уменьшения радиуса в момент перестройки мы не замечаем. Что касается предположения Абта о влиянии потери момента вращения на ход зависимости $v \sin i(R/R_z)$, то мы предполагаем, что это происходит вследствие изменения радиуса.

Сравним зависимости $v \sin i(R/R_z)$ с зависимостями изменения периодов вращения на рис. 11, построенными по данным Glagolevskij (2017b) для всех типов магнитных звезд. Нам важно выявить общий эффект. Период вращения начинает увеличиваться на $R/R_z = 1$ и в максимуме на $R/R_z \approx 1.8$ он оказывается в 2.5 раза больше. При этом $v \sin i$ в этих же пределах R/R_z у Ar -звезд уменьшается в полтора раза, а у Am -звезд в 1.25 раз. С точки зрения закона сохранения импульса увеличение радиуса в 2.5 раза должно приводить к замедлению скорости v ($v \sin i$ соответственно) тоже в 2.5 раза. Различие происходит, вероятно, из-за больших ошибок средних величин $v \sin i$. Достаточное количество звезд для анализа приходится только в диапазоне $R/R_z = 1-1.8$. Исходя из закона сохранения импульса уменьшение периода вращения после максимума должно сопровождаться увеличением зависимости $v \sin i(R/R_z)$ после $R/R_z = 1.8$. Но на рис. 10а и 10b мы видим обратную картину. Уменьшение P после максимума непонятно. Из

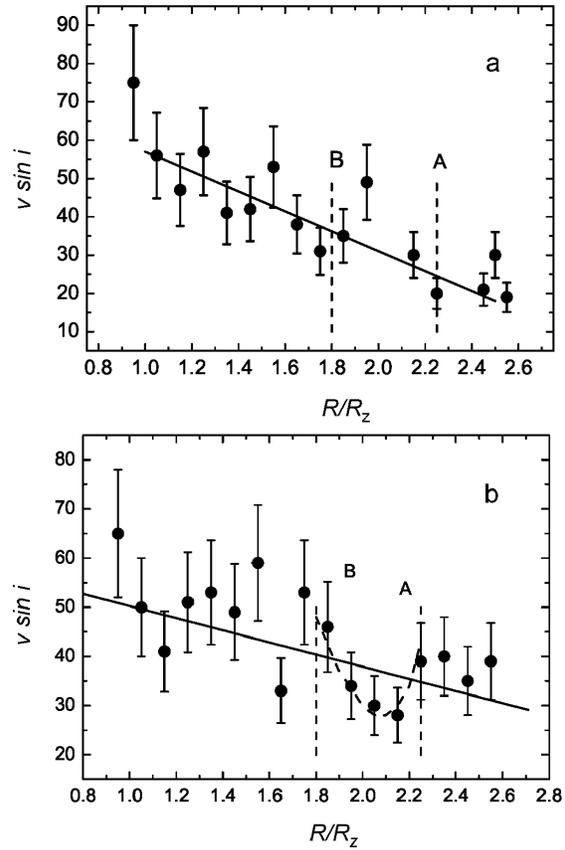


Рис. 10. Изменение скорости вращения $v \sin i$ при эволюционном движении звезд поперек полосы ГП: (а) — Ar -звезды, (б) — Am -звезды.

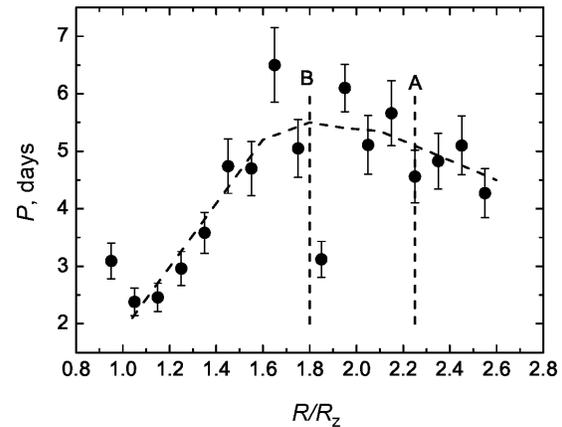


Рис. 11. Изменение периодов вращения магнитных звезд при их эволюционном движении поперек полосы ГП.

рассмотрения рис. 10а и 10b получается, что так не может быть. Начало уменьшения скорости вращения в момент перестройки должно приходиться на начало первого поворота эволюционного трека (точка А). В этот момент начинают уменьшаться

Таблица 2.

HD	Тип	Модель	R/R_z	$\lg t$
5737	He-w	CD	2.37	8.1
18296	Si+	CD?	2.86	8.3
47103	SrCrEu	CD?	2.20	8.9
51418	SrCrEu	CD	2.21	8.6
58260	He-r	CD	2.13	7.4
148112	SrCrEu	CD	2.01	8.8
148199	Si	CD	2.25	8.5
169842	SrCrEu	CD	2.05	8.8
170397	Si	CD	2.02	8.5
59435	SrCrEu	DD $\Delta a = 0.10$	2.23	8.8
116458	He-w	DD $\Delta a = 0.07$	2.02	8.2
147010	SrCrEu	DD $\Delta a = 0.45$	2.07	9.0

CD (central dipole) — центральный диполь,
DD (displaced dipole) — смещенный диполь.

радиус и период P , величина $v \sin i$ увеличивается (путь точка А → точка В). Такая же зависимость наблюдается в диапазоне $R/R_z = 1-1.8$: чем меньше P , тем больше $v \sin i$. При эволюции от точки В вправо после второго поворота происходит обратная картина — радиус увеличивается, $v \sin i$ уменьшается, P увеличивается. При формальном усреднении величин P и $v \sin i$ в диапазоне А–В эффекты складываются, и зависимость практически должна соответствовать росту радиуса в этом промежутке. Поэтому на рис. 10 участок АВ должен изменяться в таком же темпе, как и участок $R/R_z = 1-1.8$. Но на рис. 11 в промежутке АВ изменения нет. Тем более непонятно уменьшение величины P на $R/R_z > 2.2$. В этом диапазоне мало изученных звезд, поэтому решение этого вопроса перенесем на будущее. Представленные зависимости можно считать достаточно надежными только в диапазоне $R/R_z = 1-1.8$.

2.9. Структуры магнитного поля после $R/R_z > 1.8$

Этот вопрос чрезвычайно интересен потому, что до конца неясно, что происходит с магнитным полем, и вообще с внутренним состоянием звезды в момент и после внутренней перестройки и уменьшения радиуса. К сожалению, в этот период эволюции достаточно ярких объектов мало и мы имеем сведения о структурах магнитного поля после внутренней перестройки ($R/R_z \geq 2$) только для

немногих звезд (таблица 2). Тем не менее, результаты очень интересные, они показывают, что структуры, по-видимому, не изменяются. Очевидно, что звезды продолжают вращаться твердотельно. Особенно показательным то, что модели центрального диполя (CD) сохранились без искажений, они не превратились в другую структуру.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коротко перечислим основные выводы:

1. Металлические Ам-звезды — это объекты, схожие по своим свойствам с холодными Ар-звездами, только без магнитного поля. Эволюционный путь Ар- и Ам-звезд на ГП совершенно одинаковый. Различие в их распределении поперек полосы ГП происходит вследствие разного поверхностного химического состава, который возникает под влиянием магнитного поля у Ар-звезд и частично разного хода критериев классификации.

2. Ар- и Ам-объекты различаются способом потери момента вращения. Потеря момента вращения у Ар- и Ам-звезд произошла до выхода звезд на ГП, потому что на ZAMS они уже имеют типично малые скорости вращения. По-видимому, магнитные протозвезды потеряли момент вращения путем «магнитного» торможения в течение гравитационного коллапса перед нестационарной фазой Хаяши, потому что в этой фазе происходит запутывание и ослабление магнитного поля. Ам-протозвезды потеряли момент вращения в течение гравитационного коллапса после их разделения на тесные компоненты вследствие приливных взаимодействий, который мог продолжаться и в последующие фазы эволюции, но «до ГП».

3. Ар- и Ам-звезды по своим свойствам отличаются от «нормальных» объектов в протозвездной фазе эволюции после потери момента вращения и преодоления критической скорости вращения V_c . До этого момента Ар- и Ам-протозвезды не испытывают дифференциального вращения. Оно возникает, по-видимому, в момент «до фазы Хаяши» при условии $V > V_c$. Возникает дифференциальное вращение, при этом магнитное поле у быстро вращающихся магнитных протозвезд, вследствие вмороженности, закручивается в «невидимую» тороидальную форму. У тех протозвезд, у которых $V < V_c$ магнитное поле остается в сохранности. В случае не магнитных Ам-протозвезд это событие приводит к тому, что у быстрых ротаторов поверхностные слои перемешиваются и она становится «нормальной». Обсуждения, рассмотренные в данной работе, подтвердили существование

критической скорости вращения протозвездного облака V_c , при котором происходит разделение химически пекулярных и «нормальных» звезд вследствие предполагаемого относительно быстрого возникновения дифференциального вращения. Механизм меридиональной циркуляции на ГП не способен создать такие же условия, тем более, что этот процесс очень медленный. Кроме того, медленные ротаторы вращаются твердотельно.

4. Исходя из реликтовой гипотезы предполагается, что самые сильные магнитные поля у Ар-объектов происходят из самых намагниченных протозвезд. Пока нет наблюдательных данных, которые указывали бы на существование механизма дополнительного увеличения магнитного поля. Распределение по магнитному полю в протозвездных облаках продолжается от нуля до некоторого максимума. Поэтому такие же распределения предполагаются и у Ар-звезд. Вероятно, первоначальное магнитное поле частично ослабляется в нестационарной фазе Хаяши.

5. Многолетние периоды вращения Ар-звезд, достигающие десятков лет, возникают не только вследствие потери момента вращения в протозвездной стадии. Экстремально медленные ротаторы произошли, вероятно, из изначально медленных протозвезд, находившихся в «хвосте» распределения. Поэтому таких звезд мало. Наличие небольшого числа экстремально медленных ротаторов сильно искажает зависимости от периода вращения. Этот эффект практически устраняется, если используются данные только для звезд с $P < 50^d - 100^d$.

6. Обсуждаемая в литературе проблема 10% доли химически пекулярных звезд происходит из-за избирательности механизма «магнитного торможения» по отношению к углу α , а также вследствие того, что преодолевают порог V_c только самые медленные ротаторы из начального распределения родительских протозвезд $N(V)$. Быстрые ротаторы замедляются недостаточно, чтобы преодолеть порог V_c , потому что «магнитное» торможение относительно слабое. Очевидно то же самое происходит с потерей момента вращения посредством приливных взаимодействий в тесных парах у Ам-объектов. В достаточной степени замедляются только самые медленные Ам-протозвезды. Кроме того, тесных двойных формируется относительно мало, поэтому доля Ам-звезд тоже невелика.

7. Пока не ясно, почему Ам-звезды, в отличие от Ар, занимают узкий диапазон масс. Есть предположение, что тесные двойные возникают в узком

диапазоне масс вследствие сильной зависимости от нее (см. раздел 2.5).

8. Малая доля магнитных звезд показывает, что преодолевает критическую величину V_c только небольшая часть намагниченных протозвездных облаков. Остальная значительная часть быстро вращающихся «нормальных» звезд, сформировавшихся из намагниченных протозвездных облаков, содержит сильное тороидальное магнитное поле во внутренних областях, которое не обнаруживается стандартной зеемановской методикой. С другой стороны, Ам-звездами становятся не все протозвездные облака без поля, а только те, которым удалось объединиться в тесные двойные, т.е. число не намагниченных облаков, по-видимому, преобладает. Вопрос требует детального анализа.

9. Стабильность внутренних областей и атмосфер в Ар- и Ам-звездах происходит вследствие медленного вращения, это наблюдаемый факт. На поверхности очевидно существует только некоторая микротурбулентия, которая практически полностью подавляется магнитным полем при $B_s > 4-5$ кГс (рис. 5). По аналогии с Ар-объектами у медленных Ам-звезд, очевидно, тоже существует твердотельное вращение.

10. Скорость вращения $v \sin i$ Ар- и Ам-звезд уменьшается по мере эволюционного движения поперек полосы ГП, период вращения при этом увеличивается. Величина $v \sin i$ постепенно уменьшается из-за увеличения радиуса до конца пребывания звезд на ГП. В момент $R/R_z = 1.8$ происходит внутренняя перестройка звезд, сопровождающаяся уменьшением радиуса, в результате чего у магнитных звезд увеличивается магнитное поле. Одинаковый вид зависимости $v \sin i (R/R_z)$ показывает, что Ар- и Ам-звезды — это одинаковые объекты. После прохождения рассматриваемой фазы структуры магнитного поля Ар-звезд не изменяются. Особенно показательно то, что модели центрального диполя сохраняются без видимых искажений, они не превращаются в другую структуру.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Abt, *Astron. J.* **70**, 277 (1961).
2. H. A. Abt, *Astrophys. J. Suppl.* **11**, 429 (1965).
3. H. A. Abt, *Astrophys. J.* **230**, 485 (1979).
4. H. A. Abt and N. I. Morrell, *Astrophys. J. Suppl.* **99**, 135 (1995).

5. H. A. Abt and M. S. Snowden, *Astrophys. J. Suppl.* **25**, 137 (1973).
6. E. Alecian, C. Catala, G. A. Wade, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **385** (1), 391 (2008).
7. E. Alecian, G. A. Wade, C. Catala, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **400** (1), 354 (2009).
8. M. Aurière, G. A. Wade, F. Lignières, et al., *Astron. and Astrophys.* **523**, A40 (2010).
9. P. Bodenheimer, in D. Sugimoto, D. Q. Lamb, and D. N. Schramm (eds.), *Fundamental Problems in the Theory of Stellar Evolution*, vol. 93, pp. 5–24 (1981).
10. A. E. Dudorov and A. V. Tutukov, *Astron. Zh.* **67**, 342 (1990).
11. A. E. Dudurov, in M. Edited by Rudnitskij (VINITI (ed.), *Ser. Astronomia*, vol. 39, p. 77 (1990).
12. Y. V. Glagolevskij, *Astron. Zh.* **71** (6), 858 (1994).
13. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **62** (3), 244 (2007).
14. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **55** (2), 169 (2012).
15. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **57** (3), 315 (2014).
16. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **58** (1), 29 (2015).
17. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 305 (2017a).
18. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **72** (4), 418 (2017b).
19. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **61** (3), 413 (2018).
20. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 66 (2019).
21. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **75** (2), 139 (2020).
22. Y. V. Glagolevskij and E. Gerth, *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory* **55**, 38 (2003).
23. Y. V. Glagolevskij, V. V. Leushin, and G. A. Chuntunov, *Astrophysical Bulletin* **62** (4), 319 (2007).
24. Y. V. Glagolevskij, V. V. Leushin, and G. A. Chuntunov, *Astronomy Letters* **30** (12), 843 (2004).
25. Y. V. Glagolevskij, V. V. Leushin, G. A. Chuntunov, and D. Shulyak, *Astronomy Letters* **32** (1), 54 (2006).
26. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysics* **62** (4), 491 (2019).
27. B. Hauck and P. North, *Astron. and Astrophys.* **269**, 403 (1993).
28. M. C. Lane and J. B. Lester, *Astrophys. J.* **281**, 723 (1984).
29. R. B. Larson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **145**, 271 (1969).
30. L. Mestel and D. L. Moss, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **178**, 27 (1977).
31. G. Michaud, *Astrophys. J.* **160**, 641 (1970).
32. G. Michaud, *Astrophys. J.* **258**, 349 (1982).
33. G. Michaud, Y. Charland, S. Vauclair, and G. Vauclair, *Astrophys. J.* **210**, 447 (1976).
34. G. Michaud, D. Tarasick, Y. Charland, and C. Pelletier, *Astrophys. J.* **269**, 239 (1983).
35. D. Moss, in J. Zverko, J. Ziznovsky, S. J. Adelman, and W. W. Weiss (eds.), *The A-Star Puzzle*, vol. 224, pp. 245–252 (2004).
36. D. L. Moss, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **168**, 61 (1974).
37. D. L. Moss, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **171**, 303 (1975).
38. T. C. Mouschovias and E. V. Paleologou, *Astrophys. J.* **230**, 204 (1979).
39. F. Palla and S. W. Stahler, *Astrophys. J.* **418**, 414 (1993).
40. F. Palla and S. W. Stahler, in P. S. The, M. R. Perez, and E. P. J. van den Heuvel (eds.), *The Nature and Evolutionary Status of Herbig Ae/Be Stars, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 62, p. 391 (1994).
41. P. A. Strittmatter and J. Norris, *Astron. and Astrophys.* **15**, 239 (1971).
42. A. V. Tutukov, *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal* **9**, 160 (1983).

Remarks on Difference of Properties of Am and Ap Stars

Yu. V. Glagolevskij¹

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

We performed the comparative analysis of the properties of Ap and Am stars. It is shown that the main differences in the formation and evolution of these objects are due to the influence of a magnetic field in Ap stars.

Keywords: *stars: chemically peculiar*