

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 524.31.084-337

Аитов Виталий Наильевич

Исследование влияния магнитных полей белых карликов на их эволюцию

Специальность 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Научный руководитель: д.ф.-м.н., исполняющий обязанности директора
САО РАН **Валявин Геннадий Геннадьевич**

Официальные оппоненты: **Холтыгин Александр Федорович**, д.ф.-м.н.,
профессор кафедры астрономии Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования Санкт-
Петербургский государственный университет

Демидов Михаил Леонидович, д.ф.-м.н.,
Заведующий лабораторией экспериментальной
физики Солнца и астрофизического
приборостроения Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Ордена Трудового
Красного Знамени Институт солнечно-земной
физики Сибирского отделения Российской
академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»

Защита состоится 14 декабря 2026 года в 11:00 на заседании диссертационного совета
24.1.212.01 при САО РАН по адресу: 369167 САО РАН, пос. Нижний Архыз,
Зеленчукский район, Карачаево-Черкесская республика, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан “____” _____ 2026 Года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

24.1.212.01, канд. физ.-мат. наук

Шолухова Ольга Николаевна

Введение

Магнитные поля наблюдаются у большинства объектов Вселенной: у звёзд Главной последовательности, белых карликов, нейтронных звёзд, планет, межзвездной среды. Их влияние на эти объекты очень разнообразно. Магнитные поля межзвездной среды регулируют процессы звездообразования. Магнитные поля звезд и планет направляют процессы их эволюции, изменяя структуру их внешних слоев и создавая радиационные условия в их окружениях. Генерируемые Солнцем сильномагнитные структуры индуцируют вспышечные процессы, что, в свою очередь, оказывает влияние на радиационный фон вокруг планет и эволюцию жизни на Земле. Диссертация посвящена исследованию влияния магнитных полей на тепловую эволюцию вырожденных звезд-белых карликов.

Белые карлики — финальный этап эволюции звёзд малых масс. Они не имеют внутреннего источника энергии. Соответственно, в отсутствие у них звезд-компаньонов их эволюция определяется лишь тепловым остыванием. Кроме того эти объекты могут обладать магнитными полями, существенно превосходящими поля обычных звёзд [1]. Сравнение энергетических бюджетов вещества внешних слоев белых карликов с энергиями их магнитных полей указывает на то, что поля от нескольких мегагаусс и более могут заметно влиять на их тепловую эволюцию.

Основной движущей идеей диссертации стала высказанная в [2] гипотеза о том, что магнитное поле активно влияет на конвективный слой, развивающийся после достижения белым карликом температур ниже 10 000 К в процессе их остывания. Для слабых магнитных полей это будет выражаться в появлении на его поверхности пятен, подобных солнечным [3-6]. А для объектов с сильными магнитными полями результатом будет подавление конвекции по всей площади белого карлика. Это приведёт к уменьшению эффективности передачи тепла от недр к поверхности. Диссертация посвящена исследованию этого вопроса, а также вопроса о происхождении популяции белых карликов с регулярными

крупномасштабными магнитными полями (далее магнитные белые карлики, МБК).

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы является, как уже отмечено выше, исследование происхождения и эволюции МБК. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Проведение поляризационных наблюдений белых карликов для обнаружения новых кандидатов в МБК и подтверждения магнитной природы ряда других звезд этого семейства для контроля селекции выборки МБК в объеме радиусом 25 пк.
2. Построение и моделирование функции светимости магнитных белых карликов с экстремально большими магнитными полями. Сравнение этой функции с аналогичной функцией для обычных белых карликов. Выявление их эволюционных различий, связанных с подавлением конвекции во внешних слоях МБК магнитным полем и с различными скоростями звездообразования.
3. Построение функции вероятностного распределения белых карликов по величинам их поверхностных магнитных полей, ее интерпретация и статистический анализ. Построение и анализ такой функции дает ответ на вопрос о происхождении МБК.

Научная новизна работы

1. Проведены новые наблюдения круговой поляризации для 19 белых карликов. С использованием данных этих наблюдений, также архивных данных

магнитометрических наблюдений белых карликов, проводившихся в САО РАН и других обсерваториях, впервые сделаны численные оценки временной стабильности магнитосфер шести звезд: она составила от нескольких десятков до сотен и более лет. Эти звезды могут далее быть использованы как первые стандарты круговой поляризации. До сих пор в мировой практике астрономических наблюдений нет ни одного документированного стандарта круговой поляризации. Выявлены три новых кандидата в белые карлики с экстремально сильными магнитными полями: LP 240–30, WD 1633+572, WD 0245+541.

2. Построены уточненные версии наблюдаемых вероятностных распределений белых карликов по напряженности их поверхностных магнитных полей в диапазоне от 10^3 до 10^9 Гс. В промежутке от 10^5 до 10^9 Гс распределение белых карликов хорошо описывается степенной зависимостью. В области более слабых полей зависимость нарушается, демонстрируя селекционный «завал». Селекция имеет физическую природу и обнаружена впервые. Она связана с «запутыванием» структур глобальных магнитных полей малой напряженности (менее десятков килогаусс) динамическими процессами в поверхностных слоях белых карликов. Такие структуры зачастую невозможно детектировать поляриметрическими методами.
3. Впервые показано, что рост частоты встречаемости холодных МБК с возрастом определяется совокупностью различных факторов - отличием масс этих объектов от масс немагнитных белых карликов, торможением конвекции магнитным полем и переменной скоростью звездообразования звезд-предков МБК. Учет этих факторов объясняет рост частоты встречаемости.

Актуальность

До сих пор нет ответа на вопрос, почему около 10% белых карликов имеют крупномасштабные магнитные поля, в то время как подавляющее большинство звезд этого класса не проявляет признаков магнетизма, несмотря на многочисленные попытки их обнаружения даже на самых крупных телескопах мира. Автор диссертации ставит своей задачей ответ на этот важнейший вопрос. Также в настоящее время не существует теории эволюционного остывания одиночных МБК с экстремально сильными магнитными полями. Таким образом, некоторые наблюдаемые особенности этих объектов остаются необъяснёнными до сих пор. Одним из эффектов является отмеченное рядом исследователей увеличение с возрастом частоты встречаемости этих объектов: начиная с температур 14 000 К и ниже, она значительно возрастает. Существуют несколько возможных объяснений данного эффекта: это большие массы МБК (среднее значение $0.83 M_{\odot}$) относительно немагнитных масс белых карликов (среднее значение $0.6 M_{\odot}$), рост магнитного поля с возрастом, торможение конвективного переноса энергии магнитным полем и более высокая скорость звездообразования звезд-предков МБК.

Научная и практическая значимость

В работе представлен новый наблюдательный материал по белым карликам. Данные опубликованы и могут быть использованы для других исследований и создания первого списка стандартов круговой поляризации.

Уточненные версии наблюдаемых вероятностных распределений белых карликов по напряженности их поверхностных магнитных полей ответили на вопрос почему большинство белых карликов не обнаруживает признаков магнетизма. Магнитные поля различной напряженности есть, скорее всего, у всех белых карликов, но для величин напряженностей менее нескольких десятков килогаусс глобальная симметрия таких полей нарушается, и они становятся ненаблюдаемыми поляриметрическими методами. Даны практические рекомендации к продолжению магнитометрических наблюдений белых карликов со слабыми магнитными полями. Построение функции светимости МБК позволит уточнить влияние различных процессов на их эволюцию и в конечном итоге построить теорию остывания белых карликов в присутствии сильных магнитных полей. Также изучение влияния скорости звездообразования на частоту встречаемости магнитных звезд-предков МБК даёт возможность проследить историю магнитных свойств Галактики на протяжении времени жизни её диска.

Наблюдательные данные диссертации доступны для составления баз данных в отечественных и зарубежных астрономических институтах и обсерваториях. Теоретические и интерпретационные выкладки диссертации могут быть использованы для чтения лекций на астрономических отделениях и кафедрах Московского государственного университета, Казанского федерального университета, Санкт-Петербургского государственного университета, Северо-Кавказского федерального университета (Ставрополь), Уральского федерального университета и других отечественных и зарубежных вузов. Методические вопросы, рассмотренные в диссертации, связанные с наблюдениями и моделированием, будут востребованы в научно-исследовательских астрофизических институтах России, таких как Крымская астрофизическая обсерватория (Крым), Пулковская обсерватория (Пулково, Санкт-Петербург), Физико-технический институт им. Иоффе (Санкт-Петербург), Институт астрономии (Москва), Институт космических исследований (Москва), Коуровская обсерватория (Свердловская область) и др.

Содержание диссертации

Настоящая диссертация представляет собой результат работы автора в период с 2018 по 2026 гг. и состоит из Введения, 5 глав, Заключения, списка литературы. Общий объём составляет 121 страницу, включая 30 рисунков, 4 таблицы, список литературы содержит 161 наименование.

Во Введении описываются поставленные цели и задачи диссертационной работы, обосновывается актуальность исследования эволюции магнитных белых карликов, приведены оценки научной новизны и практической ценности работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приводятся список статей с результатами диссертационной работы, список конференций, на которых они докладывались, поясняется личный вклад автора. Кроме того, описывается содержание диссертации.

В первой главе приводится краткий экскурс в историю открытия и изучения магнитных белых карликов. Также приводятся результаты современных исследований, которые ставят основные задачи данной работы.

В первой части второй главы представлены историческая справка и анализ наблюдений МБК в CAO РАН. Там же даны численные нижние оценки времен стабильности магнитосфер этих звезд. Во второй части первой главы описаны фотометрические наблюдения белых карликов, выполненные в период с 2019 по 2020 годы. В части главы «Наблюдения» приводится сводная информация по наблюдениям 19 белых карликов. Материал получен с помощью 1-м телескопа Цейсс-1000 CAO РАН. В части главы «Результаты» аргументируется возможность выполнения наблюдений на Многорежимном фотометре-поляриметре MMPP (Multi-ModePhotometer-Polarimeter) на примере известных магнитных объектов (GRW +70°8247, WD 1309+853, WD 1312+098,

WD 1748+708) и приводится список кандидатов в новые магнитные белые карлики (LP 240–30, WD 1633+572, WD 0245+541).

В третьей главе приведены результаты моделирования функции светимости немагнитных и магнитных белых карликов, а также частота встречаемости последних в зависимости от их светимости. В первом разделе главы описываются опорные функции светимости, которые используются далее. В следующих разделах главы рассматривается влияние различных параметров на частоту встречаемости МБК. Во втором разделе мы показываем влияние подавления конвективного переноса энергии магнитным полем в податмосферном слое МБК. В этом же разделе показано, что только лишь разницей масс БК и МБК рост частоты встречаемости объяснить невозможно. В третьем мы вводим в модель переменную скорость образования БК, при этом доля магнитных среди вновь образованных БК в этом разделе постоянна. В четвертом разделе главы мы также рассматриваем переменную скорость образования БК и МБК. Но в этом разделе мы вводим в модель зависимость доли магнитных среди вновь образованных БК от времени жизни диска Галактики. Итоговая модель хорошо описывает частоту встречаемости МБК и даёт хорошее согласие между теоретическим и наблюдаемым количеством магнитных звезд-предков МБК на текущем этапе эволюции диска Галактики.

В четвертой главе обсуждаются версии происхождения МБК. Основным является вопрос о том, являются ли МБК отдельной популяцией или представляют собой самую магнитную часть общего распределения белых карликов по напряженности магнитных полей. В этой главе дан анализ вероятностного распределения белых карликов по величинам их магнитных полей и сделаны выводы по результатам этого анализа.

Пятая глава представляет собой описание серии экспериментов по остановке конвекции магнитным полем, проведённых на базе Северо-Кавказского федерального университета. В разделе «Методика эксперимента» описываются установка, используемая в данном исследовании, и сам эксперимент. В разделе

«Результаты» приводятся результаты эксперимента. В разделе «Обсуждение результатов» приводится обсуждение этих результатов и их интерпретация в контексте торможения переноса энергии в конвективных внешних слоях МБК.

Апробация результатов

Результаты работы докладывались на семинарах САО РАН и на следующих конференциях:

1. «IV Межрегиональная междисциплинарная молодежная научно-практическая конференция МНПК», 2019, 10-13 июня, база отдыха ФИЦ ИПФ РАН «Варнавино», устный доклад «Магнитные поля у белых карликов».
2. «Наземная астрономия в России. XXI век», 2020, 21 – 25 сентября, САО РАН, устный доклад «Поиск одиночных магнитных белых карликов».
3. Всероссийская конференция «Физика звёзд: теория и наблюдения», 26-30 июня 2023 года, ГАИШ, постерный доклад «Наблюдения магнитных белых карликов с экстремально сильными магнитными полями».
4. Всероссийская конференция «Современные инструменты и методы в астрономии», 04-09 сентября 2023г., САО РАН, устный доклад «Магнетизм белых карликов».
5. Всероссийская астрономическая конференция 2024 года «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр», 25-31 августа 2024 г., САО РАН, постерный доклад «Наблюдения магнитных белых карликов в САО РАН».
6. Всероссийская конференция с международным участием «Физика звёзд в эпоху многоволновых наблюдений», 22-26 сентября 2025 г., СПбГУ, устный доклад «Влияние различных факторов на частоту встречаемости одиночных магнитных белых карликов »

7. Конкурс-конференция научных, научно-технических и научно-популярных работ САО РАН, 6 февраля 2026 г., устный доклад «Моделирование функции светимости магнитных белых карликов»

Положения, выносимые на защиту

1. С использованием впервые полученных поляризационных наблюдательных данных, а также данных архивных магнитометрических наблюдений белых карликов, проводившихся в САО РАН и в других обсерваториях, сделаны численные оценки характеристических времен стабильности магнитосфер для шести звезд: от нескольких десятков до сотен и более лет. Сделан вывод, что эти звезды могут быть использованы как первые стандарты круговой поляризации.
2. Сделан вывод о том, что для объяснения феномена существенного роста числа МБК с низкими поверхностными температурами необходим учет нескольких факторов: отличие масс этих объектов от масс немагнитных белых карликов, подавление конвективного выноса энергии магнитным полем и переменная во времени частота звездообразования предков МБК относительно БК. Учет всех этих факторов позволяет объяснить рост частоты встречаемости МБК относительно БК.
3. Сделан вывод о том, что наблюдаемая популяция МБК не является эволюционно обособленной, а представляет собой лишь участок общего монотонного распределения белых карликов по напряженности их поверхностных магнитных полей в области высоких значений. Построены уточненные версии наблюдаемых вероятностных распределений магнитных белых карликов по напряженности их поверхностных магнитных полей в диапазоне от 10^3 до 10^9 Гс. В промежутке от 10^5 до 10^9 Гс распределение белых карликов описывается монотонной степенной зависимостью. В области

более слабых полей зависимость нарушается, что демонстрирует эффекты наблюдательной селекции.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в пяти статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и в двух статьях в сборниках трудов конференций:

1. A Search for Isolated Cool Magnetic White Dwarfs / Aitov, V. N., Valyavin, G. G., Valeev, A. F., et al. // Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Proceedings of the All-Russian Conference held 21-25 September, 2020 / Ed. by. I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, D. O. Kudryavtsev. – 2020. – p. 153-156.
2. Zeiss-1000 SAO RAS: Instruments and Methods of Observation / Komarov V. V., Moskvitin A. S., Bychkov V. D., et al. // Astrophysical Bulletin. – 2020. – vol.75. – issue 4. – p 486-500.
3. Magnetic Field Inhibition of Convective Heat Transfer in Magnetic Nanofluid / Zakinyan, A., Kunikin, S., Chernyshov, A., et al. / Magnetochemistry. – 2021. – vol. 7. – issue 2. – p. 11.
4. Studies of Features of Evolution of Highly Magnetized Stars—White Dwarfs. I. Observations / Aitov V. N., Valyavin G. G., Valeev A. F., et al. // Astrophysical Bulletin. – 2022. – vol.77. – issue 3. – p. 301-307.
5. Studies of Features of Evolution of Highly Magnetized White Dwarfs and Some Other Stars under Conditions of Magnetically Induced Suppression of Convective Energy Removal. II. Modeling / Aitov V. N., Valyavin G. G., Valeev A. F., et al.

// Astrophysical Bulletin. – 2022.– vol. 77. – issue 3. – p. 308-315.

6. Aitov, V. N., Observations of magnetic white dwarfs with extremely strong magnetic fields / Aitov, V. N., Valyavin, G. G.// INASAN Science Reports. – 2023. – vol. 8. – issue 2. – p. 51-53.
7. Частоты встречаемости белых карликов с регулярными магнитными полями / Аитов В.Н., Корчагина Е.П., Валявин Г.Г., и др.//Астрофизический бюллетень. – 2024. – том 79. – № 3. – с. 511–520.
8. Aitov, V.N., Studing the Evolution of Strongly Magnetized White Dwarfs. III. Frequency of Occurence Depending on Age. / Aitov, V.N., Valyavin, G.G.// Astrophysical Bulletin – 2025 – vol. 80. – issue 3. – p. 449–455.
9. Аитов, В. Н., Магнитные белые карлики как индикаторы эволюции магнитных свойств Галактики / Аитов В. Н., Валявин Г.Г.// Астрофизический бюллетень. –2026. –том 81. –№ 3. – с. 361-367

Личный вклад автора

1. Автор выполнил большую часть наблюдений на телескопе Цейсс-1000 на фотометре-поляриметре ММРР, а также их обработку и анализ.
2. Оценки характерного времени эволюции магнитных полей МБК были сделаны автором лично.
3. Автором были построены функции распределения магнитного поля МБК, не публиковавшиеся ранее, и сделан равный с руководителем вклад в анализ этих функций.
4. Внесен определяющий вклад в построение функции светимости и

определение частоты встречаемости магнитных белых карликов.

5. Наравне с соавторами принимал участие в анализе эксперимента по торможению конвекции магнитным полем.

Список литературы

- [1] Magnetic white dwarf stars in the Sloan Digital Sky Survey /Kepler, S. O., Pelisoli, I., Jordan, S., et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2013. – vol. 429.– issue 4. – p. 2934-2944.
- [2] Suppression of cooling by strong magnetic fields in white dwarf stars/ Valyavin, G., Shulyak, D., Wade, G. A. et al.// Nature. – 2014. – vol. 515. – issue 7525 – p. 88-91.
- [3] A Study of the Photometric Variability of the Peculiar Magnetic White Dwarf WD 1953-011 / Valyavin, G., Antonyuk, K., Plachinda, S., et al. // The Astrophysical Journal. – 2011. – vol. 734. – issue 1. – article id. 17. – pp. 9.
- [4] Rotational period of WD 1953-011- a magnetic white dwarf with a star-spot / Brinkworth, C. S., Marsh, T. R., Morales-Rueda, L., et al.// Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2005. – vol. 357. – issue 1. – p. 333-337.
- [5] The Peculiar Magnetic Field Morphology of the White Dwarf WD 1953-011: Evidence for a Large-Scale Magnetic Flux Tube? / Valyavin, G., Wade, G. A., Bagnulo, S., et al. // The Astrophysical Journal. – 2008. – vol. 683. – issue 1. – p. 466-478.
- [6] A search for variations in the magnetic field of the white dwarf PG 1658 + 441 / Shtol', V. G., Valyavin, G. G., Fabrika, S. N., et al. // Astronomy Letters. – 1997. – vol. 23.– issue 1. – p. 48-54.

Бесплатно

Аитов Виталий Наильевич

Исследование влияния магнитных полей белых карликов на их эволюцию

Подписано в печать _____ Заказ № _____

Формат 60*90/16 Усл.печ.л.1. Тираж 100 экз.

Типография _____