

УДК 524.31.084-337:52-54

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СИЛЬНО ЗАМАГНИЧЕННЫХ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ. III. ЧАСТОТА ВСТРЕЧАЕМОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВОЗРАСТА

© 2025 В. Н. Аитов<sup>1\*</sup>, Г. Г. Валявин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 12 июня 2025 года; после доработки 14 июля 2025 года; принята к публикации 16 июля 2025 года

Представлены результаты очередного исследования особенностей тепловой эволюции белых карликов с поверхностными магнитными полями больших величин. Основной задачей работы является проверка гипотезы о том, что для оставающихся вырожденных звезд — белых карликов (БК) — остановка внешней конвекции магнитным полем величиной выше одного мегагаусса значительно замедляет их остыивание. Для этой цели в объеме радиусом 20 пк построена наблюдаемая функция светимости БК с поверхностными полями более одного мегагаусса и проведено ее сравнение с известной аналогичной функцией светимости всех БК, безотносительно к величинам их магнитных полей. Подтверждена общая тенденция — значимое увеличение частоты встречаемости магнитных белых карликов (МБК) с увеличением их абсолютной балометрической звездной величины (уменьшением яркости). Эмпирическое моделирование влияния магнитоиндукционного подавления конвекции на функцию светимости сильно замагниченных БК также показало увеличение их частоты с возрастом, хотя и со сдвигом на одну звездную величину в область более слабых величин. Этот сдвиг является следствием несовершенства модели. Эффект увеличения частоты встречаемости сильнозамагниченных БК с возрастом не может быть объяснен ни систематической разницей в массах магнитных и немагнитных (с магнитными полями ниже предела детектирования) БК, ни особенностями темпов их образования в разные эпохи.

Ключевые слова: звезды: магнитное поле — звезды: функция светимости — белые карлики

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящее исследование является продолжением серии наших работ (Aitov et al., 2022a; b) по исследованию влияния магнитных полей на тепловую эволюцию БК со значительными (более 1 МГс) поверхностными магнитными полями (далее магнитные белые карлики, МБК). Необходимость продолжения работ в этом направлении продиктована тем, что однозначного ответа на вопрос, влияют ли поверхностные магнитные поля БК, в частности, через блокировку поверхностной конвекции, на темп их тепловой эволюции, до сих пор нет. Между тем недавние работы Bagnulo and Landstreet (2021; 2022), представившие наиболее репрезентативную выборку МБК в объеме 20 пк, позволили нам повторить часть исследования, представленного Aitov et al. (2022b) на более объективном наблюдательном базисе.

Впервые на повестку дня вопрос о влиянии магнитного поля БК на его эволюцию через блокировку конвективного выноса энергии был поставлен в

работе Valyavin et al. (2014). В то же время в публикации Tremblay et al. (2015) были высказаны критические замечания, согласно которым внешняя конвекция не участвует в процессе выноса тепла из недр белого карлика до тех пор, пока конвекция не достигает изотермического ядра, устанавливая с ним конвективную связь (convective coupling). Эта связь, по мнению Tremblay et al. (2015), наступает в условиях, когда БК остыл до температур менее 5500 К. Если магнитное поле достаточно велико (более 1–2 МГс), чтобы конвекцию остановить, конвективная связь с ядром не будет достигнута никогда. В этом случае, начиная с указанных температур, темп эволюции МБК замедлится по сравнению с его слабомагнитным (далее немагнитным) аналогом по другим физическим свойствам. Частота встречаемости таких МБК в результате будет выше. Однако если такие холодные МБК и наблюдаются, то их эволюционно в нашей Галактике еще очень мало, поэтому высокая частота встречаемости МБК, начиная сразу с температур менее 6000–8000 К (см. ниже), не может быть объяснена магнитными эффектами.

Совсем недавно Ginzburg (2024) показал, что

\*E-mail: vit9517@sao.ru

конвективная связь наступает при температурах существенно выше, чем предсказано ранее Tremblay et al. (2015). Кроме того, мы считаем спорным рассуждение, согласно которому магнитоиндукционная 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 влияет на тепловую эволюцию белого карлика, является бесспорным. Однако в случае блокирования поверхностной конвекции адиабатический градиент температуры неизбежно поменяет свою структуру в направлении радиационного градиента, который по определению больше, чем адиабатический. В свою очередь, это означает, что в случае остановки внешней конвекции белого карлика магнитным полем температура из недр к поверхности будет падать быстрее, чем при наличии конвекции. Это приведет к покраснению и, как следствие, к уменьшению темпа потери тепла в окружающем пространстве.

Гидростатическое равновесие при этом, в условиях отсутствия термоядерного горения, может сохраняться сколь угодно долго. Таким образом, мы считаем, что проблема влияния блокирования поверхностной конвекции на темп тепловой эволюции сильно замагниченного белого карлика до сих пор требует всестороннего исследования.

В настоящей работе мы представляем исследование, подобное проведенному Aitov et al. (2022b). На основе рассмотрения частот встречаемости МБК в зависимости от их абсолютной болометрической звездной величины  $M_{\text{bol}}$  (фактически от эффективной температуры) мы проводим моделирование на основе построения наблюдаемой и теоретической функций светимости БК. Исследование проводится для наиболее полной выборки МБК ближайших солнечных окрестностей в объеме радиусом 20 пк, представленной в работах Bagpulo and Landstreet (2021; 2022), что позволяет сделать надежные объективные выводы. Модельные функции светимости МБК мы конструируем при различных предположениях о темпах звездообразования их звезд-предшественников, используя обновленную функцию масс МБК и эмпирическую функцию, связанную с магнитоиндукционным подавлением у этих объектов внешней конвекции.

## 2. НАБЛЮДАЕМАЯ ФУНКЦИЯ СВЕТИМОСТИ МБК И ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

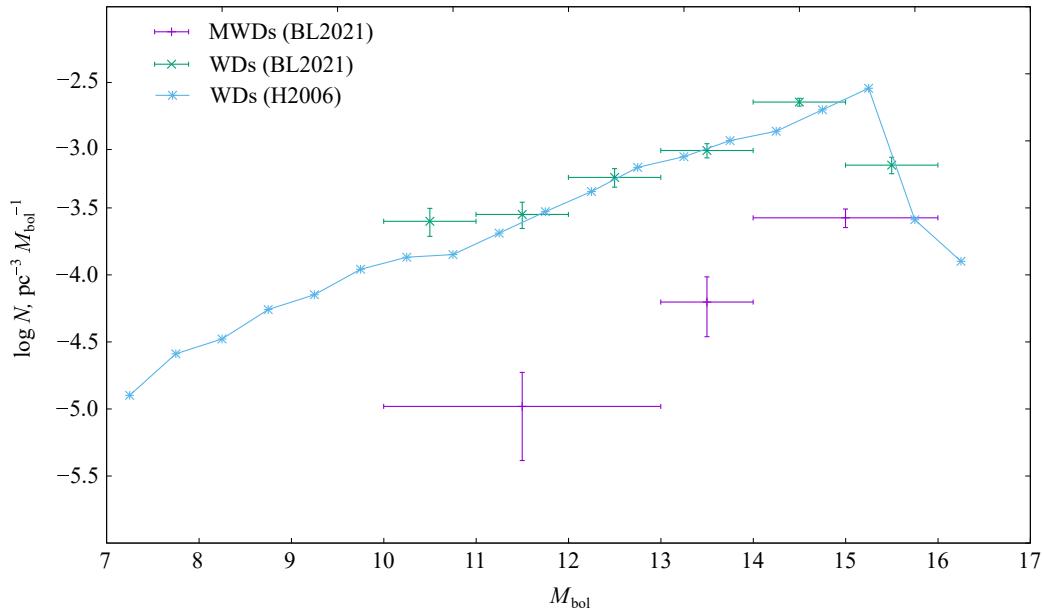
В контексте наших исследований (Aitov et al., 2022b) статистический анализ физических свойств МБК проводится с помощью конструирования и моделирования наблюдаемой функции светимости

МБК. Функция светимости ( $\Phi C$ ) определяется количеством объектов заданной светимости в единице объема в единичном интервале светимости. Конечная задача состоит в нахождении разницы между формами  $\Phi C$  для всех БК (Harris et al., 2006, далее H2006) и для МБК в ограниченном объеме. С этой целью мы моделируем  $\Phi C$  как для всей совокупности БК ближайшего солнечного окружения, так и для МБК. И далее, для исследования эволюционных особенностей МБК, мы строим функцию встречаемости МБК в зависимости от  $M_{\text{bol}}$  (главного индикатора возраста БК) и анализируем ее форму (Aitov et al., 2022b). Для МБК в настоящей работе мы, по причинам, обозначенным выше, ограничиваемся объемом радиусом 20 пк. В качестве опорной  $\Phi C$  для всех БК, включая МБК, мы используем функцию, построенную H2006 для объема радиусом 250 пк. Возможность сравнивать популяции БК в разных объемах объясняется ниже.

### 2.1. Наблюдаемая $\Phi C$ всех БК и МБК

Для совокупности всех БК мы используем наблюдаемую  $\Phi C$  из работы H2006. Она построена на основе анализа выборки БК в объеме радиусом 250 пк по данным каталога SDSS (Gunn et al., 1998; York et al., 2000; Stoughton et al., 2002). Сравнение этой функции с ее аналогами для выборок меньшего объема (в частности, радиусом 25 пк, Aitov et al., 2022b) показало их идентичность. Таким образом, белые карлики разных масс и возрастов распределены в пространстве ближнего солнечного окружения с радиусом несколько сотен пк однородно. В свою очередь, это заключение позволяет использовать функцию, полученную H2006 для объема 250 пк, как опорную, наименее отягощенную статистическим шумом, для сравнения с аналогичной функцией, построенной для МБК в объеме 20 пк.

Необходимость такого ограничения следует из того факта, что, несмотря на немногочисленность звездного населения в объеме радиусом 20 пк, для МБК она является наиболее полной — особенно для холодных звезд в области низких абсолютных светимостей. В конечном итоге наша задача состоит в получении зависимости частот встречаемости МБК от  $M_{\text{bol}}$  и сравнении результатов. Для ярких МБК с температурами 10 000–30 000 К эта частота с очень большой степенью вероятности находится на уровне 4% (Kepler et al., 2013). Более яркие/молодые МБК мы не рассматриваем из-за недостаточности статистических данных. Упор делается на рассмотрение далеко проэволюционировавших МБК, для которых массовые спектральные обзоры дают заниженный результат в силу отсутствия массовых поляризационных исследований. Ограничение объема в 20 пк делает



**Рис. 1.** Наблюдаемые функции светимости для известных БК в окрестности Солнца радиусом 250 пк (H2006) и в объеме, ограниченном 20 пк, для всех БК и МБК (BL2021). Подробнее см. в тексте.

выборку известных МБК с измерениями в спектрополяризационной моде наиболее полной (Bagnulo and Landstreet, 2021, далее BL2021).

На рис. 1. представлены наблюдаемые ФС из работ H2006 и BL2021. Данные H2006 показаны звездочками, соединенными сплошными линиями. Данные BL2021 (крестики с горизонтальными барами интервалов интегрирования) получены в ограниченном объеме радиусом 20 пк. Как можно видеть, в пределах ошибок функции совпадают, что еще раз подтверждает возможность использования функции, полученной H2006, в качестве опорной.

Оценки наблюдаемой ФС для МБК (рис. 1 — точки с горизонтальными барами интервалов интегрирования и вертикальными барами ошибок) получены лишь для трех интервалов в силу малой статистики. Вертикальные бары ошибок определены с помощью метода Монте-Карло. Тот факт, что амплитуда ФС МБК в среднем находится систематически ниже функции для всей выборки почти на порядок величины, объясняется невысокой частотой встречаемости МБК в общей популяции всех известных БК. В разных исследованиях эта частота оценивается от 4% для ярких БК (Kepler et al., 2013) до 20% для холодных (BL2021).

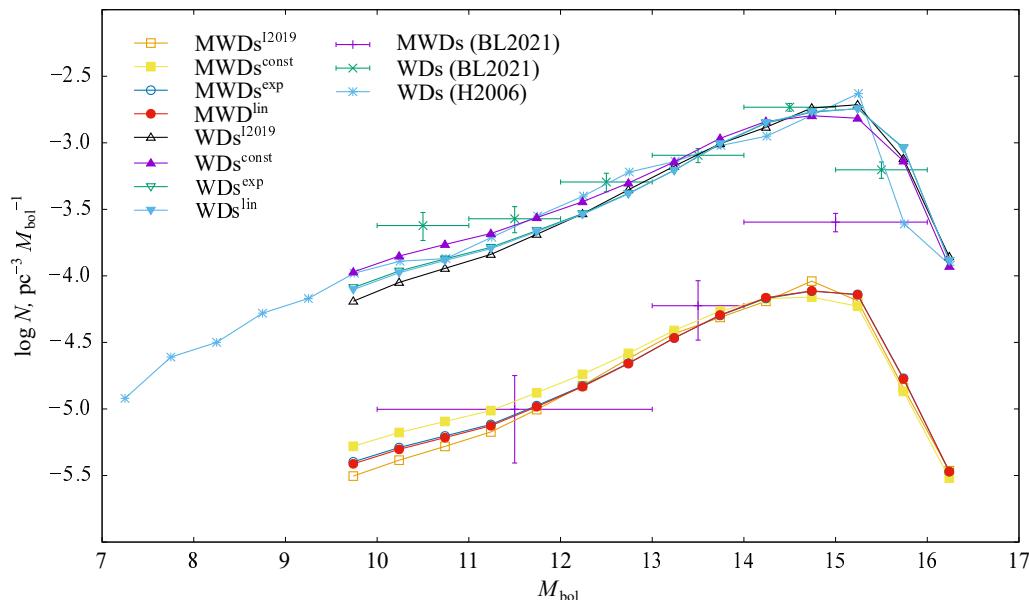
## 2.2. Моделирование наблюдаемых ФС всех БК и МБК без учета эффекта подавления конвекции магнитным полем

Способ моделирования ФС описан, например, Hernanz et al. (1994). Она задается интегралом

по массам от произведения распределения объектов по массам, скорости звездообразования и производной времени остыния по звездной величине. Аналогично, например, Hernanz et al. (1994), Salaris et al. (1997) и Torres et al. (2018) мы использовали распределение по массам, описанное в работе Salpeter (1955), с показателем степени  $-2.35$ . Распределение для МБК взято из работы Kawka et al. (2007). В качестве исходных данных по временам остыния 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 с ONe-ядрами ( $M = 1.06-1.28 M_{\odot}$ ). В настоящей работе исследовалось также влияние темпа звездообразования. Рассматривалось несколько различных форм: экспоненциальный спад, линейный спад, постоянный темп (используется в большинстве исследований, например, в работах Hernanz et al. (1994); Salaris et al. (1997); Torres and García-Berro (2016) и переменный темп (Isern, 2019).

Расчет функции светимости для каждой конкретной звездной величины проводился следующим образом:

1. Из всех известных последовательностей остыния БК для фиксированных масс формировались последовательности для всех промежуточных масс БК.
2. Производная времени остыния по звездной величине бралась с помощью построенной последовательности остыния. Производная для заданной звездной величины определялась как



**Рис. 2.** Модельные ФС для всех БК и МБК — «WDs» и «MWDs» соответственно; Верхние индексы «const», «exp», «lin» и «I2019» обозначают используемый нами в модели темп звездообразования — постоянный, с экспоненциальным или линейным спадом и темп звездообразования согласно Iserg (2019) соответственно. Для сравнения представлены наблюдаемые ФС для известных БК в окрестности Солнца радиусом 250 пк (H2006) и для всех БК и МБК в объеме, ограниченном 20 пк (BL2021).

разность времен остыния точек с заданной звездной величиной и следующей за ней, деленной на разность соответствующих звездных величин, за исключением последней звездной величины в последовательности остыния (в этом случае брались текущая звездная величина и предыдущая).

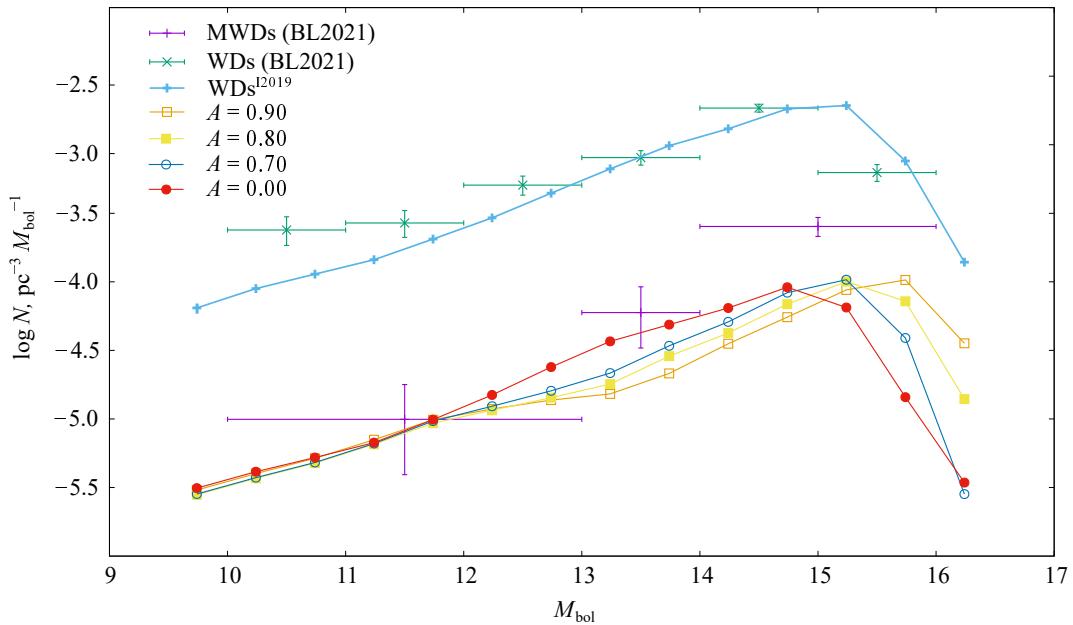
3. Расчет велся только для населения диска Галактики, поскольку мы имеем дело с ближайшим солнечным окружением. Если время остыния для заданных массы и звездной величины в сумме с временем нахождения звезды до стадии БК превышало возраст диска (9.3 млрд лет, Salaris et al., 1997), то значение интеграла в этой точке для данной массы обнулялось.
4. Скорость звездообразования определялась в рамках конкретной модели (спад темпа звездообразования в зависимости от времени линейный или экспоненциальный, постоянная скорость или переменная из Iserg (2019)). Получившуюся функцию светимости мы подгоняли к наблюдениям так, чтобы ее интеграл соответствовал интегралу наблюдаемой ФС (H2006) в заданном диапазоне звездных величин. В случае МБК мы подгоняли к частоте встречаемости 4–5% (Kepler et al., 2013) в области  $M_{bol} < 13^m$ .
5. Для моделей линейного и экспоненциального спада темпа звездообразования мы перебирали различные углы наклона и показатели экспоненты. Предпочтение отдавалось той функции

светимости, которая наиболее соответствовала форме наблюдаемой ФС из работы H2006.

Одной из задач исследования была также проверка влияния темпа звездообразования на оценку частоты встречаемости МБК. Поэтому мы брали различные варианты экспоненциального и линейного спада. По методу наименьших квадратов получившиеся функции сравнивались с наблюдаемой ФС, и выбиралась лучшая. Различные результаты моделирования без учета подавления конвекции, о чем сказано ниже, представлены на рис. 2. Как видно, какой-либо значимой разницы между ними не обнаруживается, особенно в области больших  $M_{bol}$ , представляющей наибольший интерес для нашего исследования. По этой причине для популяции МБК нами выбрана стандартная для БК модель Salaris et al. (1997).

### 2.3. Моделирование наблюдаемой функции светимости и частот встречаемости МБК с учетом эффекта подавления конвекции магнитным полем

Аналогично нашему предыдущему исследованию (Aitov et al., 2022b) в этой работе мы повторяем моделирование функции светимости МБК в предположении, что сильное поверхностное поле звезды, останавливающая конвекцию, существенно тормозит вертикальный вынос тепловой энергии. Нами (Aitov et al., 2022b) создана эмпирическая модель, рассчитывающая поправку к интегральной светимости поверхности МБК и, соответственно,



**Рис. 3.** Варианты модельной функции светимости МБК для разных значений параметра  $A$  в сравнении с вариантами ФС по всей выборке БК при темпе звездообразования из работы Iserg (2019).

поправку к временам остыния белых карликов разных масс в стандартных моделях (см., например, Salaris et al., 1997). Детали моделирования подробно рассмотрели Aitov et al. (2022b).

В основе используемой нами техники моделирования (Aitov et al., 2022b) лежит введение неизвестного параметра  $A(\langle |B| \rangle)$  ( $0 < A(\langle |B| \rangle) < 1$ ) в зависимости от усредненного по всей поверхности звезды модуля магнитного поля  $\langle |B| \rangle$ . Введение этого параметра смешает смоделированную функцию светимости в область больших величин (более низких эффективных температур). Чем больше величина параметра, тем больше смещение. Примеры моделирования функции светимости МБК приведены на рис. 3.

Характерными особенностями для всех приведенных вариантов функции светимости МБК являются увеличение дефицита звезд с ростом параметра  $A$  в характерном интервале абсолютных болометрических величин  $12^m - 13^m 5$  и рост по отношению к случаю  $A = 0$  для более слабых объектов. Первая особенность объясняется покраснением МБК и смещением их количества «влево» на рис. 3. Вторая — рост числа МБК для  $M_{\text{bol}} > 13^m 5$  — является следствием замедления процесса остыния МБК и постепенного накопления их в указанном интервале  $M_{\text{bol}}$ . Оба этих обстоятельства отражены на рис. 4, на котором проиллюстрированы наблюдаемые и смоделированные для разных значений параметра  $A$  частоты встречаемости МБК в зависимости от их абсолютной болометрической звездной величины.

Как мы уже убеждались ранее (Aitov et al., 2022b), рассматривая неполную выборку МБК в объеме 25 пк, предложенный метод позволяет объяснить повышение частот встречаемостей МБК с возрастом. Между тем резкий рост частот встречаемости для МБК с  $M_{\text{bol}} > 15^m$  не поддерживается общим поведением наблюдаемых частот встречаемости МБК, для которых общий рост начинается на одну величину раньше. Это расхождение мы относим, прежде всего, к несовершенству нашей модели, которая рассматривает чисто водородные внешние слои у МБК. Несмотря на то что у большинства включенных в статистику БК атмосферы чисто водородные (спектральный класс DA), их оболочки должны содержать и значительный гелиевый слой. Кроме того, около 2% рассмотренных МБК имеют в атмосферах существенное количество гелия (белые карлики спектрального класса DB) и других химических элементов. При отсутствии инструмента для корректного рассмотрения процесса подавления конвекции во всех этих случаях наша модель остается лишь его качественной иллюстрацией. Тем не менее мы располагаем целым набором фактов для вполне обоснованных выводов, представленных ниже.

### 3. ДИСКУССИЯ

Мотивированные публикацией сравнительно новых наблюдательных данных и выводов по магнетизму БК в работах Bagnulo and Landstreet (2021; 2022), здесь мы провели повторный анализ частот встречаемости МБК как функции его абсолютной звездной величины в ограниченном

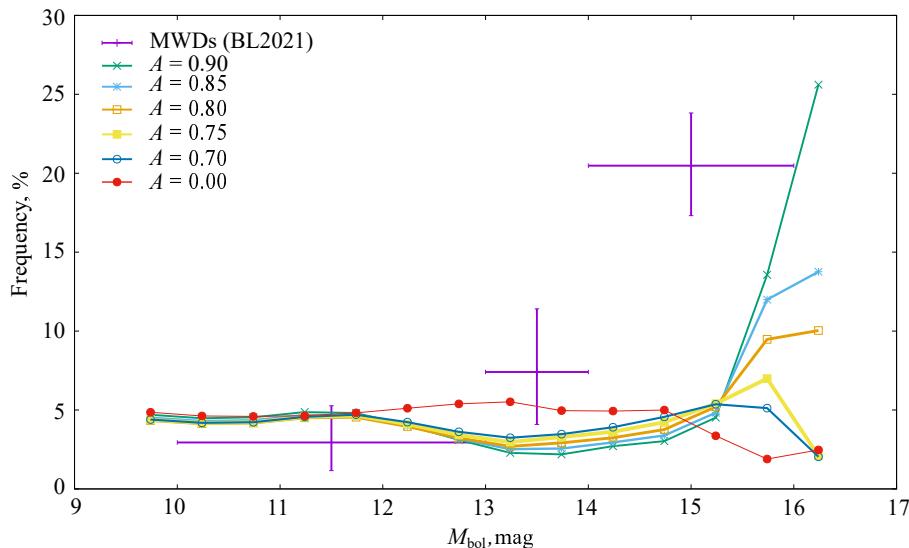


Рис. 4. Модельная частота встречаемости МБК как функция абсолютной болометрической величины для разных значений параметра  $A$ . Три значения в интервалах, указанных горизонтальными барами — частоты встречаемости по данным BL2021.

объеме радиусом 20 пк. В этом объеме выборка МБК наиболее полна, поскольку прошла также и через спектрополяриметрическую диагностику. Одни только спектральные исследования в значительной степени селекционно зависимы, в особенности в области далеко проэволюционировавших холодных БК, спектры которых бедны спектральными деталями либо вообще лишены их (МБК спектрального класса DC). В результате в массовых спектральных обзорах МБК (см., например, Kepler et al., 2013) число холодных МБК больших  $M_{\text{bol}}$ , очевидно, недооценено, в то время как оценка средней частоты встречаемости МБК с температурами в интервале 10 000–40 000 К, 4% (Kepler et al., 2013), является, по всей видимости, корректной, поскольку согласуется с результатами многих других исследователей. В этой области эффективных температур спектральные особенности МБК с полями более 1–2 МГц легко обнаруживаются средствами массовой спектроскопии. Эта же оценка подтверждается и настоящим исследованием, в котором частота встречаемости МБК в диапазоне абсолютных болометрических светимостей  $10^m$ – $13^m$  (пересекающемся с данными Kepler et al. (2013)), оценена на уровне 3% (оценка частоты встречаемости по данным BL2021 при самом левом горизонтальном баре на рис. 4). Если сравнить эти оценки с частотой  $20 \pm 3\%$  при горизонтальном баре  $M_{\text{bol}} 14^m$ – $16^m$  (рис. 4), становится очевидно, что разница в частотах весьма значительна. И этот результат мы считаем одним из основных в настоящем исследовании.

При всей очевидности наблюдаемого роста частот встречаемости МБК с болометрической абсолютной величиной (с возрастом) в сообществе

до сих пор нет единого мнения по поводу физической природы этого явления. В частности, BL2021 считают, что для подтверждения данного эффекта необходим анализ статистики МБК на больших объемах солнечного окружения. Между тем разницы в частотах встречаемости на уровне более « $4\sigma$ », полученной в настоящем исследовании, достаточно для того, чтобы считать эффект увеличения частот встречаемости МБК с возрастом, установленным в очередной раз.

Также в работе показано, что эффект увеличения частоты встречаемости МБК с возрастом не может быть объяснен ни систематической разницей в массах МБК (см. также Aitov et al., 2022b) и обычных (с магнитными полями ниже предела детектирования) БК, ни особенностями темпов их образования в разные эпохи. И в этой связи мы в очередной раз проводим моделирование частот встречаемости МБК с возрастом, индикатором которого является абсолютная болометрическая звездная величина. Мы показываем, что в отличие от других рассмотренных «немагнитных возможностей», подавление конвекции магнитным полем способно объяснить рост частот МБК с возрастом.

К сожалению, ограниченность нашего исследования, связанного с рассмотрением чисто водородного поверхностного слоя массы МБК, не позволило нам получить полное согласие с наблюдениями. Наблюдается систематический сдвиг модели в область больших  $M_{\text{bol}}$  примерно на  $1^m$ . Как уже объяснялось выше, а также в работе Aitov et al. (2022b), это расхождение является недочетом в моделировании других химических элементов, главным образом гелия, который должен присутствовать под фотосферами DA-карликов. Кроме того, примерно 25% звезд выборки имеют гелий

на поверхностях и в атмосферах DB-карликов, что тоже расходится с нашей моделью.

Поскольку гелий вступает в температурный режим конвективной нестабильности при гораздо более высоких температурах, мы ожидаем, что корректное включение гелия в расчеты сдвинет функцию зависимости частоты встречаемости МБК в сторону более высоких температур/яркостей МБК. Такой подход требует отдельного теоретического исследования, которое выходит за рамки настоящей работы. Здесь мы лишь качественно демонстрируем возможности и пути дальнейшего продвижения к объяснению эффекта увеличения частот встречаемости МБК с возрастом.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 25-12-00003. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. N. Aitov, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 301 (2022a). DOI:10.1134/S1990341322030026
2. V. N. Aitov, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 308 (2022b). 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. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (4), 5902 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2046
5. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **935** (1), id. L12 (2022). DOI:10.3847/2041-8213/ac84d3
6. S. Ginzburg, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **534** (1), L65 (2024). DOI:10.1093/mnrasl/slae082
7. M. Hernanz, E. Garcia-Berro, J. Isern, et al., *Astrophys. J.* **434**, 652 (1994). DOI:10.1086/174767
8. J. Isern, *Astrophys. J.* **878** (1), article id. L11 (2019). DOI:10.3847/2041-8213/ab238e
9. A. Kawka, S. Vennes, G. D. Schmidt, et al., *Astrophys. J.* **654** (1), 499 (2007). DOI:10.1086/509072
10. S. O. Kepler, I. Pelisoli, S. Jordan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429** (4), 2934 (2013). DOI:10.1093/mnras/sts522
11. M. Salaris, I. Domínguez, E. García-Berro, et al., *Astrophys. J.* **486** (1), 413 (1997). DOI:10.1086/304483
12. E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **121**, 161 (1955). DOI:10.1086/145971
13. S. Torres and E. García-Berro, *Astron. and Astrophys.* **588**, id. A35 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201528059
14. 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
15. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, et al., *Nature* **515** (7525), 88 (2014). DOI:10.1038/nature13836

### Studing the Evolution of Strongly Magnetized White Dwarfs.

#### III. Frequency of Occurrence Depending on Age

V. N. Aitov<sup>1</sup> and G. G. Valyavin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The results of the latest study of the thermal evolution features of white dwarfs with large surface magnetic fields are presented. The main objective of the work is to test the hypothesis that for cooling degenerate stars—white dwarfs (WD)—the stopping of external convection by a magnetic field greater than one megagauss significantly slows down their cooling. For this purpose, the observed luminosity function of WDs with surface fields greater than one megagauss is constructed in a volume with a 20 pc radius and compared to the known similar luminosity function of all WDs, regardless of their magnetic field values. The general tendency—a significant increase in the frequency of occurrence of magnetic white dwarfs (MWDs) with an increase in their absolute bolometric magnitude (a decrease in brightness) is confirmed. Empirical modeling of the effect of magnetically induced suppression of convection on the luminosity function of strongly magnetized WDs also showed an increase in their frequency with age, although with a shift of one stellar magnitude toward weaker magnitudes. This shift is a consequence of the imperfection of the model. The effect of an increase in the frequency of occurrence of strongly magnetized WDs with age cannot be explained either by a systematic difference in the masses of magnetic and non-magnetic (with magnetic fields below the detection limit) WDs, or by the peculiarities of their formation rates in different epochs.

Keywords: stars: magnetic field—stars: luminosity function—white dwarfs