

УДК 524.31.084:524.6-337

МАГНИТНЫЕ БЕЛЫЕ КАРЛИКИ КАК ИНДИКАТОРЫ ЭВОЛЮЦИИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ГАЛАКТИКИ

© 2026 В. Н. Аитов^{1*}, Г. Г. Валявин^{1, 2}¹Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия²Северо-Кавказская государственная академия, Черкесск, 369001 Россия

Поступила в редакцию 21 апреля 2026 года; после доработки 16 мая 2026 года; принята к публикации 18 мая 2026 года

Согласно теории, магнитные поля и численность холодных (старых) белых карликов с сильными крупномасштабными магнитными полями (МБК) должны со временем уменьшаться, однако по результатам наблюдений напряженность поля у таких звезд и частота их встречаемости в среднем значительно выше по сравнению с горячими (молодыми) МБК. В серии предыдущих работ мы предложили объяснение этого эффекта постепенным замедлением тепловой эволюции МБК из-за магнито-индуцированного подавления поверхностной конвекции. Наше моделирование показало, что этот механизм может объяснить увеличение числа предельно холодных МБК. Между тем наблюдения свидетельствуют об увеличении числа МБК среди значительно более молодых звезд этого класса. В данной работе мы возвращаемся к этой проблеме. В отличие от более ранних моделей, в которых вероятность рождения звезд-предков МБК полагалась независимой от возраста Галактики, здесь мы рассматриваем уменьшение вероятности возникновения сильномагнитных звезд — предков МБК — с учетом увеличения возраста Галактики. Введение такого параметра позволило нам описать увеличение встречаемости МБК. Этот результат доказывает, что популяция массивных звезд-прародителей МБК уменьшается с возрастом Галактики, по-видимому, из-за ослабления ее магнитных свойств в процессе эволюции.

Ключевые слова: *звезды: магнитные поля — звезды: химически пекулярные, активные и холодные белые карлики*

1. ВВЕДЕНИЕ

Большая часть звезд Галактики с умеренными и малыми массами заканчивают свой эволюционный путь как белые карлики (БК). На сегодняшний день этот класс звезд изучен в достаточной для понимания его фундаментальных характеристик степени, однако остается целый ряд не до конца решенных вопросов. Одним из из них является происхождение одиночных БК с сильными крупномасштабными магнитными полями, напряженности которых превышают десятки килогаусс и более (Angel et al., 1981; Schmidt and Smith, 1995; Liebert et al., 2003; Valyavin et al., 2003, 2006, 2014; Aznar Cuadrado et al., 2004; Landstreet et al., 2012, 2015, 2016, 2018, 2017; Kepler et al., 2013; Bagnulo et al., 2018; Bagnulo and Landstreet, 2018, 2020). В ранних исследованиях полагалось, что МБК являются конечной стадией эволюции магнитных Ap/Bp-звезд (Angel et al., 1981) (так же как и в случае с МБК, здесь и далее под магнитными звездами мы будем подразумевать любые звезды с детектируемыми спектрополяриметрически крупномасштаб-

ными, не локальными, как у звезд солнечного типа, магнитными полями). В более поздних работах показано, что МБК могут быть потомками звезд и других классов (Liebert et al., 2003; Kawka and Vennes, 2004; Wickramasinghe and Ferrario, 2005), а также образовываться в результате слияния двух БК (Valyavin and Fabrika, 1999, 1998; Tout et al., 2008; Moss et al., 2025).

Исследования, посвященные эволюции МБК, выявили некоторые ее особенности. Одной из них является увеличение частоты встречаемости этих объектов с возрастом (Liebert and Sion, 1979; Fabrika and Valyavin, 1998, 1999; Valyavin and Fabrika, 1999; Liebert et al., 2003). В то время как теория предполагает (Wendell et al., 1987; Muslimov et al., 1995), что магнитные поля БК должны затухать со временем, наблюдения свидетельствуют об увеличении с возрастом доли МБК в общем распределении популяции БК по возрастам. Для объяснения такого странного проявления магнетизма МБК было предложено несколько механизмов. Один из наиболее обсуждаемых на сегодняшний день состоит в том, что в процессе теплового остывания БК его магнитное поле начинает расти

*E-mail: vit9517@sao.ru

вследствие динамо в фазе роста кристаллического ядра звезды (Bagnulo and Landstreet, 2021; далее BL2021). Эта идея, вероятно, имеет право на существование, но ей сопутствуют две проблемы, одновременно, как мы считаем, неразрешимые. Первая проблема состоит в том, что, на наш взгляд, энергии кристаллизации ядра остывающей вырожденной звезды недостаточно для того, чтобы генерировать магнитные поля, превышающие на два порядка характерные поля молодых/горячих МБК, еще находящихся в жидкой фазе (в качестве иллюстрации см. рис. 11 в работе Kepler et al., 2013). Вторая заключается в том, что даже если авторы BL2021 правы, то почему столь мощные поля возникают только у четырех процентов БК (Kepler et al., 2013)?

Другой механизм для объяснения завышенного числа МБК в конвективной (холодной) фазе их эволюции состоит в блокировке конвективного выноса тепла к поверхности МБК сильным магнитным полем (Valyavin et al., 2014). Идея проста. В радиационной фазе эволюции БК при остывании до температур около 10 000–12 000 К и сильно-магнитные МБК, и слабомагнитные обычные БК эволюционируют примерно одинаково. Между тем у БК более низких температур, внешние слои которых охвачены конвекцией, сильные магнитные поля способны значительно замедлить или даже полностью остановить конвективный вынос энергии из недр этих звезд. В данной фазе МБК значительно замедляют темп эволюционного остывания, тем самым накапливаясь в избытке по сравнению с их слабомагнитными аналогами (Valyavin et al., 2014).

Несмотря на кажущуюся очевидность, идея замедления охлаждения МБК в конвективной фазе магнитным полем также вызывает критические замечания (Tremblay et al., 2015), согласно которым внешняя конвекция не участвует в процессе выноса тепла из недр БК до тех пор, пока она не достигнет изотермического ядра, устанавливая с ним конвективную связь (convective coupling). Эта связь, по мнению Tremblay et al. (2015), возникает в условиях, когда БК остыл до температур ниже 5500 К. Если магнитное поле достаточно велико (более 1–2 МГс), чтобы остановить конвекцию, конвективная связь с ядром не будет достигнута никогда. В этом случае, начиная с указанных температур, темп эволюции МБК замедлится по сравнению с его слабомагнитным аналогом. Частота встречаемости таких МБК в результате действительно будет выше. Однако таких холодных МБК эволюционно в нашей Галактике еще очень мало, поэтому высокая частота встречаемости МБК, начиная сразу с температур менее 8000 К, по мнению Tremblay et al. (2015), не может быть объяснена магнитными эффектами.

В продолжение исследования вопроса о блокировке выноса тепла из недр МБК магнитным полем (Ginzburg, 2024) показали, что конвективная связь наступает при температурах существенно выше, чем предсказано ранее (Tremblay et al., 2015). Кроме того, мы считаем спорным рассуждение, согласно которому магнито-индуцированная остановка поверхностной конвекции до наступления связи с изотермическим ядром не влияет на темп тепловой эволюции. Аргумент, что адиабатический режим поверхностной конвекции, происходящей без теплообмена с окружающей средой, не оказывает влияния на тепловую эволюцию БК, является бесспорным. Однако при блокировании поверхностной конвекции адиабатический градиент температуры неизбежно перестроит свою структуру в направлении радиационного градиента, который по определению больше, чем адиабатический. Это означает, что в случае остановки внешней конвекции БК магнитным полем температура от недр к поверхности будет падать быстрее, чем при наличии конвекции. Это приведет к покраснению и, как следствие, к уменьшению темпа потери тепла в окружающее звезду пространство. Гидростатическое равновесие при этом, в условиях отсутствия термоядерного горения в недрах БК, может сохраняться сколь угодно долго. Таким образом, мы считаем, что проблема влияния блокирования поверхностной конвекции на темп тепловой эволюции МБК все еще требует всестороннего исследования.

На основании вышеизложенного мы провели теоретическое моделирование эволюции популяции МБК с учетом подавления конвекции магнитным полем (Aitov et al., 2022; Aitov and Valyavin, 2025). Объектом моделирования были функция светимости МБК и ее сравнение со стандартной функцией светимости БК (Aitov et al., 2022; Aitov and Valyavin, 2025). Подробности описаны в Разделе 3, а здесь, до представления результатов, коротко остановимся на выборе именно функции светимости в качестве эволюционного теста.

Функция светимости дает распределение звезд в единичном объеме в зависимости от их абсолютной звездной величины (Shapiro et al., 1983). Для популяции БК, имеющих не очень большой разброс радиусов, абсолютная звездная величина с неопределенностью до 1^m является вполне надежным индикатором возраста этих звезд. Прямой расчет возраста, особенно БК с сильными магнитными полями, в гораздо большей степени модельно зависим, поэтому нами не использовался.

В предыдущих работах (Aitov et al., 2022; Aitov and Valyavin, 2025) мы моделировали и сравнивали с наблюдениями функцию светимости МБК в предположении подавления конвекции их сильными (от нескольких до сотен мегагаусс) крупномасштабными магнитными полями. В качестве

фактора подавления использовался эмпирически подбираемый параметр A — функция отсечки доли конвективного выноса энергии относительно случая с нулевым магнитным полем (Aitov et al., 2022). Параметр $A = 0$ при нулевом магнитном поле, а $A = 1$ соответствует случаю полностью остановленной магнитным полем конвекции. Для сравнения мы использовали наблюдаемые и теоретически рассчитанные частоты встречаемости МБК в зависимости от их абсолютной звездной величины. Теоретические частоты встречаемости были получены делением синтетической функции светимости МБК на стандартную функцию светимости БК. Смоделированные частоты сравнивались с частотами, найденными с помощью наблюдений. В результате при экстремально больших значениях этого параметра ($A > 0.8$) мы получали резкий рост частоты встречаемости в области самых холодных/старых БК с эффективными температурами T_{eff} ниже 6000 К. Однако в области температур 6000–8000 К мы имели не рост числа МБК, а их дефицит, что связано с их покраснением в связи с подавлением конвекции магнитным полем и более быстрым смещением этой популяции вправо на шкале абсолютных звездных величин $M_{\text{bol}} = 12^{\text{m}0} - 13^{\text{m}5}$ (см. рис. 3 в работе Aitov et al., 2022). Для $M_{\text{bol}} > 13^{\text{m}5}$ популяция МБК начинает расти уже за счет замедления их времени жизни и в области $M_{\text{bol}} > 15^{\text{m}0}$ появляется избыток, что отражается в увеличении частот их встречаемости на шкале абсолютных звездных величин. В наблюдениях же рост заметен начиная с $M_{\text{bol}} > 13^{\text{m}0}$.

Попытка объяснить имеющееся явное расхождение теории и наблюдений недоучетом в расчетах наличия во внешней оболочке БК более тяжелых, чем водород, химических фракций (в частности, гелия) также не привела к положительному решению. Поэтому мы попытались найти альтернативный механизм, который в рамках гипотезы реликтовой природы магнитных полей МБК мог бы объяснить наблюдаемое частотное распределение МБК по возрастам. И такой механизм был найден.

В ряде исследований (Romanyuk et al., 2019, 2021a,b) магнитных звезд, проводимых в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук, показано, что процент рождения звезд средних и больших масс с сильными крупномасштабными магнитными полями (именно из этих звезд впоследствии возникают МБК) в молодых областях активного звездообразования в два раза выше, чем у звезд поля (Romanyuk et al., 2013, 2021b). Поверхностные поля также имеют большие напряженности. Физика процесса понятна. Такие активные области с мощными газопылевыми турбулентными очагами звездообразования вполне могут генерировать и значительные реликтовые магнитные поля. Последую-

щий коллапс этих сильнозамагниченных облаков в звезды произведет повышенное, по сравнению с далеко проэволюционировавшими звездами поля, количество магнитных Ар/Вр звезд. Предполагая, что процессы генерации сильных магнитных полей в молодых локальных областях активного звездообразования, например в туманности Ориона, иллюстрируют глобальные процессы формирования магнитных звезд в начальную эпоху эволюции нашей Галактики, мы берем эту разницу за основу моделирования наблюдаемой функции светимости МБК.

Общепринято (см., например, Yu et al., 2021), что ранние этапы рождения и эволюции нашей Галактики сопровождались бурными турбулентными процессами фрагментации колоссальных масс газово-пылевых облаков с их последующим коллапсом в звезды. Очевидно (хотя это до сих пор не исследовано в достаточной степени), что и энергетика генерации межзвездных магнитных полей в таких условиях на момент начального образования Галактики была выше, чем в настоящее время. Все это говорит в пользу идеи, что самые старые массивные звезды главной последовательности (ГП) имели крупномасштабные магнитные поля и, соответственно, частоты встречаемости таких звезд значительно выше, чем в настоящее время. Миллиарды лет эволюции Галактики, постепенное уменьшение энергетики генерации магнитных полей в межзвездной среде и общее омическое затухание реликтовых полей с возрастом должны привести к тому, что звезды с крупномасштабными магнитными полями, из которых впоследствии возникают МБК, станут менее замагниченными и частоты их детектирования уменьшатся. Эта идея легла в основу тестирования нашего модельного метода с рассмотрением переменной частоты возникновения звезд-предков МБК со временем.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

В нашу модель, в которой ранее (Aitov et al., 2022; Aitov and Valyavin, 2025) частота рождения магнитных звезд-предков МБК считалась независимой от времени, мы внесли переменную линейную функцию уменьшения этой частоты со временем. Так как частота рождения магнитных звезд со временем неизвестна, мы перебирали различные коэффициенты этой функции. Предпочтение было отдано тем, при которых модельная функция светимости лучше соответствовала наблюдаемой функции светимости МБК. Результаты моделирования представлены на рис. 1 и 2 настоящего исследования. На рис. 1 приведены наблюдаемые и модельные функции светимости для известных БК в окрестности Солнца радиусом 20 пк (BL2021).

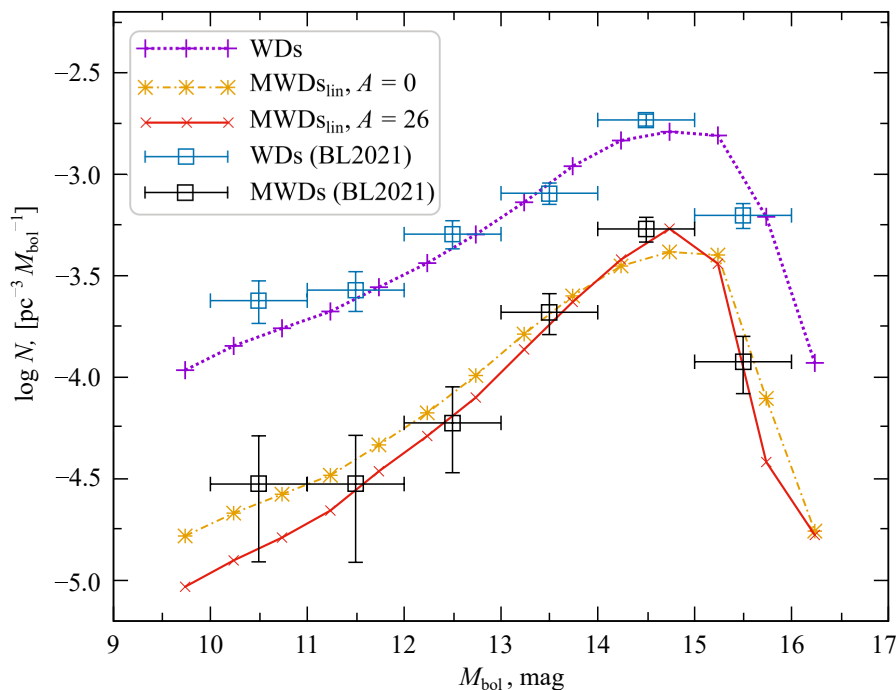


Рис. 1. Наблюдаемые (символы с барами ошибок) и модельные (линии) функции светимости для известных БК в окрестности Солнца радиусом 20 пк (BL2021). Пустые квадраты голубого цвета с вертикальными и горизонтальными барами ошибок иллюстрируют наблюдаемую функцию светимости для всей совокупности выборки БК. Сиреневая пунктирная линия — ее модель. Черные пустые квадраты с вертикальными и горизонтальными барами ошибок иллюстрируют наблюдаемую функцию светимости МБК в рассматриваемом объеме. Оранжевая штрихпунктирная линия — модель с учетом монотонного уменьшения частоты рождаемости звезд-предков МБК в процессе эволюции Галактики. Красная линия — то же, с включением процесса подавления конвекции.

Наблюдаемая функция светимости для всей совокупности выборки БК в этом объеме (голубые квадраты с барами ошибок) описана стандартной моделью без рассмотрения магнитных свойств МБК (сиреневая пунктирная линия). Оранжевой линией показана модель с учетом монотонного уменьшения рождения звезд-предков МБК с крупномасштабными магнитными полями. На рис. 2 представлены наблюдаемые и модельные частоты встречаемости для того же объема. Шесть квадратов черного цвета с вертикальными и горизонтальными барами ошибок иллюстрируют наблюдаемые частоты встречаемости МБК в зависимости от их абсолютной звездной величины. Оранжевая штрихпунктирная линия — модельные частоты встречаемости МБК с учетом монотонного уменьшения темпов рождения их предков в ходе эволюции Галактики. Эффект подавления конвекции в этом варианте расчета не включен.

Сравнение модели с наблюдениями показывает, что введение коэффициента редукции вероятности рождения сильнозамагниченной звезды-предка МБК в расчет качественно объясняет результаты наблюдений. Между тем, как видно из рис. 2, наблюдаемый контраст остается неудовлетворительным. Включение в модель процесса редук-

ции выноса тепла конвекцией полностью согласует модель с наблюдениями. На рис. 2 представлена модель с переменной долей рождаемости магнитных звезд-предков МБК и с учетом магнитоиндуцированного торможения конвекции (красная линия). Параметры звездообразования и подавления конвекции также подбирались, чтобы лучше соответствовать наблюдаемой функции светимости МБК (черные квадраты). Итоговое значение параметра функции отсечки $A = 0.26$, а доли рождаемости магнитных звезд-предков МБК составили $P = 59\%$ на начальном этапе эволюции Галактики и $P = 10\%$ в настоящее время. Стоит отметить, что такая оценка рождений в текущую эпоху соответствует частоте встречаемости магнитных звезд в верхней части ГП (10%, согласно Romanuk et al. (2024) и ссылкам в этой работе).

Полученный результат, с одной стороны, объясняет давно обсуждаемый феномен неравномерного распределения встречаемости МБК с их возрастом, с другой — иллюстрирует алгоритм изучения глобальных свойств магнетизма Галактики в процессе ее эволюции. Чрезвычайно интересным оказался также тот факт, что модель эволюционного уменьшения числа магнитных Ap/Vp-звезд —

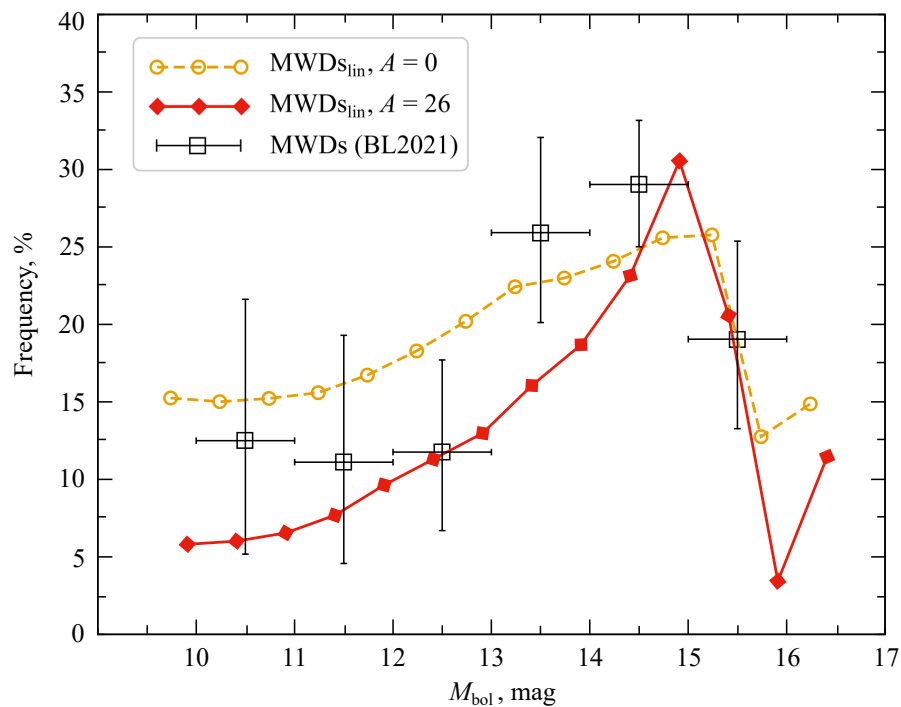


Рис. 2. Наблюдаемые (символы с барами ошибок) и модельные (линии) частоты встречаемости для известных БК в окрестности Солнца радиусом 20 пк (BL2021). Шесть пустых квадратов с вертикальными и горизонтальными барами ошибок черного цвета иллюстрируют наблюдаемые частоты встречаемости МБК в зависимости от их абсолютной звездной величины. Оранжевая штриховая линия — модельные частоты встречаемости МБК с учетом монотонного уменьшения темпов рождения в процессе эволюции Галактики их предков — звезд с крупномасштабными магнитными полями. Красная линия — то же, с включением процесса подавления конвекции.

предков МБК — с увеличением возраста Галактики, поддержанная механизмом конвективного подавления выноса энергии из недр БК, в конечном итоге идеально объяснила наблюдаемое распределение частот МБК в процессе их эволюционного остывания и фракцию 10% числа Ar/Vr магнитных звезд в современной Галактике. Игнорирование конвекции в нашей модели дало неверную оценку этой фракции. Настоящее исследование является подтверждением в том числе необходимости ревизии теории остывания МБК для случая сильных магнитных полей.

3. МЕТОДИКА

Способ моделирования функции светимости БК описан, например, в работе Hernanz et al. (1994). Функция интегрирует свертку распределения БК по массам со скоростью их звездообразования и производной времени остывания по звездной величине. Аналогично Hernanz et al. (1994), Salaris et al. (1997), Torres and García-Berro (2016) мы воспользовались степенным распределением по массам, описанным в работе Salpeter (1955) с показателем степени -2.35 . Распределение для МБК взято из статьи Kawka et al. (2007). В качестве

исходных данных по временам остывания использовались последовательности (Salaris et al., 1997) для маломассивных БК, до $1 M_{\odot}$, с CO-ядрами и зависимость, представленную в работе Althaus et al. (2007) для массивных БК с ONe-ядрами ($M = 1.06\text{--}1.28 M_{\odot}$).

В настоящей работе исследовано влияние частоты рождаемости звезд-предков МБК на частоту их встречаемости в процессе эволюционного остывания. Мы рассмотрели различные варианты линейного спада частоты их возникновения с увеличением возраста Галактики. Для построения функции светимости немагнитных БК взят постоянный темп звездообразования аналогично Hernanz et al. (1994); Salaris et al. (1997); Torres and García-Berro (2016). Расчет функции светимости для каждой конкретной звездной величины проводился следующим образом:

1. Из всех известных последовательностей остывания БК для фиксированных масс (Salaris et al., 1997; Althaus et al., 2007) линейной интерполяцией формировались последовательности для промежуточных масс БК. Производные времени остывания по абсолютным звездным величинам линейно интерполировались на основе получившихся последовательностей.

2. Расчет велся только для населения диска Галактики, поскольку мы имеем дело с ближайшим солнечным окружением. Если время остывания для заданных массы и звездной величины в сумме с временем нахождения звезды до стадии БК превышало возраст диска (9.3 млрд лет, Salariis et al. (1997)), то значение интеграла в этой точке для данной массы обнулялось.
3. Скорость звездообразования МБК определялась подгонкой темпа спада скорости их образования с возрастом Галактики. По методу наименьших квадратов получившиеся функции сравнивались с наблюдаемой функцией светимости, представленной в работе BL2021. Для функции светимости немагнитных БК мы добивались соответствия с функцией светимости из работы Harris et al. (2006).
4. Учет подавления конвекции производился согласно эмпирической модели, описанной Aitov et al. (2022). В случае подавленной конвекции параметры звездообразования звезд-предков МБК подбирались независимо.
5. Результирующие частоты встречаемости МБК в зависимости от абсолютной звездной величины получались делением функции светимости МБК на функцию светимости, смоделированную для всех БК.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 25-12-00003.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. N. Aitov and G. G. Valyavin, *Astrophysical Bulletin* **80** (3), 449 (2025). DOI:10.1134/S1990341325600401
2. V. N. Aitov, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 308 (2022). DOI:10.1134/S1990341322030038
3. L. G. Althaus, E. García-Berro, J. Isern, et al., *Astron. and Astrophys.* **465** (1), 249 (2007). DOI:10.1051/0004-6361/20066059
4. J. R. P. Angel, E. F. Borra, and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **45**, 457 (1981). DOI:10.1086/190720
5. R. Aznar Cuadrado, S. Jordan, R. Napiwotzki, et al., *Astron. and Astrophys.* **423**, 1081 (2004). DOI:10.1051/0004-6361/20040355
6. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **618**, id. A113 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833235
7. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **643**, id. A134 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202038565
8. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (4), 5902 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2046
9. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, A. J. Martin, and G. Valyavin, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnat Pleso* **48** (1), 236 (2018).
10. S. Fabrika and G. Valyavin, *ASP Conf. Ser.* **169**, 225 (1999).
11. S. N. Fabrika and G. G. Valyavin, *Bull. Amer. Astron. Soc.* **45**, 84 (1998).
12. S. Ginzburg, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **534** (1), L65 (2024). DOI:10.1093/mnras/slac082
13. H. C. Harris, J. A. Munn, M. Kilic, et al., *Astron. J.* **131** (1), 571 (2006). DOI:10.1086/497966
14. M. Hernanz, E. Garcia-Berro, J. Isern, et al., *Astrophys. J.* **434**, 652 (1994). DOI:10.1086/174767
15. A. Kawka and S. Vennes, in *Proc. IAU Symp.* No. 224, Ed. by J. Zverko, J. Ziznovsky, S. J. Adelman, and W. W. Weiss, (Cambridge University Press, Cambridge, 2004), p. 879. DOI:10.1017/S1743921305009920
16. A. Kawka, S. Vennes, G. D. Schmidt, et al., *Astrophys. J.* **654** (1), 499 (2007). DOI:10.1086/509072
17. S. O. Kepler, I. Pelisoli, S. Jordan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429** (4), 2934 (2013). DOI:10.1093/mnras/sts522
18. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, A. Martin, and G. Valyavin, *Astron. and Astrophys.* **591**, id. A80 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201628488
19. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, and G. Valyavin, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnat Pleso* **48** (1), 284 (2018).
20. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. Valyavin, and A. F. Valeev, *Astron. and Astrophys.* **607**, id. A92 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201731432
21. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. G. Valyavin, et al., *Astron. and Astrophys.* **545**, id. A30 (2012). DOI:10.1051/0004-6361/201219829
22. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. G. Valyavin, et al., *Astron. and Astrophys.* **580**, id. A120 (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201526434
23. J. Liebert, P. Bergeron, and J. B. Holberg, *Astron. J.* **125** (1), 348 (2003). DOI:10.1086/345573

24. J. Liebert and E. M. Sion, *Astrophys. Letters* **20**, 53 (1979).
25. A. Moss, M. Kilic, P. Bergeron, et al., *Astrophys. J.* **990** (1), id. 25 (2025). DOI:10.3847/1538-4357/aded8f
26. A. G. Muslimov, H. M. van Horn, and M. A. Wood, *Astrophys. J.* **442**, 758 (1995). DOI:10.1086/175481
27. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 55 (2019). DOI:10.1134/S199034131901005X
28. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (1), 39 (2021a). DOI:10.1134/S1990341321010090
29. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (2), 163 (2021b). DOI:10.1134/S1990341321020085
30. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **68** (3), 300 (2013). DOI:10.1134/S1990341313030061
31. I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **79** (1), 95 (2024). DOI:10.1134/S1990341323600357
32. M. Salaris, I. Domínguez, E. García-Berro, et al., *Astrophys. J.* **486** (1), 413 (1997). DOI:10.1086/304483
33. E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **121**, 161 (1955). DOI:10.1086/145971
34. G. D. Schmidt and P. S. Smith, *Astrophys. J.* **448**, 305 (1995). DOI:10.1086/175962
35. S. L. Shapiro, S. A. Teukolsky, and A. P. Lightman, *Physics Today* **36** (10), 89 (1983). DOI:10.1063/1.2915325
36. S. Torres and E. García-Berro, *Astron. and Astrophys.* **588**, id. A35 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201528059
37. C. A. Tout, D. T. Wickramasinghe, J. Liebert, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **387** (2), 897 (2008). DOI:10.1111/j.1365-2966.2008.13291.x
38. P.-E. Tremblay, G. Fontaine, B. Freytag, et al., *Astrophys. J.* **812** (1), article id. 19 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/812/1/19
39. G. Valyavin, S. Bagnulo, S. Fabrika, et al., *Astrophys. J.* **648** (1), 559 (2006). DOI:10.1086/505781
40. G. Valyavin and S. Fabrika, *ASP Conf. Ser.*, **169**, 206 (1999).
41. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, et al., *Nature* **515** (7525), 88 (2014). DOI:10.1038/nature13836
42. G. G. Valyavin, T. E. Burlakova, S. N. Fabrika, and D. N. Monin, *Astronomy Reports* **47** (7), 587 (2003). DOI:10.1134/1.1592838
43. G. G. Valyavin and S. N. Fabrika, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 69 (1998).
44. C. E. Wendell, H. M. van Horn, and D. Sargent, *Astrophys. J.* **313**, 284 (1987). DOI:10.1086/164968
45. D. T. Wickramasinghe and L. Ferrario, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **356** (4), 1576 (2005). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.08603.x
46. S. Yu, J. S. Bullock, C. Klein, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **505** (1), 889 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab1339

Magnetic White Dwarfs as Indicators of the Evolution of the Galaxy's Magnetic Properties

V. N. Aitov¹ and G. G. Valyavin^{1,2}

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

²North-Caucasian State Academy, Cherkessk, 369001 Russia

Cool (old) white dwarfs with strong large-scale magnetic fields (MWDs) demonstrate, on average, significantly higher field strengths and frequency of occurrence than hot (young) MWDs, despite the fact that the magnetic fields and abundance of such stars should, theoretically, decrease over time. In a series of previous papers, we proposed an explanation for this effect by the gradual slowdown of the thermal evolution of MWDs due to magnetically induced suppression of their surface convection. Our modeling showed that this mechanism can explain the increase in the occurrence of extremely cool MWDs. Meanwhile, observations reveal an increasing number of MWDs among significantly younger stars of this class. In this work, we revisit this problem. Unlike previous models, where the birth probability of MWD progenitor stars was considered independent of the age of the Galaxy, we account for the decreasing probability of occurrence of strongly magnetic stars (MWD progenitors) with the age of the Galaxy. Introducing this parameter allowed us to describe the increase in the occurrence of MWDs. This result argues that the population of massive MWD progenitor stars decreases with the age of the Galaxy, apparently due to the weakening of its magnetic properties in the process of evolution.

Keywords: *stars: magnetic field, stars: chemically peculiar, active and cold white dwarfs*