

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук Валявин Г.Г.

Нижний Архыз – 2026

Оглавление

Введение	4
Глава 1. История открытия и исследования магнитных белых карликов	15
1.1. История открытия.....	15
1.2. Характеристики магнитных белых карликов.....	16
1.3. Происхождение магнитных белых карликов	18
1.4. Эволюция магнитных белых карликов.....	20
1.5. Замедление остывания магнитных белых карликов	21
Глава 2. Наблюдения МБК в CAO РАН	25
2.1. Введение	25
2.2. Историческая сводка наблюдений МБК в CAO РАН	27
2.2.1. WD 0009+501	28
2.2.2. WD 1953–011	29
2.2.3. WD 2047+372, WD 2359–434	30
2.2.4. WD 1105–048	30
2.2.5. WD 1647+591	31
2.2.6. WD 2105–820	31
2.3. Поляриметрические наблюдения МБК на ЦЕЙСС-1000	33
2.3.1. Наблюдения.....	33
2.3.2. Стандартизация	35
2.3.2.1. GRW +70°8247.....	37
2.3.2.2. WD 1312+098.....	40
2.3.2.3. WD 1748+708.....	41
2.3.2.4. WD 1309+853.....	41
2.3.3. Выбор объектов для наблюдений	43
2.4. Результаты	43
Глава 3. Моделирование функции светимости магнитных белых карликов	51
3.1. Введение.....	51
3.1.1. Наблюдаемые функции светимости БК и МБК	53
3.2. Функции светимости МБК при подавленной конвекции	57

3.2.1 Моделирование функций светимости всей совокупности белых карликов и МБК ближайшего солнечного окружения	58
3.2.2 Частота встречаемости МБК как функция болометрической звездной величины	62
3.3 Моделирование функции светимости МБК при различной скорости звездообразования	64
3.3.1. Моделирование наблюдаемых функций светимости всех БК и МБК без учета эффекта подавления конвекции магнитным полем	65
3.3.2. Моделирование наблюдаемой функции светимости и частот встречаемости МБК с учетом эффекта подавления конвекции магнитным полем	67
3.4. Функции светимости МБК с переменной частотой рождения МБК	70
3.4.1. Моделирование функции светимости с учетом переменной частоты рождения МБК.....	73
3.5. Результаты	76
Глава 4. Встречаемость МБК в зависимости от величины их поверхностного магнитного поля.....	78
4.1. Введение.....	78
4.2. Построение и анализ функций магнитного поля для МБК.....	79
4.3 Результаты	81
Глава 5. Экспериментальное подтверждение замедления остывания магнитной жидкости с подавленной внешним магнитным полем конвекцией.....	84
5.1. Введение.....	84
5.2. Историческая справка и вводные замечания к эксперименту	85
5.3. Методика эксперимента	88
5.4. Результаты	91
5.5. Обсуждение результатов.....	95
Заключение.....	101
Благодарности	104
Список литературы.....	105

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. 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 [1] 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. 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, Заключение, 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 ММРР (Multi-Mode Photometer-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:

- «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».
- «Наземная астрономия в России. XXI век», 2020, 21 – 25 сентября, САО РАН, устный доклад «Поиск одиночных магнитных белых карликов».
- Всероссийская конференция «Физика звёзд: теория и наблюдения», 26-30 июня 2023 года, ГАИШ, постерный доклад «Наблюдения магнитных белых карликов с экстремально сильными магнитными полями».
- Всероссийская конференция «Современные инструменты и методы в астрономии», 04-09 сентября 2023 г., САО РАН, устный доклад «Магнетизм белых карликов».
- 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».

- 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 »
- 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.

Глава 1. История открытия и исследования магнитных белых карликов

1.1. История открытия

Первый белый карлик, у которого было обнаружено магнитное поле, GRW +70°8247, был открыт Кемпом [2] в 1970 г. в ходе широкополосных поляризметрических наблюдений. В спектре звезды было зафиксировано наличие сильной круговой поляризации, что было интерпретировано как результат воздействия сильного магнитного поля. Первая оценка напряженности магнитного поля, данная авторами, составила 10 МГс, что на порядок ниже современной. Это открытие подтолкнуло сообщество к поиску других МБК.

Стоит отметить, что на особенный статус этой звезды также указывало присутствие в ее спектре нескольких широких абсорбционных линий, находящихся вблизи 4135 и 4466 Å. Они были обнаружены Минковским [3] в 1938 г. Попытки объяснить данные особенности спектра суперпозицией нескольких абсорбционных линий оказались безрезультатными [4]. Отождествить эти линии смогли только после появления теоретических расчетов переходов в атоме водорода в присутствии сильных магнитных полей, которые появились в 1980-х годах [5-7]. Гринстейном [8-9] было установлено, что GRW +70°8247 обладает водородной атмосферой, а магнитное поле составляет 350 МГс. Также было показано, что линия 4135 Å является одной из компонент расщепленной H β , смещенной на почти 700 Å. Эти результаты стимулировали в начале 1990-х годов создание моделей атмосферы для МБК [10].

На данный момент известно более 35 тысяч белых карликов [11], из них несколько сотен [13] МБК с напряженностями полей от нескольких десятков килогаусс до 1 ГГс. Однако из-за малых радиусов этих объектов и наличия БК с низкими температурами, полной можно считать только выборку в объеме радиусом несколько десятков парсек.

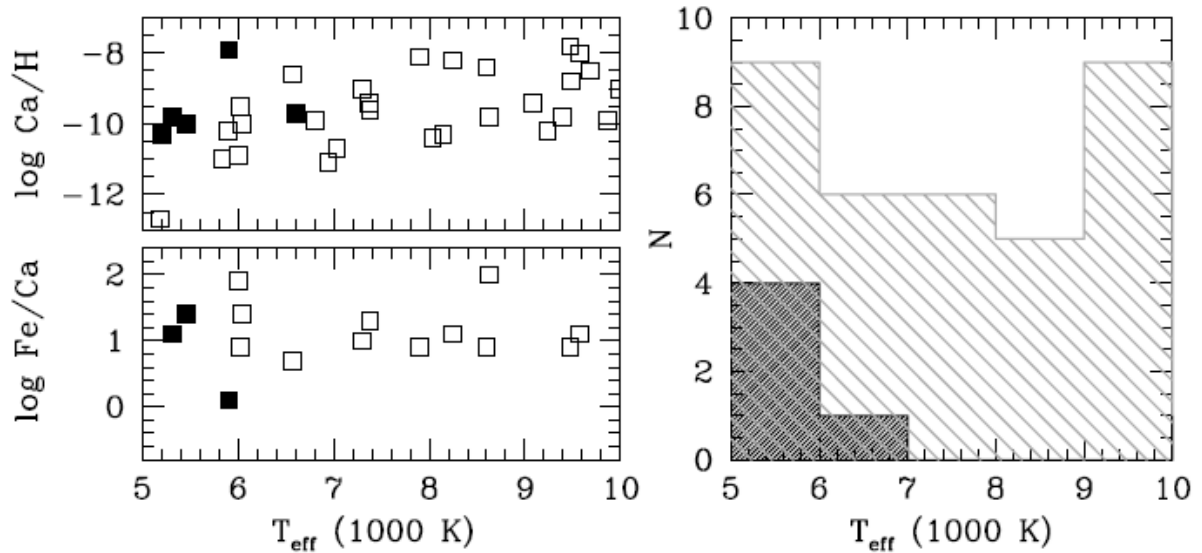


Рисунок 1: Из [35], Слева: множество холодных DAZ БК. Заполненные квадраты представляют собой МБК, а светлые квадраты — немагнитные БК. Справа: эффективное распределение температуры DAZ БК. Магнитные диски DAZ БК окрашены в темно-серый цвет.

1.2. Характеристики магнитных белых карликов

Большинство белых карликов имеет водородную атмосферу (DA), и МБК по большей части также являются представителями этого класса объектов [13-14]. Звезд с гелиевыми атмосферами (DB), с молекулярными линиями в спектрах (DQ) или без линий (DC) значительно меньше [13-15].

Кроме того, магнитные поля встречаются у холодных DAZ белых карликов [16-19], в спектрах которых присутствует загрязнение металлами. Показано [19], что число МБК в этой группе возрастает до 50% при $T_{\text{eff}} < 7000$ K, но при более высоких температурах частота встречаемости таких объектов падает почти до нуля, что показано на Рис. 1. Причем магнитные поля таких объектов сравнительно слабые для МБК и составляют 70–500 кГс.

Крупномасштабные магнитные поля белых карликов имеют, как правило, дипольную симметричную структуру [14]. Однако у белых карликов с полями малой напряженности имеются признаки существования квадрупольных полей

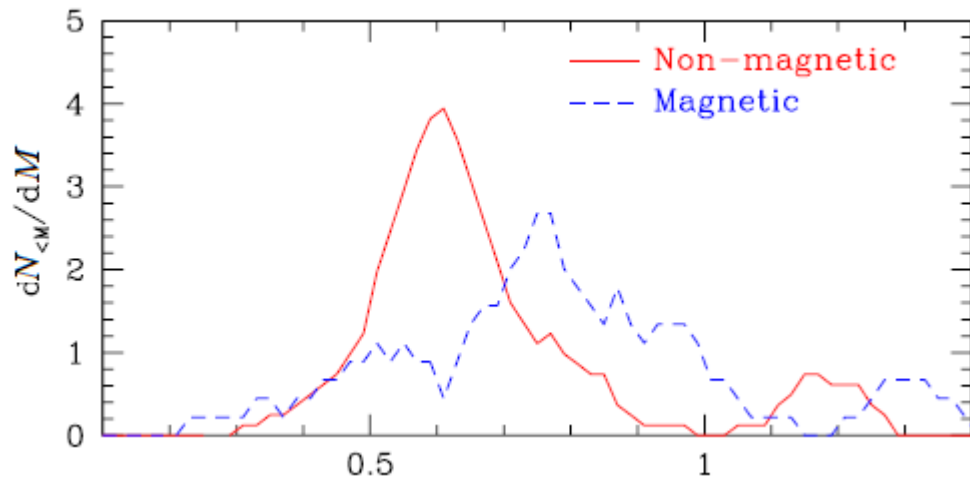


Рисунок 2: Из работы [12]. Сравнение распределения по массам магнитных (штриховая линия) и немагнитных белых карликов (сплошная линия).

[20-21] и иногда пятен [21-23]. Также есть свидетельства наличия сложных магнитных структур у DA [25] и холодных DQ [26] белых карликов.

Распределение по массам демонстрирует, что массы МБК на 20-30% больше, чем у немагнитных белых карликов [12-13, 27-29], что показано на Рис. 2. Кроме того, распределение МБК по массам, основанное на последовательностях эволюционного охлаждения без учета магнитного поля [30], демонстрирует гораздо более широкое или даже бимодальное распределение [13, 24, 28].

По периодам вращения МБК можно разделить на две группы: периоды вращения первой составляют от нескольких часов до нескольких дней, а у звезд второй группы признаки вращения не обнаружены [31] (Рис. 3). Одним из возможных объяснений этого явления может быть то, что звезда видна с полюса, магнитная ось сонаправлена с осью вращения, или звезда имеет медленное вращение из-за магнитного торможения. Или же медленно вращающиеся МБК имеют особое происхождение и являются отдельной эволюционной группой.

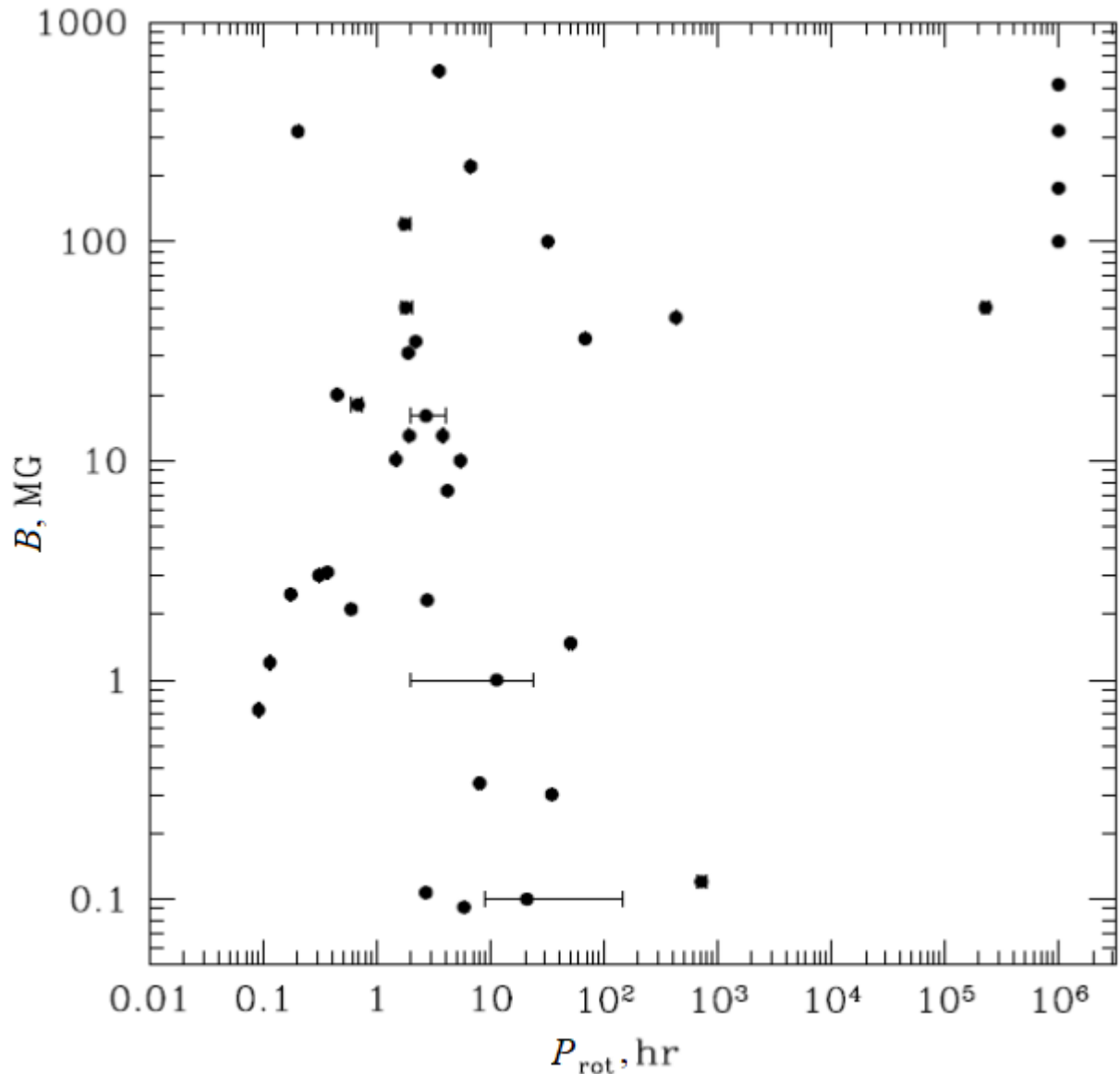


Рисунок 3: Из работы [24]. Зависимость напряженности магнитного поля от периода вращения. Звезды с предполагаемым периодом вращения более 100 лет нанесены на график с периодом 100 лет.

1.3. Происхождение магнитных белых карликов

На ранних этапах исследований считалось, что МБК являются потомками магнитных Ар/Вр-звезд [32], то есть имеют реликтовые магнитные поля. На это указывали несколько свидетельств. Во-первых, характерные напряженности магнитных полей Ар/Вр-звезд составляют 10^2 - 10^4 Гс, их радиусы в 10^2 раз больше радиусов БК, и в предположении, что при сбросе внешней оболочки магнитный

поток сохраняется (формула 1), напряженности полей порядка оказываются 1-100 МГс, что характерно для МБК. Во-вторых, в среднем массы МБК больше, чем массы немагнитных БК. Это можно объяснить тем, что Ар/Вр как предполагаемые звезды-родители МБК имеют массы больше $2 M_{\odot}$.

$$B_{MS} \times R_{MS}^2 = B_{WD} \times R_{WD}^2 \quad (1)$$

Однако есть несколько аргументов против этой гипотезы. Во-первых, это отмеченная в [33] несогласованность частоты рождения магнитных Ар/Вр-звезд с частотой рождения магнитных белых карликов. Попытка объяснить это несоответствие наличием у значительной части Ар/Вр-звезд с массой более $4.5 M_{\odot}$ сравнительно слабых полей (10-100 Гс) [34] не увенчалась успехом из-за «магнитной пустыни» (отсутствие полей слабее 300 Гс).

Во-вторых, среди широких пар, где один из компаньонов — белый карлик, нет ни одной магнитной звезды [35]. Это подтверждается более поздними исследованиями [36], когда была проанализирована большая выборка подобных широких пар (порядка 1700 объектов из обзора SDSS). Однако хорошо известны тесные системы с магнитными белыми карликами — поляры. Это привело к идее, что поля сильнее 1 МГс могут быть, в том числе, результатом эволюции белого карлика в тесной двойной системе [28, 37-38].

В рамках этой гипотезы сложную широкую структуру распределения масс, в которую входят и очень массивные объекты, вплоть до предела Чандрасекара, можно объяснить слиянием двух белых карликов или результатом аккреции. Магнитные поля таких массивных объектов являются очень сильными. Также попытки измерить периоды вращения этих объектов [31] не дали положительных результатов.

Отдельно можно выделить группу DAZ МБК, температуры которых не превосходят 7000 К [39]. В этой же статье высказано предположение о том, что загрязнение металлами и существование магнитного поля могут быть результатом падения на поверхность белого карлика газовой планеты. Ранее такой сценарий был описан [16] для G 77-50. По предположению, планетарная система вокруг этого объекта была выведена из равновесия сближением с другой звездой, и её

компоненты начали падать на поверхность белого карлика. Это могло стать причиной возникновения дифференциального вращения поверхностных слоёв белого карлика, что способствовало появлению небольшого магнитного поля. По расчетам, такие сближения могут происходить с вероятностью 50% каждые 500 млн. лет. Таким образом, чем дольше существует система, тем более вероятен описанный выше исход, что согласуется с данными по температуре, которая является индикатором возраста БК.

1.4. Эволюция магнитных белых карликов

Впервые вопрос о том, растет ли напряженность магнитного поля МБК со временем, был поставлен в [27]. Однако на тот момент (со времени открытия первого МБК прошло всего девять лет) этот результат был спорным. Более поздние исследования [13, 28, 40-42] показали, что рост частоты встречаемости МБК не был эффектом селекции. Таким образом, частота встречаемости МБК непостоянна и зависит от их температуры, то есть от возраста. Она составляет $3.5 \pm 0.5\%$ для горячих МБК ($T_{\text{eff}} > 10\,000\text{ K}$) и возрастает до 15-20% для объектов с $T_{\text{eff}} < 10\,000\text{ K}$ (Рис. 4).

На ранних этапах исследований рост частоты встречаемости МБК объяснялся эволюцией магнитного поля [28]. В работе [28] был рассчитан возраст всех известных на тот момент МБК (Рис. 5). Авторы представили две интерпретации роста напряженности магнитного поля со временем. Во-первых, это увеличение электропроводности белого карлика при постоянной внешней электродвижущей силе. Используя расчеты проводимости [43], авторы рассчитали треки магнитного поля в этом случае (штриховые линии на Рис. 5). Предполагается, что электродвижущая сила существует до момента полной кристаллизации, что составляет около 5 млрд. лет для белого карлика с массой $0.6 M_{\odot}$. Второй сценарий предполагает, что магнитное поле, «запертое» в ядре белого карлика во время коллапса красного гиганта, диффундирует из внутренних областей МБК наружу. Однако этот эффект, скорее всего, не связан с эволюцией

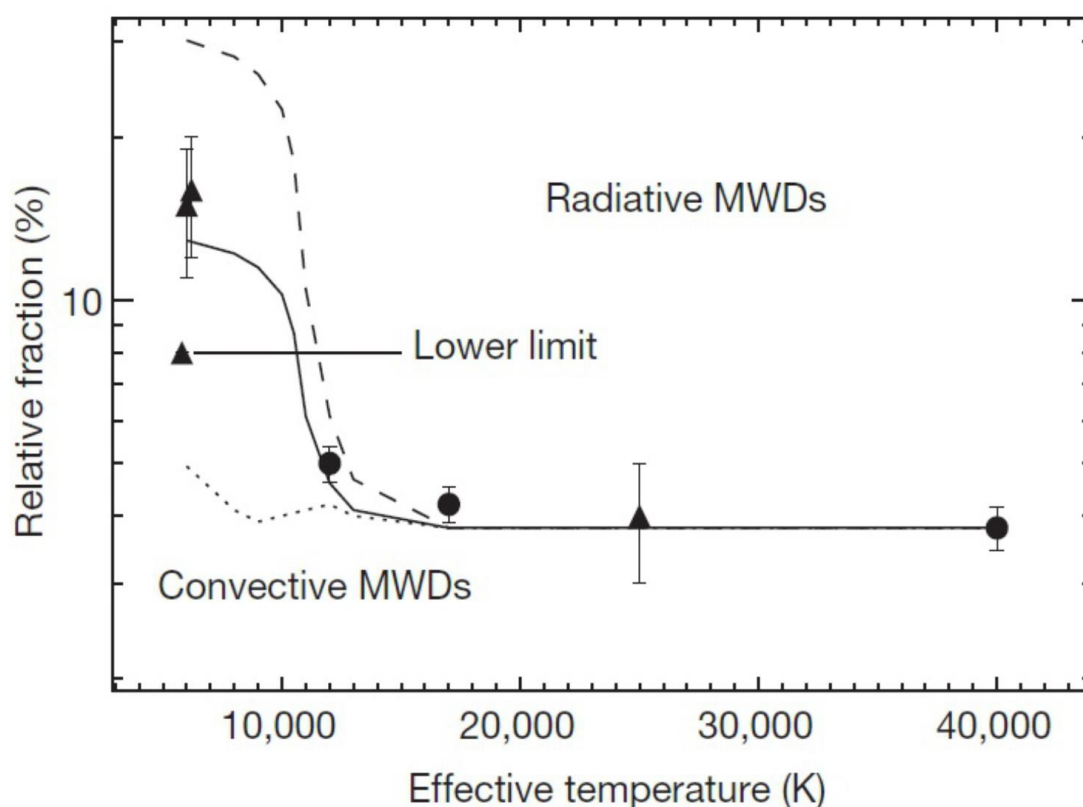


Рисунок 4: Из работы [1]. Зависимость частоты встречаемости МБК от температуры. Закрашенные кружки — это частоты из исследования [13], треугольники — частоты из других исследований [28, 40-41]. Неопределенности получены методом Монте-Карло и взяты из литературы [28, 40-41]. Здесь расчеты, полученные в предположении торможения конвекции только в фотосфере — пунктирная линия, в верхних подфотосферных слоях и фотосфере — сплошная линия и всей конвективной зоны — штриховая линия.

крупномасштабных магнитных полей у белых карликов. Ключом, вероятно, является подавление конвекции в сильномагнитных МБК, что увеличивает время их остывания.

1.5. Замедление остывания магнитных белых карликов

Предположение о глобальном контроле конвекции магнитным полем и

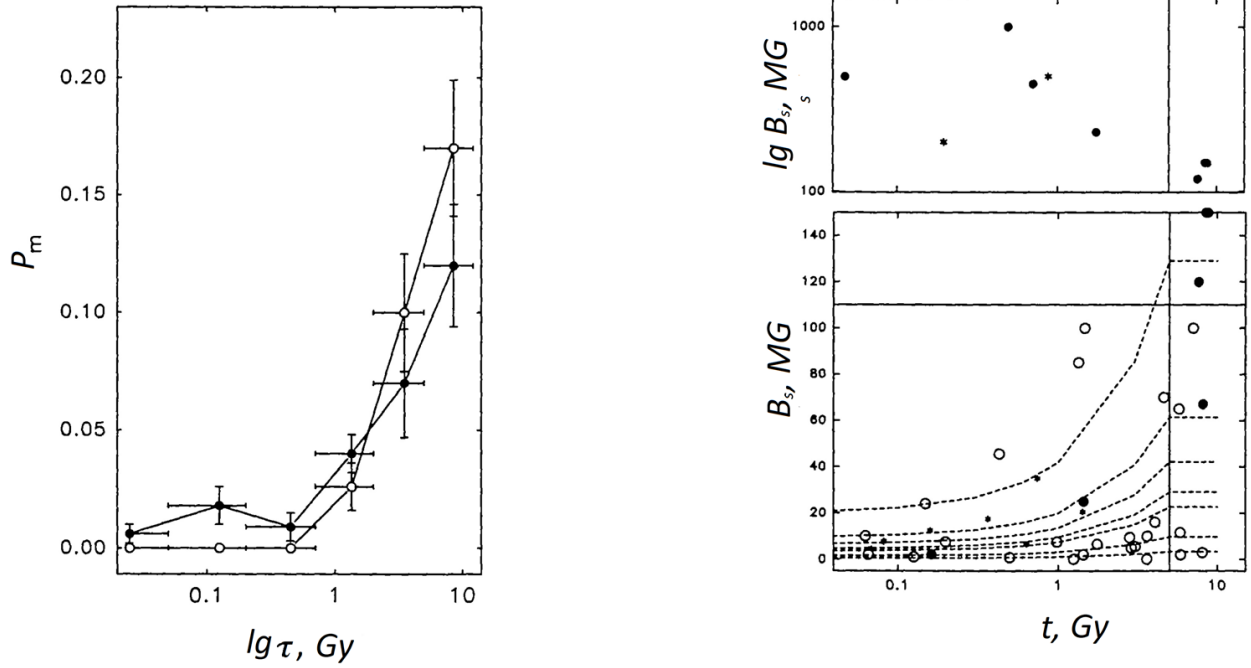


Рисунок 5: Из статьи [28]. Слева: частота встречаемости МБК в зависимости от их возраста для всех звезд с поверхностными магнитными полями более 1 МГс (закрашенные круги) и для самых ближних звезд ($d < 25$ пк, открытые круги). Справа: диаграмма «напряженность поверхностного магнитного поля – возраст» для объектов с величиной магнитного поля более 1 МГс. Закрашенные круги - звезды с массами более $1.1 M_\odot$, пустые круги - звезды меньшей массы, звездочки - белые карлики, массы которых неизвестны (принято значение $M = 0.8 M_\odot$).

связанном с этим изменением в скорости остывания МБК было выдвинуто в [23] на примере исследования WD 1953-011. На поверхности этого объекта Макстедом [22] была обнаружена локальная силовая трубка. Эта и подобные магнитные особенности были позже исследованы рядом авторов [21, 23, 25, 44-45]. Магнитная трубка на WD 1953-011 связана с пятном пониженной яркости на поверхности звезды [23, 45]. Но, если проводить аналогию с солнечными пятнами, то надо предполагать и наличие динамических эффектов, таких как вековые дрейфы этих пятен, и других эффектов, характерных для звезд солнечного типа с магнитной активностью. Однако, в отличие от солнечных пятен, время жизни которых составляет около месяца, пятно на WD 1953-011 является стабильным на протяжении многих лет наблюдений. Так идея о локальном магнитном эффекте

переродилась в предположение о корреляции яркости/поверхностной температуры WD 1953–011 и распределения глобальной напряженности поля [23].

Совместный анализ магнитометрических и фотометрических данных [1] показал, что фотометрическая переменность вызвана неравномерно заторможенной конвекцией, вызванной магнитным полем. Соответственно, было сделано предположение о том, что этот эффект характерен для всех холодных МБК ($T_{\text{eff}} < 10\,000\text{ K}$), конвекция в податмосферном слое которых играет все более заметную роль в теплопередаче по мере остывания звезды. В случае наличия слабых магнитных полей конвекция контролируется не по всей площади МБК, а локально, что вызывает фотометрическую переменность, характер которой не меняется на протяжении многих лет [46]. В случае наличия сильных магнитных полей конвекция контролируется глобально, по всей площади звезды, что приводит к эффективному замедлению отвода тепла от ядра. Таким образом, скорость остывания МБК должна существенно уменьшаться. Это приведет к накоплению сильномагнитных холодных БК и увеличит частоту их встречаемости по сравнению с горячими. Из-за этого эффекта некоторые МБК с сильнейшими магнитными полями и низкими температурами (ниже 5500 K), вероятно, являются старейшими БК в Галактике.

Исследования по торможению конвекции на магнитных БК были так же описаны в [47] на примере слабомагнитного МБК WD 2105–820. В данном случае сравнивались эффективные температуры, полученные по лучистой и конвективной моделям атмосфер в далёком ультрафиолетовом и оптическом диапазонах. Был сделан вывод о том, что лучистая модель атмосферы гораздо лучше описывает атмосферу WD 2105–820, нежели модель с введенным конвективным переносом в податмосферном слое.

Численные оценки напряженности магнитного поля, которое должно полностью контролировать конвекцию, даны в работах [48-49]. В более ранней работе [49] пороговыми значениями указаны поля напряженностью 10-100 МГс. В более поздней работе получено ограничение примерно в 1 МГс. Было проведено сравнение модели с наблюдательными данными и показано, что значительная

часть белых карликов с магнитными полями более 1 МГс старше их немагнитных аналогов примерно на миллиард лет.

Глава 2. Наблюдения МБК в САО РАН

2.1. Введение

Поиск и исследование МБК проводится в САО РАН начиная с 1990-х годов. Целью наблюдений является поиск новых МБК и решение ряда вопросов, связанных с происхождением и эволюцией этих объектов.

Одним таких вопросов является проблема происхождения МБК, напряженности магнитных полей которых превышают десятки килогаусс и более (см., например, [1, 13, 32, 40, 50-53] и др.). В ранних исследованиях предполагалось, что МБК являются конечной стадией эволюции магнитных Ар/Вр-звезд [32]. Однако более поздние исследования показали, что МБК могут быть потомками звезд и других классов [33-34, 40], а также образовываться в результате слияния двух БК [28, 37-38].

Исследования, посвященные эволюции МБК, выявили некоторые ее особенности. Одной из них является увеличение частоты встречаемости этих объектов с возрастом [27-28, 40, 54-55]. В то время как [43, 56] предполагают, что магнитные поля БК должны затухать со временем, наблюдения свидетельствуют об увеличении числа МБК с экстремальными магнитными полями с возрастом.

Для описания этой особенности проводился поиск МБК с поверхностными магнитными полями от десятка мегагаусс и более целым рядом авторов [13, 15, 31, 46, 50-52, 57-60] и др. Основными целями этих поисков являлись оценка частоты встречаемости МБК среди всей популяции известных белых карликов и изучение ее зависимости от других физических характеристик вырожденных звезд, в частности, от их возрастов. Согласно результатам работ [1, 15, 27-28, 40-41, 55], частота встречаемости МБК переменна в зависимости от возраста звезды и демонстрирует значимое увеличение для далеко проэволюционировавших МБК с низкими поверхностными температурами $T_{\text{eff}} < 10\,000$ К. Как было установлено на начальном этапе исследования проблемы эволюции белых карликов с магнитными полями более 1–2 МГс [1], частота встречаемости холодных (старых)

сильномагнитных БК среди всех холодных БК составляет свыше 8%, в то время как доля горячих (молодых) сильномагнитных БК в общем количестве БК тех же температур и возрастов не превышает 4%. Попытки объяснить эту закономерность ростом напряженности магнитного поля с возрастом при участии конвекции [13] не выдерживают критики, поскольку конвекция на белых карликах полностью остановлена мегагауссными (и выше) магнитными полями [1]. Наше объяснение состоит в том, что торможение выноса тепла из недр остывающего МБК замедляет остывание и задерживает его на эволюционной шкале по сравнению со слабомагнитным белым карликом. В результате, по мере охлаждения, в низкотемпературном конце диаграммы распределения белых карликов по температурам (возрастам) количество сильномагнитных БК увеличивается по сравнению с молодыми объектами того же класса. Знание эволюционных треков МБК с разными величинами магнитных полей дает возможность не просто качественно описать явление торможения магнитным полем выноса тепла из недр плазменных самогравитирующих систем, но и в первом приближении развить теорию этого явления с нахождением соответствующих эмпирических поправок из астрофизических наблюдений. Однако из-за недостатка наблюдательных данных статистики известных МБК разных температур для построения эволюционных треков недостаточно. Для успешного решения задачи требуется проведение дополнительных поляризационных наблюдений, связанных с поиском новых МБК.

Другая интригующая особенность состоит в том, что большая часть БК на данный момент вообще не демонстрирует каких-либо магнитных свойств, несмотря на однотипность всех остальных их физических свойств. Эта бимодальность составляет одну из ключевых проблем для понимания такого странного эволюционного различия: либо это физический феномен, либо результат наблюдательной селекции.

Для ответов на поставленные вопросы требуется поиск новых МБК и исследование уже известных с привлечением более точных методов наблюдений. В области слабых магнитных полей с напряженностями поверхностных полей

менее 1 МГц выборка до сих пор скудная и составляет чуть более одного десятка звезд, в то время как выборку объектов с полями свыше 1 МГц в ближайшем солнечном окружении можно считать полной (см., например, [13]).

В первой части этой главы мы приводим полный список БК, исследовавшихся в CAO РАН с конца 1980-х годов, и анализируем выборку на наличие регулярных/глобальных магнитных полей у объектов с положительным детектированием. А также сравниваем эти наблюдения с результатами других авторов для определения времени стабильности магнитосфер этих объектов [61].

Во второй части главы мы приводим результаты поиска новых МБК на фотометре-поляриметре ММРР на телескопе Цейсс-1000, описанные в статьях [61-64]. Для магнитных объектов, которые наблюдались в ходе этой программы и для которых имеются архивные наблюдения круговой поляризации, мы также приводим оценки времени стабильности магнитосферы [61].

2.2. Историческая сводка наблюдений МБК в CAO РАН

Поиск и исследование магнитных полей БК в CAO РАН проводятся начиная с 1990-х годов различными авторами. Результаты этих исследований представлены в работах сотрудников CAO РАН [1, 20-21, 23, 25, 50, 53, 66-69], а также в их совместных работах с зарубежными коллегами [59, 70-74], в которых, в том числе, представлены данные с телескопов ESO и 3.6-м телескопа Канадо-Франко-Гавайской обсерватории CFHT.

При проведении наблюдений на телескопе БТА CAO РАН использовались следующие инструменты:

- 1) водородный магнитометр [75-78];
- 2) основной звездный спектрограф БТА (ОЗСП БТА, [79-81]);
- 3) спектрограф СП-124 с поляризационной приставкой [82-83];
- 4) спектрополяриметр UAGS [84].

При сотрудничестве с зарубежными коллегами применялись спектрополяриметры FORS-I VLT [85], ISIS WHT [72] и ESPaDOnS [86].

Результаты этих исследований приведены в таблице 1. Для каждого объекта дается величина среднеквадратического продольного магнитного поля. Усреднение проводилось по всем измерениям магнитного поля звезды за все время наблюдений по формулам из работы [87].

Звезда считалась магнитной, если среднее значение напряженности ее магнитного поля превышало ошибку измерений в три и более раза (критерий 3σ) или если отдельные части временных рядов наблюдений удовлетворяли этому критерию. Последнее замечание важно, так как из-за несовпадения осей вращения и магнитного поля его продольная компонента может принимать как положительные, так и отрицательные значения, и в итоге приводить к среднему значению, близкому к нулю. Такими объектами являются, например, WD 0009+501, средняя оценка напряженности поля которого за период вращения меняется от -120 кГс до $+50$ кГс, и WD 2047+372 с напряженностью поля порядка 60 кГс. Эти примеры показывают сложность определения параметров магнитного поля у БК с характерными периодами вращения от десятков минут до десятков часов. Необходимое для решения этой задачи временное разрешение могут дать только крупные телескопы, такие как использовавшиеся в настоящей работе БТА и VLT. Ниже рассмотрим все БК с обнаруженными глобальными магнитными полями, а также два БК, у которых магнитное поле обнаруживается спорадически.

2.2.1. WD 0009+501

Магнитное поле этого объекта впервые обнаружили [88] по наблюдениям 1992 года. Период и причина переменности, а также характер магнитного поля тогда определены не были, поэтому для выяснения геометрии и природы магнитного поля данного объекта был проведен мониторинг [20, 68]. В ходе наблюдений, длившихся около пяти лет, получено 97 оценок напряженности магнитного поля [20] и определен период изменения продольного магнитного поля. Он составил восемь часов и был связан с вращением звезды, в ходе которого ее продольное поле изменяется от -120 ± 10 кГс до $+50 \pm 5$ кГс.

Суммарный интервал наблюдений этой звезды (вместе с данными [88]) составляет чуть более десяти лет. В ходе наблюдений данного объекта было установлено, что конфигурация магнитного поля на указанном выше промежутке времени не изменяется, а магнитные особенности, типа пятен у звезд солнечного типа, не показывают никаких признаков миграции.

В рамках настоящей работы мы аппроксимировали полученные данные синусоидой и определили ее амплитуды для разных (разнесенных на годы) участков временного ряда. Используя эти амплитуды и линейную модель возможной вековой эволюции магнитного поля, мы оценили характеристический нижний предел времени этой эволюции: $\tau > 80$ лет. Под характеристическим временем подразумевается изменение напряженности поля в e раз.

2.2.2. WD 1953–011

В работе [52] данный объект был предложен в качестве вероятного кандидата в МБК, однако точность оценки поля $B_e = -15.1 \pm 6.6$ кГс (2.3σ) была недостаточна для утверждения о положительном детектировании магнитного поля. Так же, как и в случае WD 0009+501, для выяснения геометрических свойств и природы магнитного поля этого объекта был проведен мониторинг [1, 21, 23]. Наблюдения проводились в поляриметрической моде на спектрографах UAGS на телескопе БТА САО РАН и FORS-I на телескопе VLT в период с июня 1999 г. по август 2002 г. [21]. В итоге было получено 16 оценок продольного магнитного поля по измерениям в ядре линии $H\alpha$.

Сопоставив все наблюдательные данные, полученные [21-22], и применив линейную модель вековой эволюции, в рамках настоящей работы мы заключили, что нижней оценкой стабильности магнитного поля является $\tau > 100$ лет, а переменность магнитного поля обусловлена вращением звезды. Этот наблюдательный факт ведет к выводу о том, что в данном случае, подобно WD 0009+501, мы также имеем дело с глобальной магнитосферой реликтового происхождения в соответствии с теорией реликтовых полей на БК [43].

2.2.3. WD 2047+372, WD 2359–434

Одними из самых слабомагнитных, известных на данный момент БК, среди рассмотренных нами, являются WD 2047+372 и WD 2359–434. Они были открыты в ходе совместных исследований сотрудников CAO РАН с [72-73]. Эти объекты наблюдались на телескопах VLT, WHT, CFHT и БТА (только WD 2047+372). У каждого обнаружено поле напряженностью в несколько десятков килогаусс, изменяющееся с вращением звезды. Аппроксимируя временные ряды данных наблюдений и применяя линейную модель эволюции магнитного поля, так же как для WD 1953–011, мы получили нижние оценки стабильности: $\tau > 140$ лет для WD 2047+372 и $\tau > 40$ лет для WD 2359–434.

2.2.4. WD 1105–048

У WD 1105–048, как и у обсуждаемого ниже (в разделе 2.2.5) WD 1647+591, по всей видимости, глобальных магнитных полей нет. Однако в ряде измерений наличие магнитного поля надежно зарегистрировано. Остановимся на этом подробнее.

Впервые данные о магнитных свойствах WD 1105–048 представили [51]. Три оценки были получены в CAO РАН [50], но лишь по одной из них, дающей напряженность поля 7–8 кГс, можно было подтвердить его наличие. Кроме того, в работе [59] только одна из четырех оценок демонстрировала поле на уровне 2 кГс. Таким образом, магнитную природу звезды можно считать достоверно установленной. Однако присутствия глобального магнитного поля, стабильного на больших промежутках времени, не обнаружено. Скорее всего, у данного объекта магнитные свойства проявляются спорадически, на небольших временных интервалах. Это можно объяснить тем, что в случае слабого магнитного поля плотность его энергии становится сопоставимой с плотностью кинетической энергии вещества в атмосфере БК. В таких условиях поддержание регулярной

структуры поверхностного поля невозможно (более аргументированные разъяснения см. ниже, в главе 4). Наличие на поверхности WD 1105–048 магнитных структур с напряженностью поля до 10 кГс не вызывает сомнений, но говорить об открытии глобального магнитного поля преждевременно.

2.2.5. WD 1647+591

WD 1647+591 — хорошо изученный БК, принадлежащий к классу ZZ Cet. Исследование магнитных свойств этой звезды впервые провели [89]. В указанной работе лишь несколько оценок магнитного поля этого объекта удовлетворяло критерию 3σ . Среди наблюдений [50] только одно измерение показало значимость на уровне 2.7σ . Таким образом, глобальное магнитное поле у этого объекта не обнаружено. В то же время отдельные положительные оценки магнитного поля позволяют с осторожностью говорить о спорадическом магнитном поле, проявляющемся достаточно редко.

2.2.6. WD 2105–820

Поверхностное магнитное поле WD 2105–820 впервые нашли [90], получив оценку 42 кГс. В работе [70] были опубликованы пять измерений продольного магнитного поля. По наблюдениям, охватывающим временной промежуток чуть более месяца, оно составило от 8 кГс до 11 кГс. В работе [59] были приведены три дополнительных измерения продольного поля, сделанные в разные годы: два из них дают величину поля в 8 кГс, а одно — около 3.5 кГс. Таким образом, случай WD 2105–820 подобен случаю WD 1105–048.

Таблица 1. Среднеквадратичные оценки продольного магнитного поля белых карликов (по литературным данным)

Объект	$\langle B_e \rangle$, кГс	$\sigma(\langle B_e \rangle)$, кГс	Ссылка
Немагнитные			
WD 0034-211	35.0	13.0	[53]
WD 0101+048	0.5	2.2	[53]
WD 0148+467	12.0	7.0	[53]
WD 0227+050	2.6	3.3	[53]
WD 0232+525	11.4	16.0	[67]
WD 0235+064	1.7	5.0	[53]
40 Eri B	0.5	0.6	[71]
WD 0501+527	3.9	2.8	[50]
WD 0509+168	6.2	2.1	[53]
WD 0532+414	2.5	5.0	[53]
WD 0627+299	15.9	13.0	[53]
WD 0644+375	1.9	1.8	[50]
WD 0939+071	3.2	4.5	[53]
WD 0943+441	26.1	19.3	[53]
WD 1019+637	8.3	7.5	[53]
WD 1026+002	5.8	15.2	[53]
WD 1105-048	5.3	2.5	[50]
WD 1134+300	5.8	3.8	[50,53]
WD 1126+185	3.2	10.5	[53]
WD 1425-811	0.5	1.4	[70]
WD 1647+591	5.3	3.1	[50]
WD 1733-544	4.1	4.4	[70]
WD 1756+827	4.2	4.5	[53]
WD 1826-045	2.7	1.5	[70]
WD 1952-206	0.5	1.2	[70]
WD 2032+248	1.9	3.9	[53]
WD 2115-560	0.9	1.0	[70]
WD 2151-015	0.3	0.2	[70]
WD 2333-049	5.1	5.6	[70]

WD 2326+049	0.2	2.4	[53]
WD 2341+322	9.5	10.6	[53]
Магнитные			
WD 0009+501	65.5	14.5	[20]
WD 1953–011	42.4	1.9	[21]
WD 2047+372	9.1	1.6	[72]
WD 2105–820	9.6	0.2	[70]
WD 2359–434	3.6	0.7	[70]

2.3. Поляриметрические наблюдения МБК на ЦЕЙСС-1000

Как уже говорилось выше, за различие частот встречаемости БК с разными параметрами, по нашему мнению, ответственен эффект подавления конвекции сильными поверхностными магнитными полями МБК. Более того, мы считаем, что полученные на настоящий момент оценки частоты встречаемости низкотемпературных далеко проэволюционировавших МБК занижены. Причиной недооценки является тот факт, что белые карлики с температурами менее 6000 К представляют собой, как правило, слабые объекты, с характерными звездными величинами слабее 15^m. Поиск и исследование таких звезд с помощью спектрополяриметрии возможны только при использовании телескопов с апертурами более 1 метра. В этой главе представлены результаты наших поляриметрических наблюдений для поиска новых МБК

2.3.1. Наблюдения

Наблюдения проводились на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН, на фотометре-поляриметре ММРР [63, 91] в режиме круговой поляризации в белом свете (без фильтров). В настоящей модификации прибор является однолучевым; в качестве основного поляризационного элемента используется поляроид,

преобразующий входящий неполяризованный свет в поляризованный на уровне 95% во всем видимом диапазоне. Для наблюдения круговой поляризации перед поляроидом размещается вращающаяся фазовая пластина $\lambda/4$. Чтобы сделать одну оценку круговой поляризации, необходимо получить два последовательных кадра с положением пластины $\lambda/4$ в положении $+45^\circ$ и -45° . Однако в такой конфигурации реальная точность наблюдений круговой поляризации значительно отягощена нестабильностью земной атмосферы на временах, сравнимых с временем получения двух последовательных экспозиций. Для уменьшения влияния флуктуаций атмосферы мы делаем длинные серии парных экспозиций в двух ортогональных положениях четвертьволновой фазовой пластины. Обычно для получения устойчивого результата необходимо сделать 30–40 экспозиций.

Для определения инструментальной звездной величины проводилась апертурная фотометрия. Для связи кадров между собой вычислялась разность звездной величины исследуемого объекта и стандарта нулевой поляризации ($\Delta m = m_{\text{obj,inst}} - m_{\text{stand,inst}}$), которая остается постоянной. Так как для большинства звезд характерны магнитные поля слабее 10^4 Гс, то их проявления в континууме незначительны, поэтому в качестве стандарта можно использовать случайную звезду поля. Для подтверждения того, что излучение стандарта неполяризованное, также высчитывалась поляризация нескольких опорных звезд. Поляризация P вычисляется как отношение суммы и разности интенсивностей, измеренных в двух ортогональных положениях четвертьволновой пластины I_{+45° , I_{-45° по стандартной формуле:

$$P = \frac{(I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ})}{(I_{+45^\circ} + I_{-45^\circ})} \quad (2)$$

Так как интенсивность является экспоненциальной звездной величины ($I \sim e^{cm}$), то нет необходимости вычислять абсолютную звездную величину: так как $m_{\text{obj}} = \Delta m + m_{\text{stand}}$, и стандарт не имеет круговой поляризации, то и звездная величина его при любом положении пластины $\lambda/4$ будет одинаковой, и при делении она сократится.

Редукция данных сводится к стандартным фотометрическим процедурам, которые мы обычно используем в наших исследованиях [92-94] и включает учет

тока смещения и деления на плоские поля. В отличие от предыдущих случаев, вследствие однолучевой конфигурации прибора было необходимо получать две серии плоских полей, по одной для каждого положения пластины $\lambda/4$.

В конечном итоге предельная точность измерения интегральной круговой поляризации составила величину около 0.1%. Формально значения могут получаться и меньше, но в данном исследовании мы не считаем такие точности надежными. Отметим, что указанной величины достаточно для детектирования МБК с магнитным полем от десяти мегагаусс и выше, поскольку подобные звезды имеют круговую поляризацию по спектру значительно больше 0.1%.

Наблюдения проводились в период с февраля 2019 года по сентябрь 2020 года по 6–10 сетов в год длительностью 4–8 ночей в каждом сете. Каждая звезда списка наблюдалась блоками из коротких (порядка десятков секунд) последовательных экспозиций при двух положениях четвертьволновой пластины от 1–2 до 4–5 часов в течение нескольких ночей. Характерные периоды вращения белых карликов находятся в промежутке от нескольких часов до нескольких дней [20-21, 23, 44], и выбор такой стратегии наблюдений позволяет избежать попадания в случайную геометрическую конфигурацию (называемую магнитным кроссовером), в которой в процессе собственного вращения МБК его положительная и отрицательная области компенсируют друг друга, приводя к «нулю» в интегральной проекции на луч зрения.

2.3.2. Стандартизация

Одной из целей данной работы был поиск новых магнитных белых карликов. Для этого были проведены широкополосные фотометрические наблюдения. Однако подобные наблюдения на базе САО РАН ранее не проводились. Соответственно, возможности прибора MMPP в режиме круговой поляризации на начало наблюдений не были протестированы. Возможности для тестов были также ограничены тем, что на данный момент не существует стандартов круговой поляризации. Кроме того открытие магнитных белых карликов как отдельного

вида объектов и их изучение началось сравнительно недавно, в 1970 году [2]. Исследования еще осложнялись тем, что белые карлики имеют размеры, сопоставимые с размерами Земли, что существенно снижает количество света, приходящее от них. Таким образом, количество известных магнитных белых карликов, скорее всего, недооценено, а объектов с известной круговой поляризацией — исчезающе мало.

Для изучения возможностей фотометра-поляриметра MMPP были отобраны несколько известных магнитных белых карликов: GRW +70°8247, WD 1312+098, WD 1748+708 и WD 1309+853. Эти объекты обладают экстремально сильными (более 100 МГц) магнитными полями. Для некоторых из них известны оценки круговой поляризации полученные, в разные годы. Таким образом, измеряя круговую поляризацию этих объектов и сопоставляя наши измерения с известными, мы можем, во-первых, показать, что наш метод определения кандидатов в белые карлики с экстремально сильными магнитными полями является адекватным и, во-вторых, изучить изменения круговой поляризации, что может свидетельствовать об изменениях магнитного поля на периодах порядка нескольких десятков лет.

Описанные выше известные МБК представляют интерес по разным причинам. Так, GRW +70°8247 имеет стабильную круговую поляризацию на протяжении 50 лет наблюдений, высокое склонение и большую яркость, что позволяет использовать его как стандарт круговой поляризации при наблюдениях в CAO РАН. WD 1312+098 имеет прописанную кривую круговой поляризации, и это позволило нам оценить точность нашего метода. WD 1748+708 имеет известную величину круговой поляризации и находится в интересующем нас температурном диапазоне. Для WD 1309+853 автор не нашел опубликованных оценок круговой поляризации в широких фильтрах, но этот объект находится в интересующем нас температурном диапазоне, что позволяет оценить возможности нашего метода в приложении к известному МБК.

Далее приведем оценки времени стабильности для выбранных нами звезд-стандартов с известными из литературных источников величинами круговой

поляризации.

2.3.2.1. GRW +70°8247

Данный белый карлик имеет водородную атмосферу (DA), эффективную температуру порядка 11517 ± 460 К градусов, массу $0.90 \pm 0.03 M_{\odot}$ [95]. Его магнитное поле было открыто Кемпом в 1970 году [2]. Им были проведены наблюдения круговой поляризации на 24-дюймовом телескопе Pine Mountain и 36-дюймовом телескопе Kitt Peak. По его наблюдениям, круговая поляризация составила от 1% до 3% в диапазоне от 3000 до 7000 Å (Рис. 6). Первая оценка напряженности поля составила $(1.2-0.3) \times 10^7$ Гс. Однако последующие исследования с использованием расчетов переходов в магнитном поле дали оценку напряженности поля порядка 350 МГс [8-9].

Более детальное спектральное распределение круговой и линейной поляризации было получено Ланстритом [96] по результатам наблюдений на 5-м телескопе Хейла. По наблюдениям линейной поляризации и литературным данным [97-98] было показано, что есть один из двух вариантов: либо ось вращения сонаправлена с осью магнитного поля, либо период вращения GRW +70°8247 составляет более 100 лет. Эти два варианта также приведены в работе [99] (Рис. 7), в которой были представлены результаты повторных поляризационных измерений, в том числе в полосе В. Результаты хорошо согласовывались с предыдущими исследованиями Ландстрита, в частности, за почти 15 лет позиционный угол не претерпел значительных изменений.

Кроме того, было получено подтверждение того факта, что значение круговой поляризации (примерно 3%) в оптическом диапазоне остается стабильным на протяжении почти всех 50 лет наблюдений этого объекта [2, 62, 96-99]. Это хорошо согласуется с нашими данными: $V = 3.18 \pm 0.02\%$.

Для определения характерного времени эволюции магнитного поля GRW +70°8247 мы сравнили наши данные с описанным в работе [96] распределением круговой поляризации по спектру этой звезды, свернутому с зависимостью

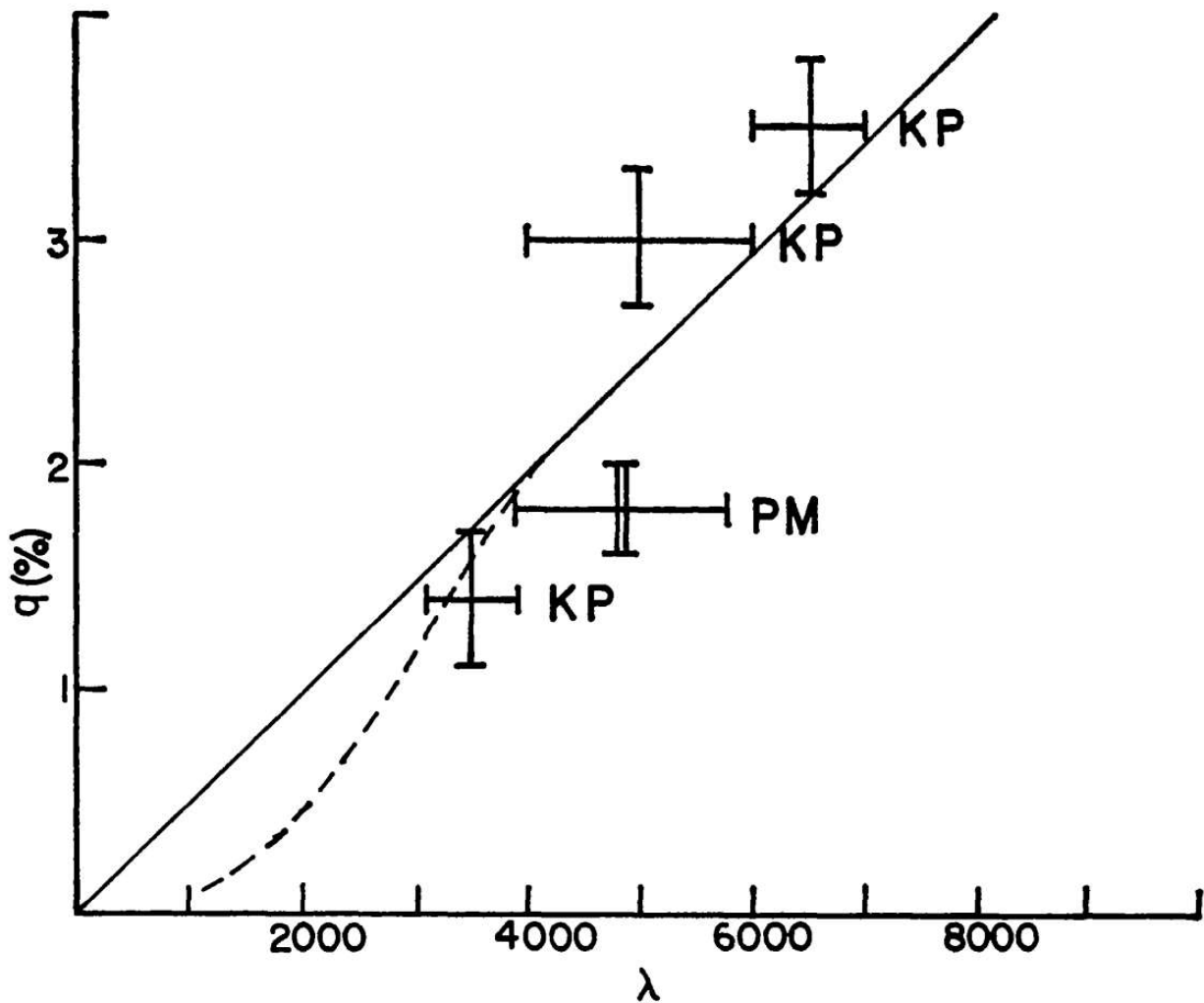


Рисунок 6: Из работы [2]. Зависимость круговой поляризации от длины волны. КР и РМ - наблюдения Kitt Peak и Pine Mountain соответственно.

квантовой эффективности используемого ПЗС-приемника [91] от длины волны. Проведя линейную аппроксимацию значений поляризации по точкам, разнесенным на шкале порядка 50 лет, мы не обнаружили значимых вариаций круговой поляризации. Справедливо предположить, что магнитные свойства этой звезды остаются стабильными на протяжении $\tau \gg 100$ лет.

Чрезвычайно долгое время эволюции также подтверждается тем фактом, что результаты наблюдений круговой поляризации в различных фильтрах (B , V), приведенные [100-101], совпадают в пределах ошибок.

Стабильность круговой поляризации во времени этого яркого (13^m) объекта,

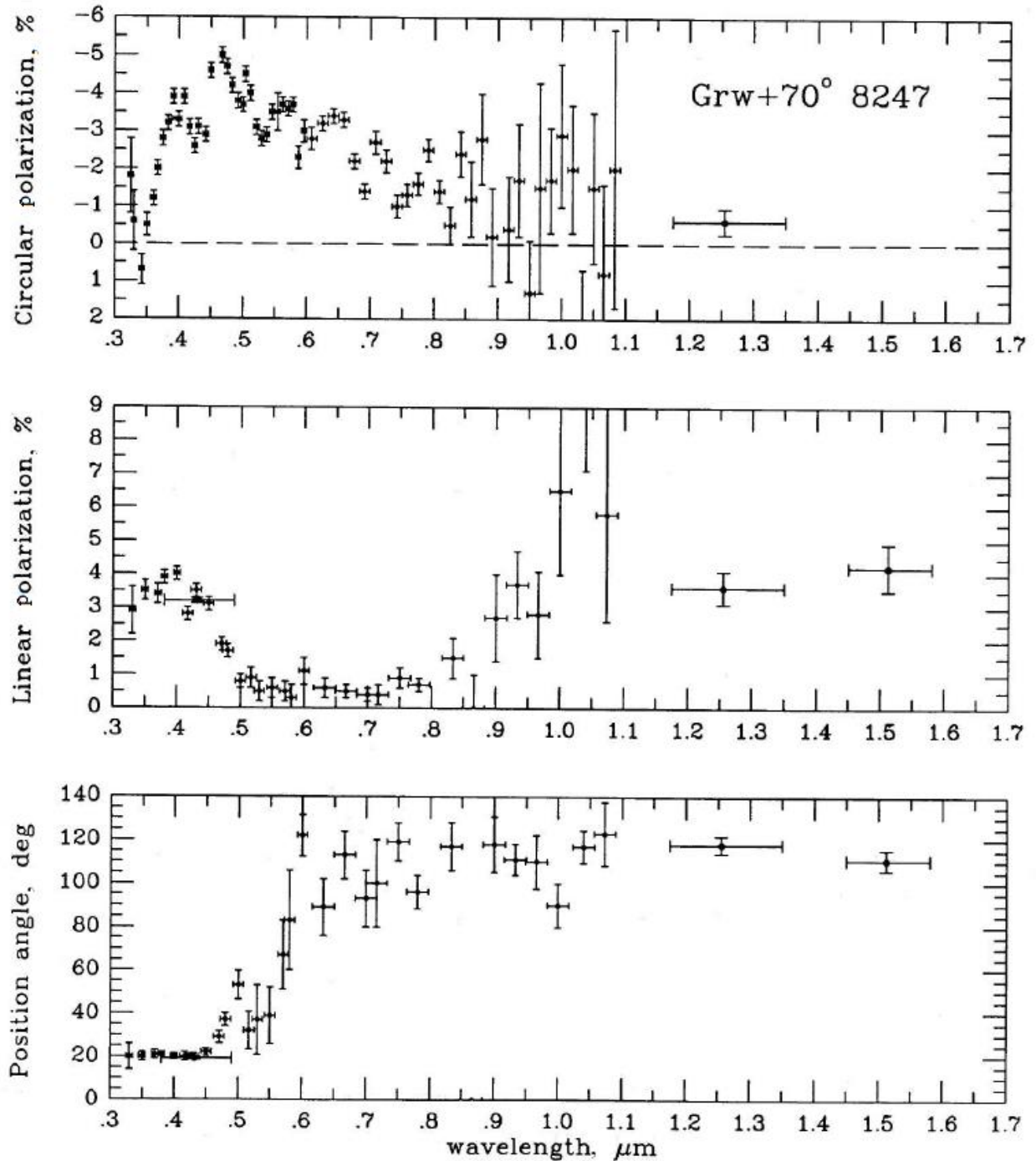


Рисунок 7: Из работы [99]. Представлены свернутые данные из [96] и из [99]. Данные показывают хорошее согласование линейной поляризации и позиционного угла в полосе B на временах порядка 15 лет.

а также его большое склонение (более 70° , объект незаходящий на Северном Кавказе) делает его очень привлекательным в плане стандартизации поляриметрических наблюдений в CAO РАН.

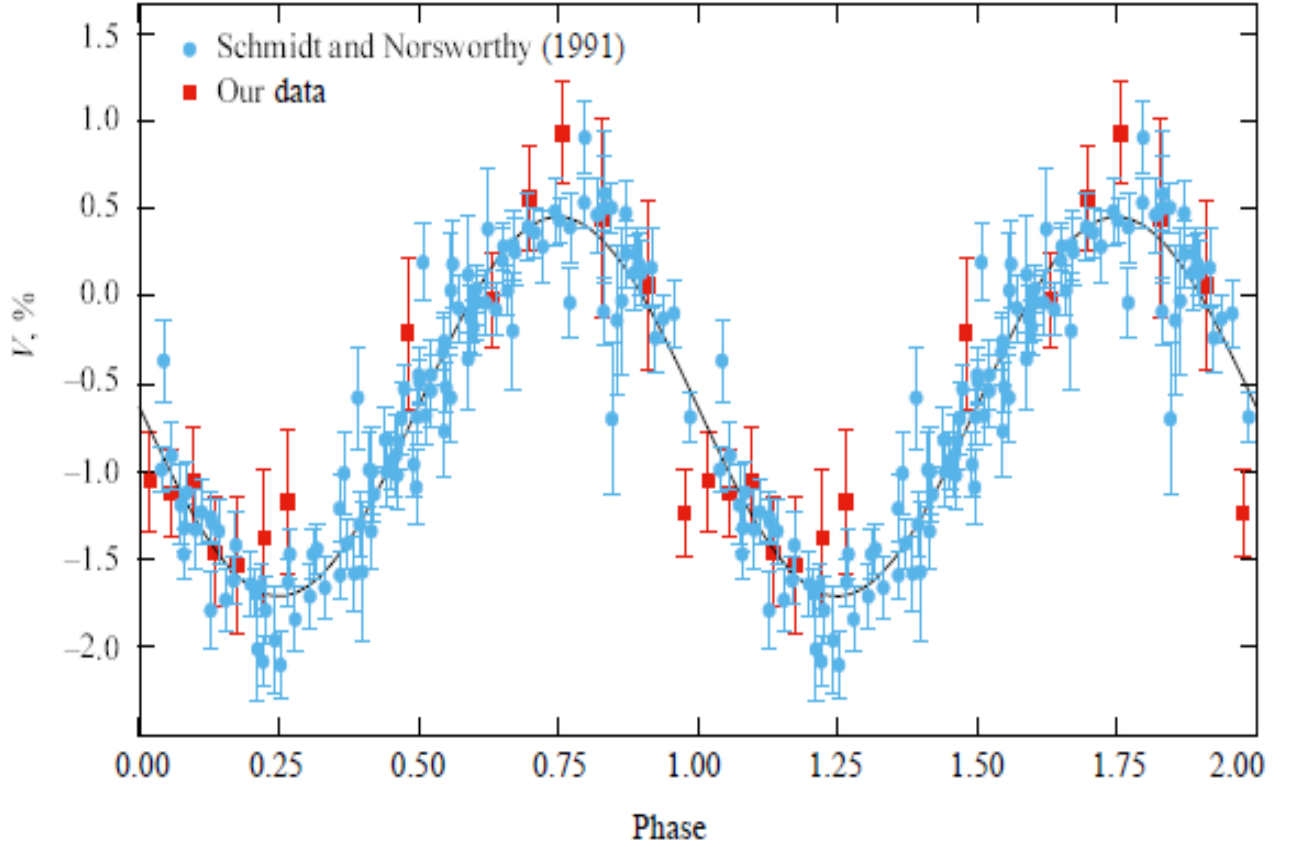


Рисунок 8: Фазовая кривая WD 1312+098: красные квадраты — наши данные, синие квадраты — данные из [31], черная линия — аппроксимация по данным [31].

2.3.2.2. WD 1312+098

Данный объект имеет водородную атмосферу (DA), эффективную температуру порядка 20 000 К [102]. Величина его магнитного поля оценивается в 10 МГс. Кроме того, хорошо известна кривая изменения круговой поляризации этого объекта подробно исследована Шмидтом [31] в период с 1979 по 1989 гг. Спектральные наблюдения выполнялись на 4-м телескопе Kitt Peak. Была обнаружена значительная переменность. В той же работе приводится аппроксимация наблюдательных данных, описываемая формулой

$$V = \langle V \rangle + K_V \sin(2\pi(T - T_0)/P), \quad (3)$$

где период $P = 5.428394 \pm 0.000012$ часа, $T_0 = 2444014.76$ JD, $K_V = 1.08 \pm 0.05\%$, $\langle V \rangle = -0.63 \pm 0.04\%$.

Наши данные хорошо согласуются с этой зависимостью, что отображено на

Рис. 8. На нем красными точками отмечены наши современные данные, синими — данные Шмидта, черная линия — аппроксимация, описанная выше. Так же, как и для WD 0009+501, мы провели аппроксимацию синусоидой отдельных частей временного ряда, отстоящих друг от друга на годы. Затем полученные амплитуды аппроксимировались линейно. Нижняя оценка времени стабильности магнитного поля составила величину $\tau \gg 100$ лет.

2.3.2.3. WD1748+708

Данный объект имеет класс DC. Его эффективная температура составляет 5560 ± 107 К, а масса $0.81 \pm 0.01 M_{\odot}$ [95].

Его магнитные свойства известны достаточно давно, магнитное поле превосходит 100 МГс и выявлено по присутствию линейной поляризации [103]. Измерения круговой поляризации впервые были проведены в той же работе и составили -0.5% в голубой и +0.7% красной области спектра. Позднее подобные наблюдения проводились в Крымской обсерватории [57]. Это показано на Рис. 9. В этом исследовании [57], проводимом в фильтре V величина круговой поляризации составила -0.5%.

2.3.2.4. WD 1309+853

Это водородный (DA) белый карлик. Эффективная температура составляет $5440.0 \pm (98)$ К, масса $0.71 \pm 0.02 M_{\odot}$ [95]. Величина магнитного поля составляет около 4.9 МГс.

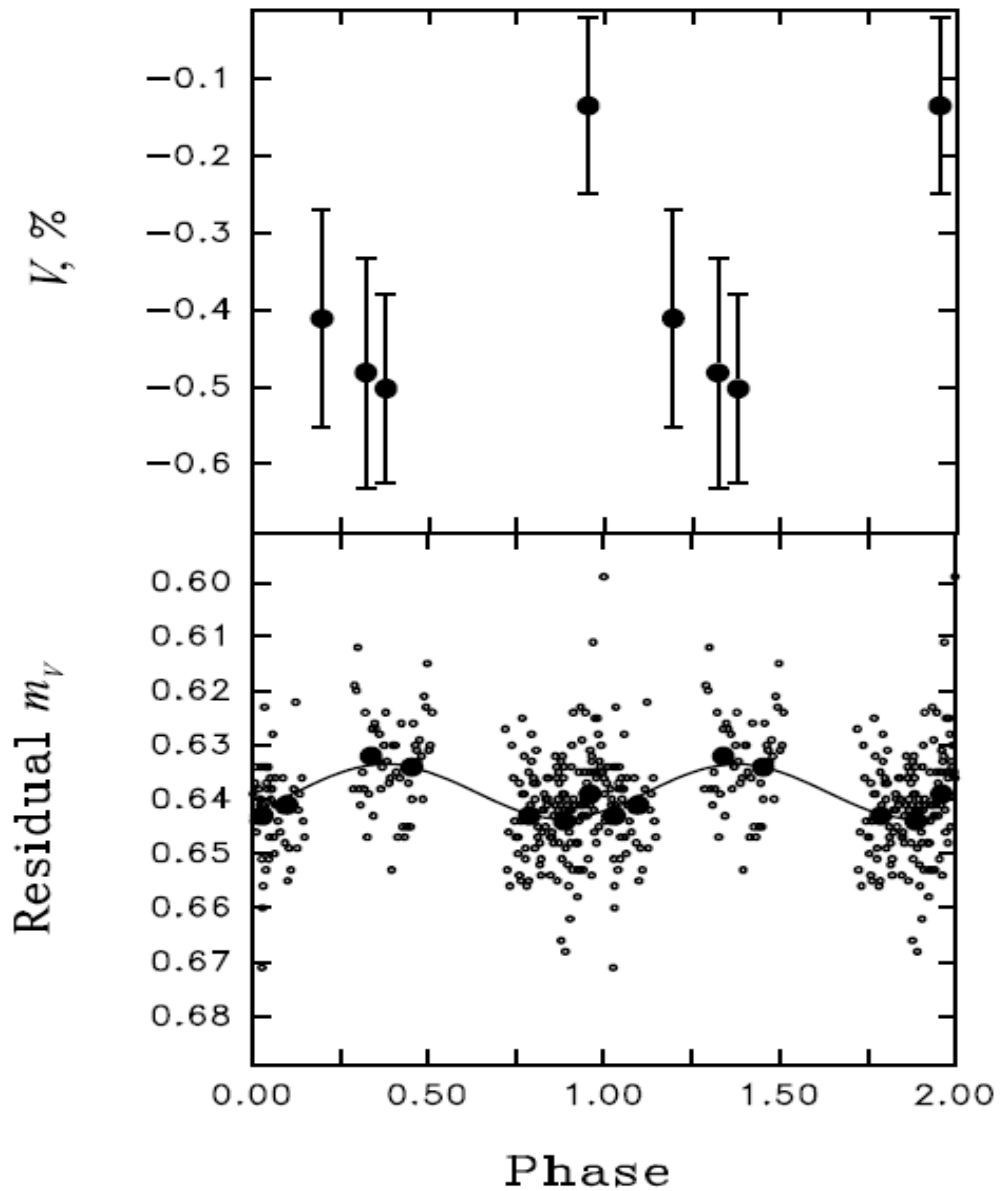


Рисунок 9: Из работы [57]. Периодические изменения круговой поляризации (верхняя панель) и потока (нижняя панель) в фильтре V от WD 1748+708 в зависимости от фазы переменности с возможным периодом 8.3 часа. Черные кружки на нижней панели соответствуют результатам усреднений данных фотометрических наблюдений в бинах шириной 0.1 фазы. Бары ошибок усреднений не превышают размеры радиусов кружков. Сплошная линия на нижней панели — результат аппроксимации данных синусоидой.

2.3.3. Выбор объектов для наблюдений

В исследуемую выборку были включены белые карлики, находящиеся на расстояниях до 25 пк от Солнца [95]. Всего в списке около 240 объектов. Мы выбрали несколько десятков наиболее холодных звезд этого класса из еще непроверенных на наличие у них магнитных полей. Целевые объекты и их параметры представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры измеряемых объектов

Объект	Масса, $M_{\odot}$	Температура, К	Класс
WD 1532+129	0.53(0.00)	6000(400)	DZ
WD 1257+037	0.71(0.06)	5616(100)	DA
WD 1633+572	0.57(0.04)	5958(116)	DQ
LSR J2059 + 5517	0.58(0.00)	4530(59)	DC
WD 1814 + 134	0.68(0.02)	5251(155)	DA
WD 2215 + 388	0.58(0.00)	4993(192)	DC
LP 240 – 30	0.58(0.00)	4890(435)	DC
WD 2307 + 548	0.59(0.00)	5700(86)	DA
WD 2322 + 137	0.35(0.04)	5179(71)	DA
WD 0123 + 732	0.66(0.06)	7400(11)	DA
WD 2248 + 293	0.36(0.08)	5592(98)	DA
WD 2347 + 292	0.50(0.08)	5805(110)	DA
WD 0245 + 541	0.73(0.03)	5139(82)	DA
WD 0749 + 426	0.58(0.00)	4585(74)	DC
WD 0840 – 136	0.57(0.00)	4874(177)	DZ

2.4. Результаты

В течение трех последних десятилетий в CAO РАН проводилось исследование МБК с целью изучения стабильности их глобальных магнитных полей. Нижние пределы времен эволюции глобальных магнитных полей

рассчитаны для шести объектов выборки: WD 0009+501, WD 1953–011, WD 2047+372, WD 2359–434, GRW +70°8247 и WD 1312+098 (приведены в таблице 3). На временах от нескольких десятков — для WD 2359–434 — до сотен лет и более — для GRW +70°8247, WD 1312+098 — магнитосферы этих звезд остаются стабильными. Данные результаты подтверждают гипотезу о реликтовом происхождении и медленном вырождении магнитных полей БК [43]. Это роднит БК с магнитными Ap/Bp-звездами, у которых магнитные свойства также сохраняются на протяжении десятков и более лет [104] и которые являются возможным классом-прародителем МБК.

Факт стабильности магнитных свойств БК позволяет нам использовать эти звезды в качестве стандартов круговой поляризации. Вплоть до настоящего времени в астрофизике не проводились систематические исследования в направлении формирования списка стандартов круговой поляризации, и данная работа является основанием для создания на базе CAO РАН обзора стандартов круговой поляризации.

Таблица 3. Времена стабильности магнитосфер МБК

Объект	Нижняя оценка стабильности, годы
WD 0009+501	80
WD 1953-011	100
WD 2047+372	140
WD 2359-434	40
GRW +70°8247	>>100
WD 1312+098	>>100

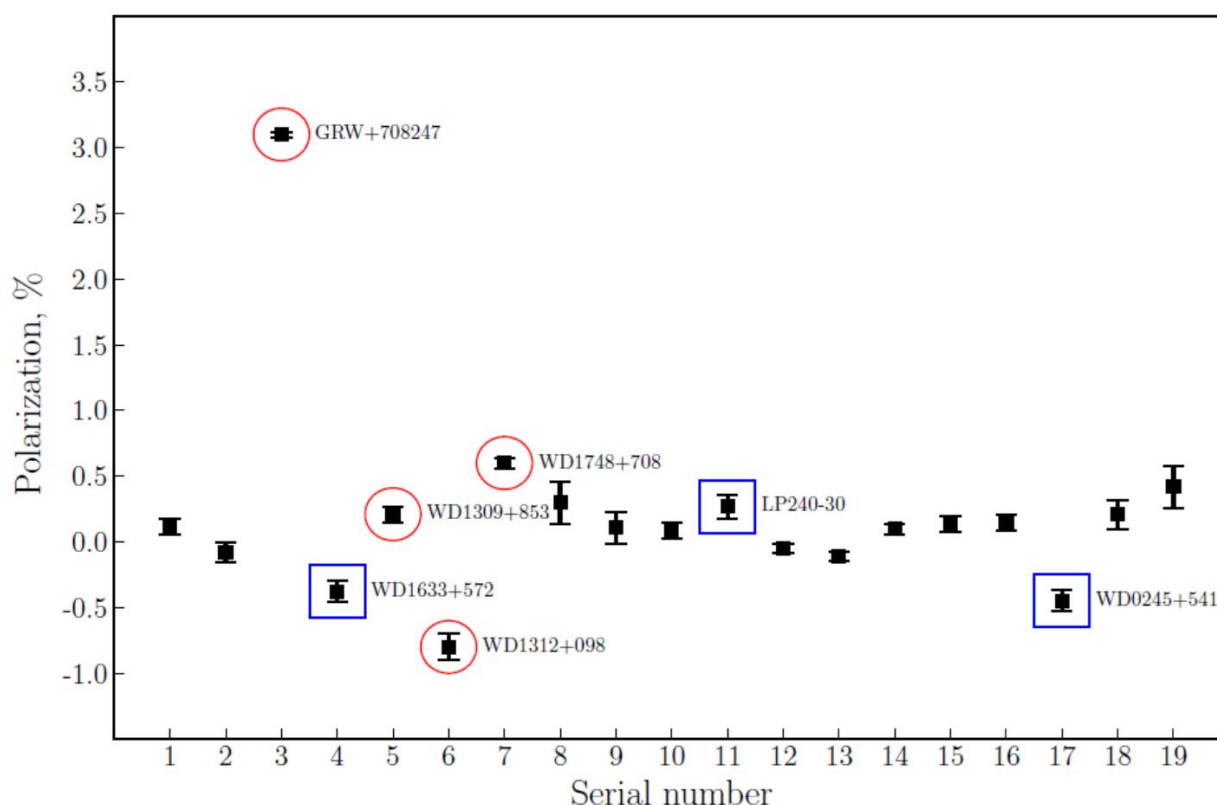


Рисунок 10: Значения средней по всем наблюдениям круговой поляризации для всех звезд списка. По оси абсцисс — порядковый номер звезды из таблицы 4. Окружностями отмечены магнитные звезды, которые мы использовали в качестве стандартов. Новые положительные детектирования обведены квадратами.

Здесь мы также приводим результаты наблюдений 19 белых карликов, включая данные для четырех известных МБК. Целевые, представленные в данной главе, белые карлики с температурами менее 7000 К выбирались в области на расстоянии в пределах 25 пк от Солнца. Это 15 звезд. Наблюдения четырех известных магнитных белых карликов: GRW +70°8247 [2, 97-99], WD 1309+853 [95], WD 1312+098 [31], WD 1748+708 [57] были проведены для стандартизации и проверки возможностей нового прибора (ММРР) и показали значимую поляризацию ожидаемой величины (см. Рис. 10). Результаты также практически совпадают (с точностью до исследуемого диапазона по длинам волн) с недавними подобными наблюдениями группы Бердюгина [101], что является иллюстрацией

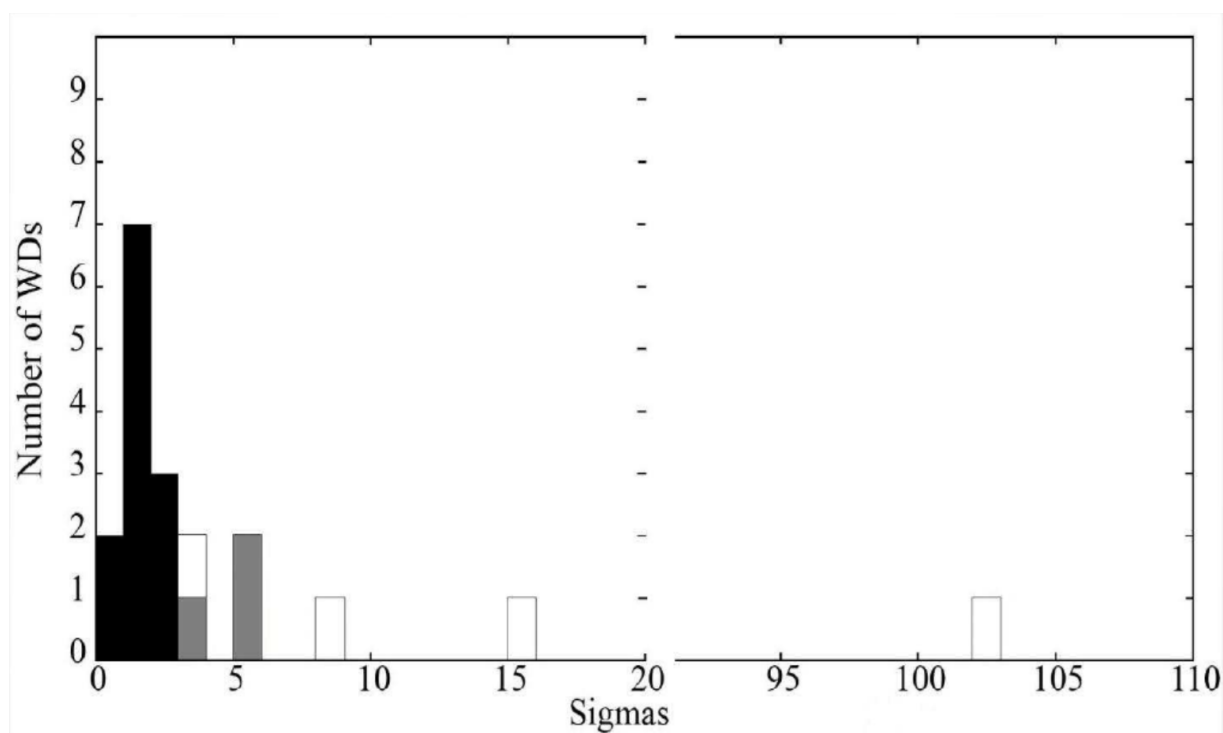


Рисунок 11: Гистограмма количества объектов списка в зависимости от полученного для них значения амплитуды круговой поляризации, нормированной на неточность измерений, «Sigmas». Черные столбцы иллюстрируют нулевой результат. Серые столбцы — положительные детектирования, превышающие пороговое значение 3σ . Белые столбцы — известные МБК.

пригодности используемого нами инструмента для решения поставленной задачи. В основном для стандартизации мы наблюдали GRW +70°8247, так как это достаточно яркий (13^m) объект, его характерная круговая поляризация составляет порядка 3%, а также потому, что для широты CAO РАН (примерно 43°) он является незаходящим.

При рассмотрении результатов, представленных в таблице 4, можно сделать вывод о том, что для большинства исследуемых звезд нет значимых детектирований. Между тем, среди 15 целевых объектов были выявлены три новых кандидата в магнитные белые карлики (обведены квадратики на Рис. 10) со значениями круговой поляризации $0.27 \pm 0.09\%$ у LP 240–30, $-0.38 \pm 0.08\%$ у WD 1633+572 и $-0.45 \pm 0.08\%$ у WD0245+541. На гистограмме (Рис. 11) значимость оценок уровня их круговой поляризации обозначена столбцами серого цвета.

Приведенные результаты следует рассматривать как отборочные для выявления кандидатов в МБК и проведения подтверждающих спектрополяриметрических наблюдений на 6-м телескопе САО РАН. То есть те объекты, которые показали наличие круговой поляризации на уровне более 3σ , пока не рассматриваются как положительные детектирования новых МБК.

Таблица 4. Результаты наблюдений круговой поляризации на телескопе Цейсс-1000 на фотометре-поляриметре ММРР

№	Объект	JD	Экспозиция, часы	P	σ
1	WD 1532 + 129	2458624.41	5.2	0.0009	0.0008
		2458917.48	1.9	0.0101	0.0016
		2458981.39	1.9	-0.0006	0.0014
		2459007.36	1.9	-0.0031	0.0014
		Σ		0.0012	0.0006
2	WD 1257+037	2458626.27	1.0	0.0064	0.0012
		2458980.48	1.4	-0.0115	0.0037
		2458981.28	2.1	-0.0045	0.0014
		2458983.27	1.0	-0.0102	0.0029
		2458984.36	2.2	-0.0065	0.0021
		Σ		-0.0008	0.0008
3	GRW + 70°8247	2458627.50	0.6	0.0315	0.0006
		2458711.43	0.6	0.0308	0.0007
		2458771.18	0.6	0.0315	0.0009
		2458772.17	0.9	0.0345	0.0006
		2458833.12	0.3	0.0271	0.0008
		2458981.53	0.5	0.0284	0.0007
		2459007.50	0.6	0.0306	0.0006
		2459008.51	0.6	0.0306	0.0006
		2459091.38	1.24	0.0326	0.0003
		2459096.22	1.25	0.0314	0.0005
		2459888.36	1.41	0.0345	0.0007

		2459890.16	1.88	0.0320	0.0005
		2459920.18	1.81	0.0354	0.001
		2459921.37	1.89	0.0319	0.0014
		Σ	0.0318	0.0002	
4	WD 1633 + 572	2458627.45	1.7	0.0017	0.0021
		2458917.57	1.8	-0.0049	0.0019
		2458921.58	1.6	-0.0036	0.0022
		2458948.53	2.0	-0.0022	0.0038
		2458949.49	4.1	-0.0015	0.0022
		2451091.48	3.5	-0.0122	0.0023
		2451093.29	2.7	-0.0016	0.0021
		2451094.24	1.8	-0.0055	0.0018
		Σ	-0.0038	0.0008	
5	WD 1309 + 853	2458627.35	2.4	0.0023	0.0008
		2459006.39	2.4	0.0134	0.0032
		2459009.46	2.4	0.0017	0.0013
		2459011.32	1.9	-0.0031	0.0021
		Σ	0.0021	0.0006	
6	WD 1312 + 098	2458598.38	2.8	-0.0092	0.0012
		2458597.44	3.9	-0.0047	0.002
		2459008.37	1.9	-0.0011	0.0042
		2459009.31	1.9	-0.0101	0.0023
		Σ		-0.008	0.001
7	WD 1748 + 708	2458685.49	1.7	-0.0087	0.0009
		2458981.47	1.9	0.0139	0.0006
		2458984.45	1.9	0.0111	0.0017
		2459006.48	1.0	-0.0021	0.0012
		Σ	0.0060	0.0004	
8	LSR J2059 + 5517	2458710.38	3.4	0.0053	0.0019
		2458711.49	2.3	-0.0028	0.0033
		2459008.45	1.9	-0.0372	0.0200
		Σ	0.003	0.0016	
9	WD 1814 + 134	2458710.26	1.5	0.0021	0.0018

		2458711.26	1.0	0.0015	0.0021
		2459007.46	1.9	-0.0009	0.0022
		Σ	0.0011	0.0012	
10	WD 2215+388	2458711.37	2.2	-0.0012	0.0026
		2458771.25	1.9	0.0008	0.0009
		2458772.24	1.9	-0.006	0.0033
		2458773.54	1.9	0.0016	0.0008
		Σ	0.0009	0.0006	
11	LP 240 – 30	2458771.47	1.9	0.0029	0.0016
		2458772.55	2.4	0.0037	0.0025
		2458773.54	2.8	0.0081	0.0025
		2459092.376	2.4	0.0012	0.0019
		2459095.413	1.9	-0.0004	0.003
		2459096.432	1.9	-0.0001	0.003
		Σ	0.0027	0.0009	
12	WD 2307 + 548	2458771.31	1.0	-0.0011	0.0008
		2458772.33	1.9	-0.0002	0.0007
		2458773.29	1.8	-0.0003	0.0007
		Σ	-0.0005	0.0004	
13	WD 2322 + 137	2458771.38	1.9	-0.0035	0.0011
		2458772.45	1.9	-0.0019	0.0011
		2458773.43	1.9	-0.0022	0.0009
		2459108.407	2.6	0.0004	0.0006
		Σ	-0.0011	0.0004	
14	WD 0123 + 732	2458774.37	2.1	0.0038	0.0006
		2458829.45	2.0	-0.0009	0.0006
		2458830.48	1.5	0.0000	0.0006
		Σ	0.0010	0.0004	
15	WD 2248 + 293	2458774.19	1.9	0.0012	0.0033
		2458775.30	1.9	0.0004	0.0018
		2458829.16	1.9	0.0014	0.0021
		2458830.16	1.9	0.0022	0.0015
		Σ	0.0014	0.0009	

16	WD 2347 + 292	2458774.27	1.9	-0.0006	0.0008
		2458829.25	2.0	0.0000	0.0013
		2458830.24	1.9	-0.0049	0.0012
		Σ	-0.0015	0.0006	
17	WD 0245 + 541	2458771.55	1.4	-0.0005	0.0022
		2458829.34	2.1	-0.0069	0.0020
		2458830.33	1.9	-0.0068	0.0019
		2459093.497	2.9	-0.0029	0.0020
		2459094.503	3.1	-0.0041	0.0019
		2459095.519	2.9	-0.0043	0.0039
		2459096.526	2.3	-0.0047	0.0018
		Σ	-0.0045	0.0008	
18	WD 0749 + 426	2458829.54	1.9	0.0223	0.0056
		2458830.56	1.9	-0.0078	0.0058
		2458916.30	4.9	-0.0009	0.005
		2458917.28	5.1	-0.0027	0.0054
		2458922.31	2.6	0.0047	0.0025
		2458948.31	5.0	-0.0009	0.0026
		2458949.29	4.7	0.0036	0.0018
		2458950.31	5.2	-0.007	0.0042
		Σ	0.0021	0.0011	
19	WD 0840 – 136	2458829.62	1.4	0.0043	0.0019
		2458830.62	0.8	0.0040	0.0029
		Σ	0.0042	0.0016	

Положение, выносимое на защиту:

С использованием впервые полученных поляризационных наблюдательных данных, 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.

Глава 3. Моделирование функции светимости магнитных белых карликов

3.1. Введение

Одной из наблюдаемых особенностей эволюции МБК является упомянутое ранее увеличение частоты их встречаемости с возрастом [27-28, 40, 54-55], несмотря на то, что, согласно теории [43, 56], магнитное поле с возрастом должно затухать. Этому явлению есть несколько объяснений.

Один из наиболее обсуждаемых на сегодняшний день механизмов заключается в том, что в процессе теплового остывания белого карлика его магнитное поле начинает расти вследствие проявления эффекта динамо в фазе роста кристаллического ядра звезды [15]. Эта идея, вероятно, имеет право на существование, но есть две проблемы, которые, на наш взгляд, совместно неразрешимы. Первая проблема состоит в том, что, по нашему мнению, энергии кристаллизации ядра БК недостаточно для того, чтобы генерировать магнитные поля, превышающие на два порядка характерные поля молодых/горячих МБК, ядра которых еще находятся в жидкой фазе (в качестве иллюстрации см. Рис. 11 в работе Кеплера и др. [13]). И вторая проблема состоит в том, что, даже если авторы [15] и правы, то почему только четыре процента [13] белых карликов демонстрируют такую мощную генерацию?

Другое объяснение роста числа МБК в конвективной (холодной) фазе их эволюции состоит в блокировке конвективного выноса тепла к поверхности МБК сильным магнитным полем [1]. Идея проста. В радиационной фазе эволюции белого карлика при остывании их до температур примерно 10000—12000 К все они эволюционируют примерно одинаково. Между тем, для белых карликов более низких температур, в которых их внешние слои охвачены конвекцией, сильные магнитные поля способны значительно замедлить или даже полностью остановить конвективный вынос энергии из их недр. В результате в этой фазе МБК значительно замедляют темп эволюционного остывания и накапливаются в

холодной области их температурного распределения в избытке по сравнению с их слабомагнитными аналогами [1].

Несмотря на кажущуюся очевидность, идея замедления охлаждения МБК в конвективной фазе магнитным полем также имеет критические замечания [48], 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 авторов [48], наступает в условиях, когда белый карлик остыл до температур менее 5500 К. Если магнитное поле достаточно велико (более 1–2 МГс) для того чтобы конвекцию остановить, конвективная связь с ядром не будет достигнута никогда. В этом случае темп эволюции МБК, начиная с указанных температур (10000–12000 К), замедлится по сравнению с его слабомагнитным аналогом. Частота встречаемости таких МБК в результате действительно будет выше. Однако таких холодных магнитных белых карликов эволюционно в нашей Галактике еще очень мало, поэтому высокая частота встречаемости МБК, начиная с температур менее 8000 К, по мнению авторов [48], не может быть объяснена магнитными эффектами.

В продолжение исследования вопроса о блокировке выноса тепла из недр МБК магнитным полем совсем недавно было показано [49], что конвективная связь с изотермическим ядром наступает при температурах существенно выше, чем предсказано ранее [48]. Кроме того, мы считаем спорным предположение, согласно которому магнетоиндуцированная 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 перестроит свою структуру в направлении радиационного градиента [105], который по определению больше, чем адиабатический. 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 окружающее звезду пространство. Гидростатическое равновесие при этом, в условиях отсутствия термоядерного горения в недрах белого карлика, может сохраняться сколь угодно долго. Таким образом, мы считаем, что проблема влияния блокирования поверхностной конвекции на темп тепловой эволюции МБК до сих пор требует всестороннего исследования.

Для изучения влияния различных факторов на частоту встречаемости МБК нами был предпринят ряд шагов по моделированию функции светимости БК и МБК, приведенных в текущей главе и опубликованных в [106-108].

В первой части главы мы рассмотрим те опорные функции светимости, которые используются в дальнейшем в этой главе.

Вторая часть главы посвящена попытке объяснить рост частоты встречаемости МБК торможением конвективного выноса энергии в податмосферном слое магнитным полем [106]. Для этого мы переопределили существующую функцию светимости с учетом эффекта подавления конвекции.

В третьей части главы описано построение функции светимости с учетом переменной скорости образования БК в Галактике и подавления конвекции, описанное в [107]. Здесь мы рассмотрим тот случай, когда скорость рождения МБК является постоянной долей от рожденных БК независимо от возраста Галактики.

В четвертой части главы мы добавляем в модель переменность скорости рождения МБК относительно БК [108].

3.1.1. Наблюдаемые функции светимости БК и МБК

Функция светимости дает распределение звезд в единичном объеме в зависимости от их абсолютной звездной величины [109]. Для популяции белых карликов, имеющих не очень большой разброс радиусов, абсолютная звездная величина, с неопределенностью до одной звездной величины, является вполне

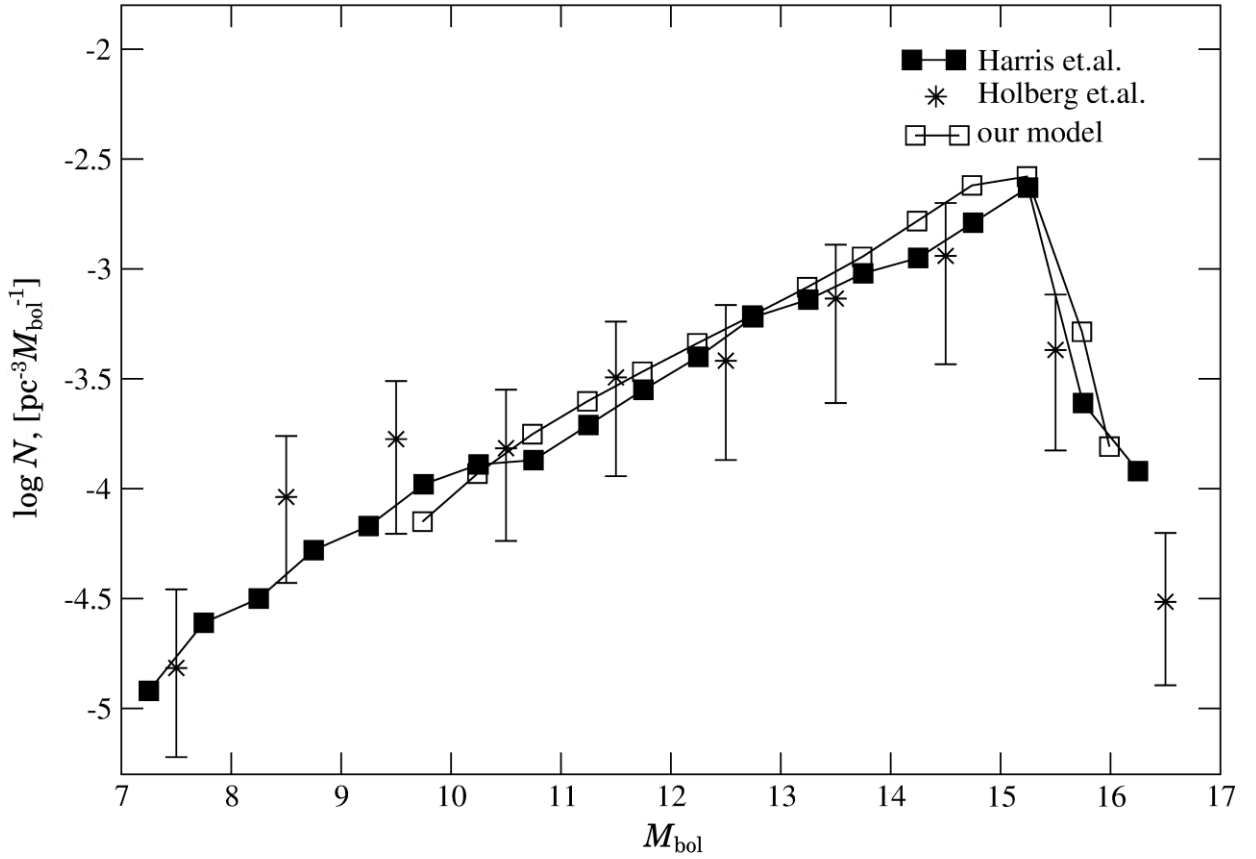


Рисунок 12: Наблюдаемые функции светимости для известных белых карликов ближнего солнечного окружения из работы Харриса [110] (черные квадраты, соединенные линиями) и в объеме 25 пк по данным Холберга [95] (звездочки) с их статистическим неточностями. Наша модель функции светимости белых карликов, построенная на основе эволюционных последовательностей из [30], проиллюстрирована пустыми квадратами, соединенными линиями.

надежным индикатором их возраста.

В качестве опорной наблюдаемой функции светимости БК во всех последующих разделах главы была выбрана функция из статьи [110]. Она построена на основе анализа выборки БК в объеме радиусом 250 пк по данным каталога SDSS [111-113].

Во второй части главы наблюдаемые функции светимости БК и МБК были построены по данным различных авторов [1, 12, 15, 20-21, 23, 41, 46, 57-60, 95, 101] в объеме радиусом 25 пк. В итоге функции светимости построены для 240 белых карликов из ближайшего солнечного окружения. В работе использована методология, описанная в статье [114]. Результат показан на Рис. 12, на нём же

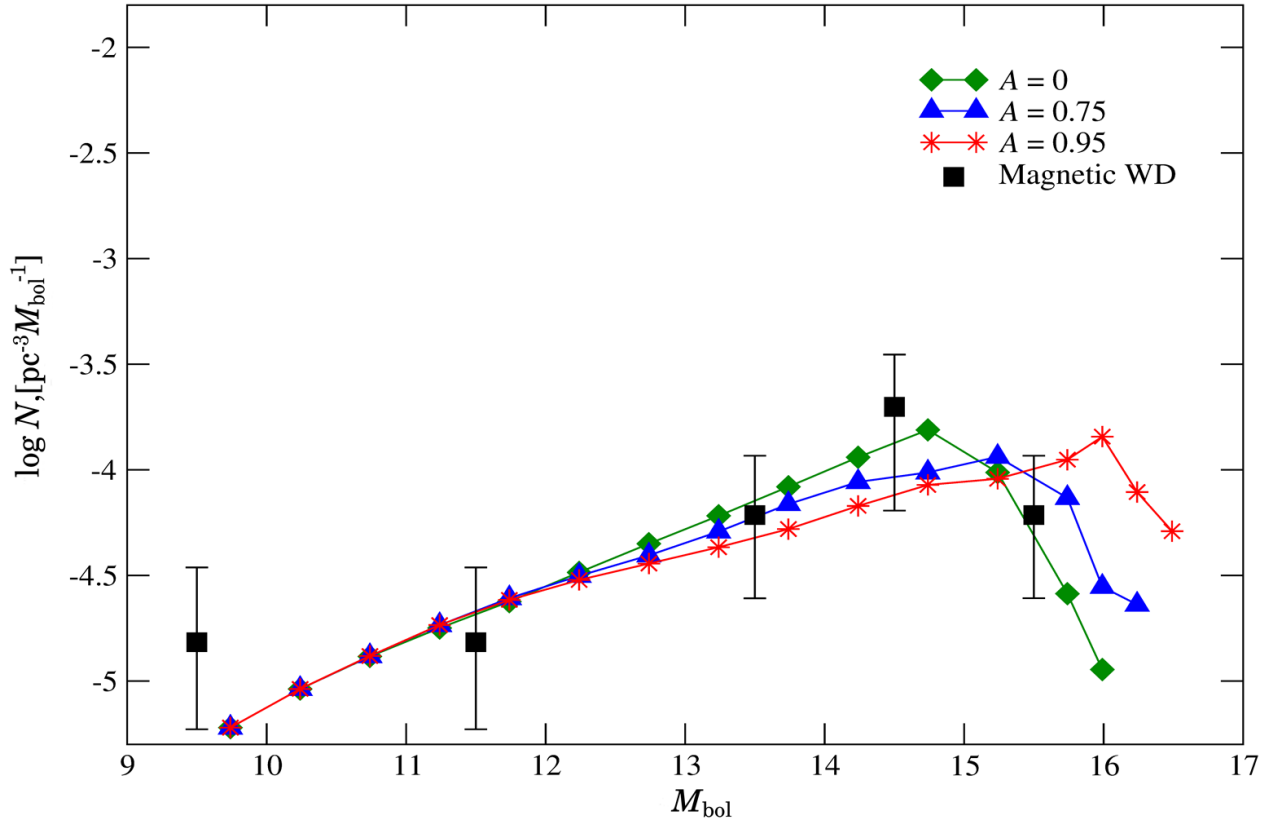


Рисунок 13: Наблюдаемая функция светимости известных МБК в объеме 25 пк (черные квадраты), включая детектированные в настоящей работе кандидаты, и модельные функции светимости МБК для трех различных значений константы A (подробнее см. в тексте).

представлена функция из [110].

Статистическая погрешность рассчитывалась с использованием метода Монте-Карло генерации случайного процесса с выборками случайных чисел. Для сравнения на Рис. 12 приведена наблюдаемая функция светимости белых карликов [110]. Как можно видеть, наш вариант функции светимости белых карликов не отличается от функции светимости из [110] с точностью до статистических ошибок. Таким образом, белые карлики разных масс и возрастов распределены в пространстве ближнего солнечного окружения с радиусом несколько сотен пк однородно.

Следуя той же методологии, была построена наблюдаемая функция светимости МБК. Результат представлен на Рис. 13. Отношение площадей фигур под кривыми функций светимости всей совокупности белых карликов на Рис. 12 и

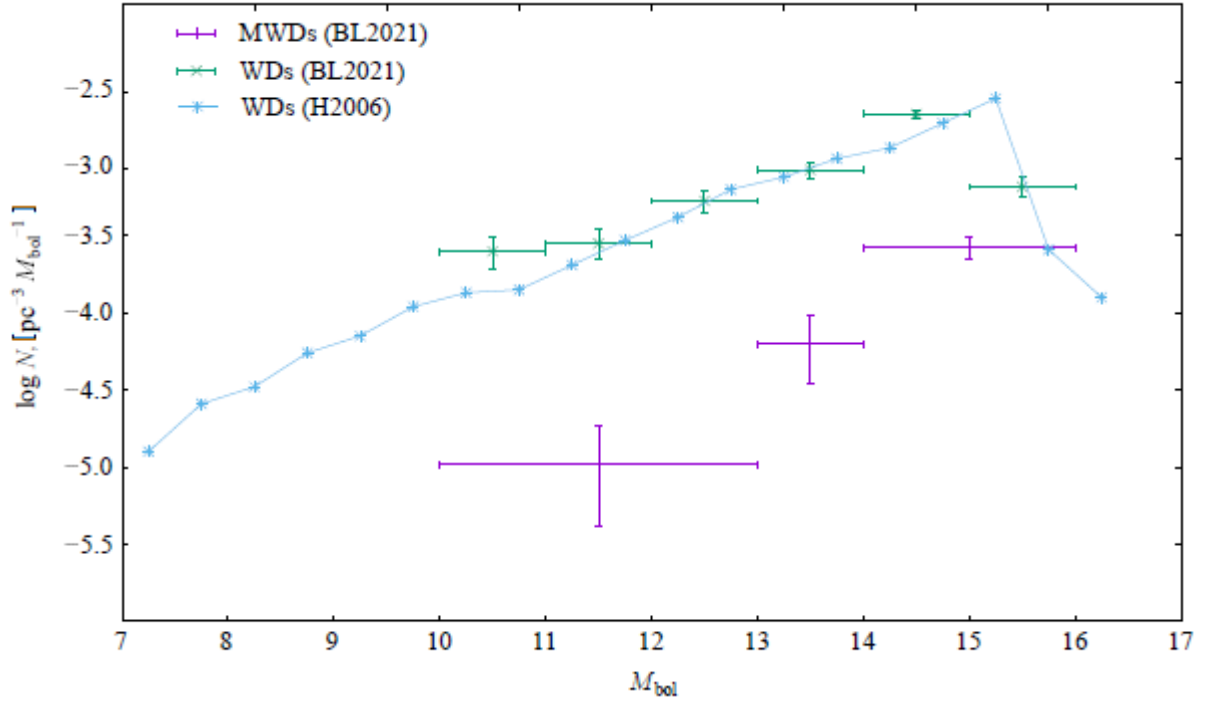


Рисунок 14: Наблюдаемые функции светимости для известных БК в окрестности Солнца радиусом 250 пк (H2006)[110] и в объеме, ограниченном 20 пк, для всех БК и МБК(BL2021)[15].

МБК на Рис. 13 равно примерно 10, что характеризует среднюю частоту встречаемости МБК с мегагауссными и более сильными магнитными полями около 10%. Это значение в общем не противоречит исторически сложившимся оценкам частоты встречаемости МБК [27-28, 40, 55].

В третьей и четвертой частях главы мы использовали данные из работы [15], наиболее полно описывающие магнитные свойства белых карликов в радиусе 20 пк. Однако, ввиду сказанного выше, в качестве опорной функции светимости БК была выбрана функция из работы [110] как наименее отягощенная статистическим шумом по сравнению с данными из [15].

Необходимость ограничения выборки по объему 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 частоты встречаемости МБК от M_{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% [13]. Более яркие/молодые МБК мы не рассматриваем из-за недостаточности статистических данных. Упор делается на рассмотрение далеко проэволюционировавших МБК, для которых массовые спектроскопические обзоры дают заниженный результат в силу отсутствия массовых поляризационных исследований. Ограничение объема в 20 пк делает выборку известных МБК с измерениями в спектрополяризационной моде наиболее полной [15].

На Рис. 14 представлены наблюдаемые функции светимости из работ [15, 110]. Данные [110] показаны звездочками, соединенными сплошными линиями. Данные [15] (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 [110], в качестве опорной.

Оценки наблюдаемой ФС для МБК (Рис. 14 — точки с горизонтальными барами интервалов интегрирования и вертикальными барами ошибок) получены лишь для трех интервалов в силу малой статистики. Вертикальные бары ошибок определены, как описано ранее, 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 [13] до 20% для холодных [15].

3.2. Функции светимости МБК при подавленной конвекции

В этой части главы мы показываем влияние подавления конвективного переноса энергии магнитным полем. Согласно гипотезе, торможение выноса тепла из недр остывающего МБК в развивающейся конвективной зоне, начиная с эффективных температур $T_{\text{eff}} < 11\,000\text{ К}$ — стадии тепловой эволюции БК примерно (с точностью до разности в радиусах МБК), соответствующей M_{bol} в

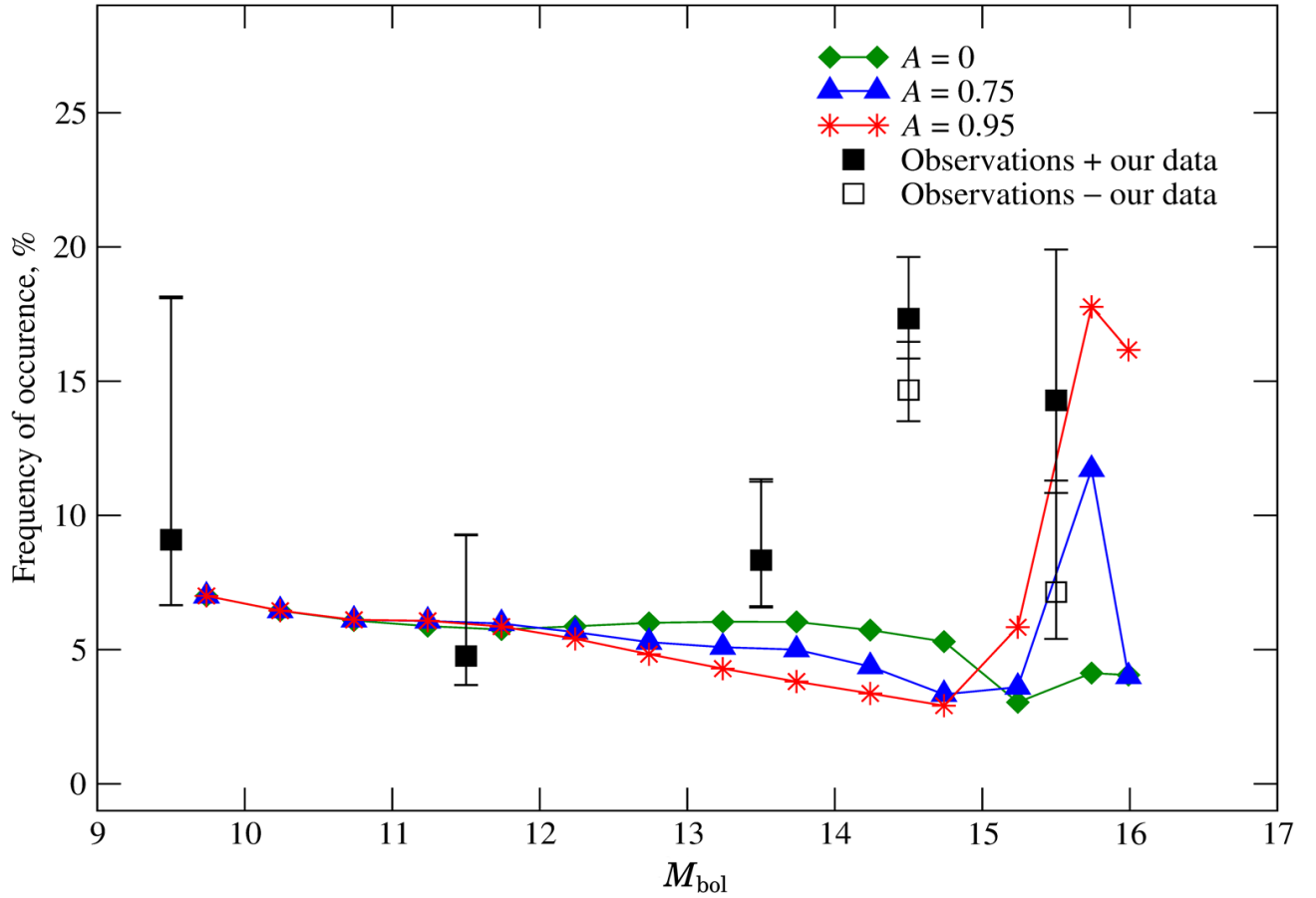


Рисунок 15: Частота встречаемости МБК как функция болометрической величины. Пустые квадраты — все известные и подтвержденные МБК, черные квадраты — все МБК, включая кандидаты, детектированные в настоящей работе. Модельные частоты встречаемости показаны для трех различных значений константы A , отражающей степень подавления конвективного выноса энергии магнитным полем.

интервале между 11^m и 13^m , ведет к замедлению остывания и задерживает МБК на эволюционной шкале по сравнению со слабомагнитными белыми карликами. Начиная с этих величин, должен иметь место постепенный рост частоты встречаемости МБК, что и наблюдается (Рис. 15).

3.2.1 Моделирование функций светимости всей совокупности белых карликов и МБК ближайшего солнечного окружения

Для моделирования функции светимости наблюдаемой совокупности белых карликов в ближайшем солнечном окружении мы использовали теоретические

эволюционные последовательности белых карликов с кислородно-углеродным ядром [30]. Эти последовательности задают модельную сетку времен и темпов эволюции в зависимости от абсолютных светимостей белых карликов разных масс. Используя эту сетку вместе с известным распределением по массам белых карликов в объеме ближайшего солнечного окружения [95], мы построили синтетическую функцию светимости для белых карликов как функцию их плотности в единице пространства и болометрической звездной величины в зависимости от болометрической звездной величины. В рамках неточности значения примерно в одну звездную величину такая функция является индикатором тепловой эволюции белого карлика: чем больше болометрическая величина, тем белый карлик старше.

В данной работе мы не строили полноценную функцию светимости, а переопределяли существующую теоретическую из работы [30]. Строилась сетка кривых остывания для промежуточных масс БК по заданным кривым из работы [30]. Первая (самая горячая) точка функции светимости бралась из работы [30]. Пересчет следующей точки осуществлялся следующим способом. Для каждой промежуточной массы вычислялось произведение значения в начальной точке и отношения времен остывания для соответствующих светимостей по последовательности остывания для данной массы. Сумма бралась с весами равными значению функции масс БК.[12]

Сконструированная нами теоретическая функция светимости белых карликов приведена на Рис. 12. Как уже указывалось выше, на Рис. 12 также представлены наблюдаемые функции светимости для известных белых карликов ближнего солнечного окружения из работы [110] и в объеме 25 пк [95] — черные квадраты и звездочки соответственно. Как нетрудно заметить, в рамках статистических неточностей все функции идентичны. «Завал» функции правее $M_{\text{bol}} = 15^{\text{m}}$ отражает предельные времена эволюции белых карликов. Тот факт, что точки наблюдаемой функции светимости лежат систематически еще ниже теоретической функции, объясняется также наблюдательной селекцией: белые карлики в этой области слабы и их количество может быть до сих пор

недооценено. И в особенности это касается МБК, число которых в этой области действительно недооценено в силу сложности проведения точных поляризационных наблюдений объектов такой малой яркости.

По части модели остывания МБК с внешней конвективной оболочкой, контролируемой магнитным полем, к настоящему моменту нами, безотносительно модели конкретной звезды, создана общая модель, в которой рассчитана поправка к локальной и интегральной светимостям поверхности самогравитирующей, изначально нагретой системы в условиях подавления конвекции ее внешних слоев. Рассмотрим эту модель более подробно.

Термодинамическая система модели состоит из центрального нагретого тела и проводящего тепло внешнего сферически симметричного слоя, в котором на определенных этапах эволюции может развиваться конвекция. Анализ этой абстрактной модели в контексте астрофизических приложений позволил в самом общем виде свести задачу к практически реализуемому простому формализму, с помощью которого может быть рассчитан поток энергии (светимость) с поверхности системы с учетом контроля конвекции магнитным полем:

$$L_{mag}(t) = L_{nomag}(t) \times \frac{(F_{conv} \times [1 - \langle A(B) \rangle] + F_{rad})}{(F_{conv} + F_{rad})} \quad (3)$$

Здесь L_{mag} — светимость с учетом магнитного поля, контролирующего конвекцию, t — время остывания системы, L_{nomag} — светимость без учета магнитного поля, F_{conv} и F_{rad} — конвективный и лучистый вынос энергий в общей энергетике переноса тепла из недр системы наружу. Магнитное поле в зависимости от его интенсивности управляет той долей в общем выносе энергии, которая связана с конвективным переносом тепла F_{conv} . В присутствии магнитного поля $|B|$ конвективный перенос энергии уменьшается на фактор $\langle A(|B|) \rangle$ (находится в интервале 0–1), что сказывается на темпе остывания системы. Значки $\langle \rangle$ означают усреднения параметра по всей поверхности белого карлика вследствие неоднородности распределения магнитного поля $|B|$ по этой поверхности. На самом деле в случае сложных магнитных полей обсуждаемая формула имеет гораздо более сложный вид вследствие неоднородностей не только поля, но и связанных с ним температурных неоднородностей. Например, у белых карликов с

характерными магнитными полями слабее 1 МГс торможение конвекции имеет очень сложный вид, из-за этого на поверхностях звезд формируется развитая пятенная структура, анализ которой требует построения температурных и магнитных карт. Этот подход нами также применяется в 3D-моделировании яркостных неоднородностей слабомагнитных МБК [1]. В контексте же построения статистических функций достаточно использовать усредненные величины.

Параметры F_{conv} и F_{rad} рассчитываются с применением метода моделей атмосфер звезд. Мы традиционно используем модель «line-by-line», представленную Шуляком [115]. В случае очень сильных магнитных полей (например, белых карликов с крупномасштабными поверхностными магнитными полями более одного мегагаусса), параметр $\langle A(|B|) \rangle$ от $|B|$ уже не зависит или зависит слабо в силу того, что в этом случае магнитное поле настолько велико, что даже сильно неоднородное поле полностью и одинаково контролирует конвекцию внешних слоев в любой точке поверхности. В этом случае $\langle A \rangle$ может быть в первом (хотя и грубом) приближении принята свободной константой, которая подбирается в каждом конкретном физическом случае индивидуально.

На основании представленного выше формализма нами построены несколько вариантов функции светимости для МБК. Для их построения мы также использовали эволюционные последовательности [30] и распределение МБК по массам, представленное в [12]. Для каждого конкретного значения константы $\langle A \rangle$ в интервале 0–1 эволюционные последовательности корректировались с учетом уменьшения светимости МБК за счет подавления конвективного переноса с фактором $\langle A \rangle$. В частности, значение $\langle A \rangle = 0$ соответствует случаю отсутствия подавления конвективного выноса энергии магнитным полем, а значение $\langle A \rangle = 1$ — случаю полного подавления конвекции магнитным полем, при котором остается только лучистый перенос энергии F_{rad} .

Три модельных варианта функции светимости для МБК представлены на Рис. 13 в сравнении с наблюдаемой функцией светимости (черные квадраты со статистическими неточностями). Первый, базовый, вариант со значением константы $|A| = 0$ (отсутствие влияния магнитного поля на эволюционный вынос

энергии у МБК) обозначен крестиками. Два других варианта рассчитаны для случаев существенного подавления конвективного выноса энергии магнитным полем со значениями константы $\langle A \rangle = 0.75$ (пустые квадраты) и $\langle A \rangle = 0.95$ (звездочки).

Формальное сравнение этих функций с наблюдениями дает лучшие варианты со значениями константы $\langle A \rangle$ в интервале от 0 до 0.75 с довольно большим статистическим разбросом. Между тем эти два варианта функции светимости и все промежуточные плохо согласуются либо вообще не согласуются с поведением частот встречаемости МБК в зависимости от их абсолютной звездной величины. Наилучшее согласие по частотам встречаемости, хотя тоже проблемное, дает вариант с $\langle A \rangle = 0.95$. В этом случае функция светимости вместе с ее экстремумом (Рис. 15) значимо смещается в область меньших светимостей (бóльших значений болометрической звездной величины) из-за значительного (95%) подавления конвективного выноса энергии из недр МБК. Это расхождение подразумевает физическую нереалистичность таких экстремальных значений параметра $\langle A \rangle$. Однако, несмотря на это, мы не можем отбросить такое решение. Дело в том, что оценка количества известных старых белых карликов со сверхсильными магнитными полями и низкими светимостями на настоящий момент сильно занижена. Наше исследование эту недооценку подтверждает. А значит, крайняя правая из полученных по наблюдательным данным точек на Рис. 15 может оказаться выше, и считать модель с параметром $\langle A \rangle = 0$ наилучшим вариантом для описания наблюдаемой функции светимости МБК ошибочно. Поведение функции частоты встречаемости МБК в зависимости от их болометрической звездной величины (Рис. 15) подкрепляет уверенность в правильности такого заключения.

3.2.2 Частота встречаемости МБК как функция болометрической звездной величины

На Рис. 15 проиллюстрировано поведение частот встречаемости МБК в зависимости от их болометрической звездной величины — главный результат

текущей части главы. Зависимость получена делением функций светимости МБК на общую функцию светимости белых карликов. Результаты наблюдений представлены незаполненными и черными квадратами. В данном случае мы включили в рассмотрение МБК ближайшего солнечного окружения в объеме радиусом 25 пк. Пустые квадраты соответствуют результатам наблюдений, полученных до наших широкополосных поляризационных исследований [64], заполненные — с использованием результатов этих наблюдений. Замечена одна общая тенденция: значимое увеличение частоты встречаемости МБК с увеличением их болометрической величины (уменьшением яркости). Этот эффект уже давно обсуждается многими авторами [27-28, 40-41, 55]. Попытка объяснить данный эффект тем, что МБК в среднем имеют бóльшую массу и вследствие этого меньшие радиусы, что тоже уменьшает интегральную светимость вырожденной звезды, не выдерживает критики. Несмотря на то, что имеется разница между средней массой обычного белого карлика (около $0.56 M_{\odot}$) и средней массой МБК ($0.83 M_{\odot}$) и разность их радиусов БК одной температуры создает неопределенность звездной величины менее $1 M_{\text{bol}}$, эффект увеличения частоты встречаемости покрывает в несколько раз больший интервал болометрических звездных величин. Это, в свою очередь, означает, что эффект увеличения частоты встречаемости МБК с ростом болометрической величины имеет именно эволюционную природу: частота встречаемости растет с возрастом.

Согласно высказанной ранее идее [1], начиная с определенных значений температур МБК (10 000 К и ниже), когда у белого карлика развивается конвекция, ее подавление магнитным полем приводит к уменьшению его светимости, замедлению остывания и к увеличению популяции МБК в этой температурной области. Поэтому частота встречаемости МБК повышена в области температур менее 10 000 К.

Эта идея подтверждается настоящими расчетами синтетической функции светимости МБК. Вариант без учета магнитоиндуцированного подавления эволюционного выноса энергии, $\langle A \rangle = 0$ (Рис. 15 — зеленые ромбы, соединенные сплошной линией) не демонстрирует увеличения частоты с возрастом вообще.

Наоборот, в этом случае частота встречаемости МБК эволюционно должна только уменьшаться. И это интуитивно понятно: более массивные белые карлики с большими магнитными полями [13], имея меньшие радиусы, должны остывать медленнее на всей возрастной шкале с самого своего рождения. Соответственно, и частоты их встречаемости должны монотонно падать с возрастом на всей шкале.

В двух других вариантах смоделированной функции светимости МБК с сильным влиянием подавления конвективного выноса энергии ($\langle A \rangle = 0.75$ и $\langle A \rangle = 0.95$) ситуация принципиально иная. Можно увидеть резкое увеличение частоты встречаемости МБК с возрастом (Рис. 15). Рост числа МБК с низкими температурами происходит по двум причинам: за счет уменьшения светимости белого карлика вследствие подавления конвективного выноса энергии на его поверхность и вследствие того, что такие белые карлики начинают медленнее эволюционировать. В результате МБК в избытке накапливаются в низкотемпературном конце их функции светимости, что приводит к резкому увеличению их частот встречаемости; это и демонстрируют два варианта модели с $\langle A \rangle = 0.75$ и $\langle A \rangle = 0.95$.

Несмотря на то, что самая низкотемпературная часть функции светимости при больших болометрических звездных величинах объясняется в рамках предложенной нами модели, в которой отдается предпочтение параметру $\langle A \rangle$ с самым высоким значением, соответствующим подавлению 95% доли конвективного выноса тепла, поведение функции в интервале болометрических величин между 13^m и 15^m расходится с наблюдениями.

3.3 Моделирование функции светимости МБК при различной скорости звездообразования

В текущей части главы мы представляем исследование, подобное проведенному в 3.2. На основе рассмотрения частот встречаемости МБК в зависимости от их абсолютной болометрической звездной величины M_{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 [15, 116], что позволяет сделать надежные объективные выводы. Модельные функции светимости МБК мы конструируем при различных предположениях о темпах звездообразования их звезд-предшественников, используя функцию масс МБК и эмпирическую функцию, связанную с магнитоиндуцированным подавлением у этих объектов внешней конвекции.

3.3.1. Моделирование наблюдаемых функций светимости всех БК и МБК без учета эффекта подавления конвекции магнитным полем

Способ моделирования ФС описан, например в [117]. Она задается интегралом по массам от произведения распределения объектов по массам, скорости звездообразования и производной времени остывания по звездной величине:

$$n(L) = \int_{M_{\inf(L)}^{M_{\sup}} \tau_{cool}(L, M) * \psi(t_{disk} - t_{cool}(L, M) - t_{ms}(M)) * \varphi(M) dM, \quad (4)$$

где τ_{cool} производная времени остывания по светимости, ψ скорость звездообразования, φ распределение по массам, t_{disk} время жизни диска, t_{cool} время остывания, t_{ms} время, проведенное звездой на главной последовательности.

Аналогично, например, [30, 117-118], мы использовали распределение по массам, описанное в работе [119], с показателем степени -2.35 для всех БК. Распределение для МБК взято из работы [12]. В качестве исходных данных по временам остывания использовались последовательности [30] для маломассивных БК (до $1 M_{\odot}$) с СО-ядрами и зависимость, представленная в работе [120] для массивных БК с ОNe-ядрами ($M = 1.06-1.28 M_{\odot}$). В настоящей работе исследовалось также влияние темпа звездообразования на функцию светимости. Рассматривалось несколько различных функций звездообразования: экспоненциальный спад, линейный спад, постоянный темп (используется в большинстве исследований, например, в работах [30, 117-118]) и переменный

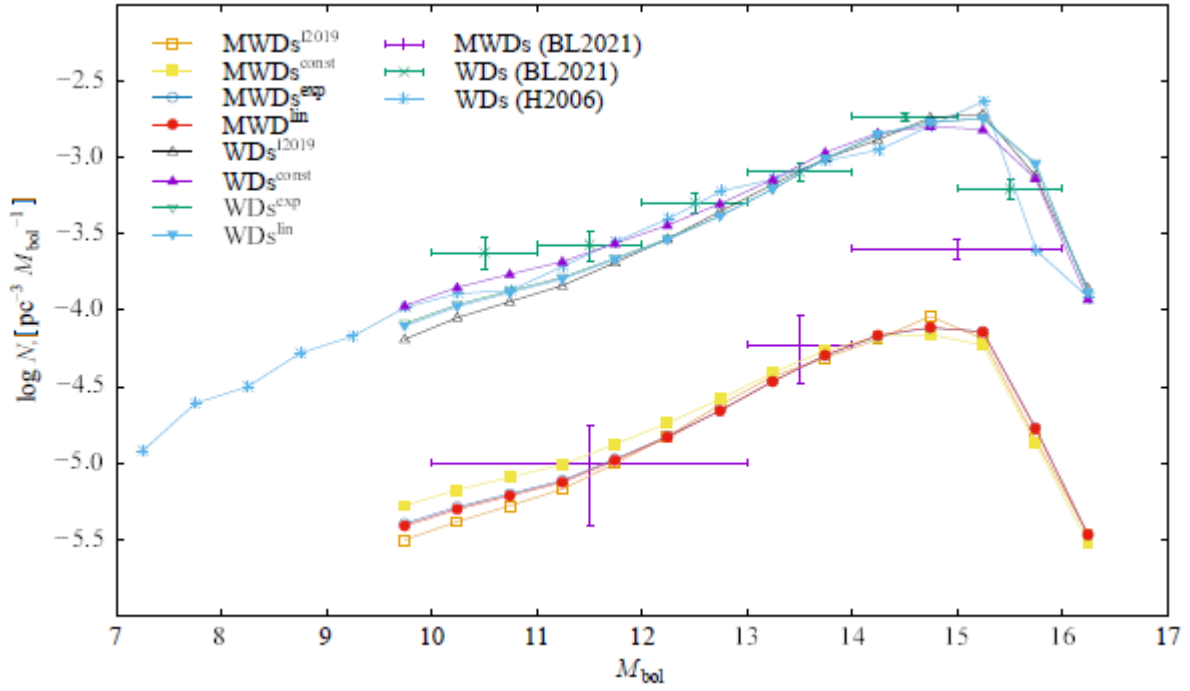


Рисунок 16: Модельные ФС для всех БК и МБК — «WDs» и «MWDs» соответственно. Верхние индексы «const», «exp», «lin» и «I2019» обозначают используемый нами в модели темп звездообразования — постоянный, с экспоненциальным или линейным спадом и темп звездообразования согласно [121] соответственно. Для сравнения представлены наблюдаемые функции светимости для известных БК в окрестности Солнца радиусом 250 пк (H2006)[110] и для всех БК и МБК в объеме, ограниченном 20 пк (BL2021[15]).

темп [121]. Расчет функции светимости для каждой конкретной звездной величины проводился следующим образом:

1. Из всех известных последовательностей остывания БК для фиксированных масс формировались последовательности для промежуточных масс БК.
2. Производная времени остывания по звездной величине бралась с помощью построенной последовательности остывания. Производная для заданной звездной величины определялась как разность времен остывания БК в точке с заданной звездной величиной и следующей за ней, деленной на разность соответствующих звездных величин, за исключением последней звездной величины в последовательности остывания (в этом случае брались текущая звездная величина и предыдущая).

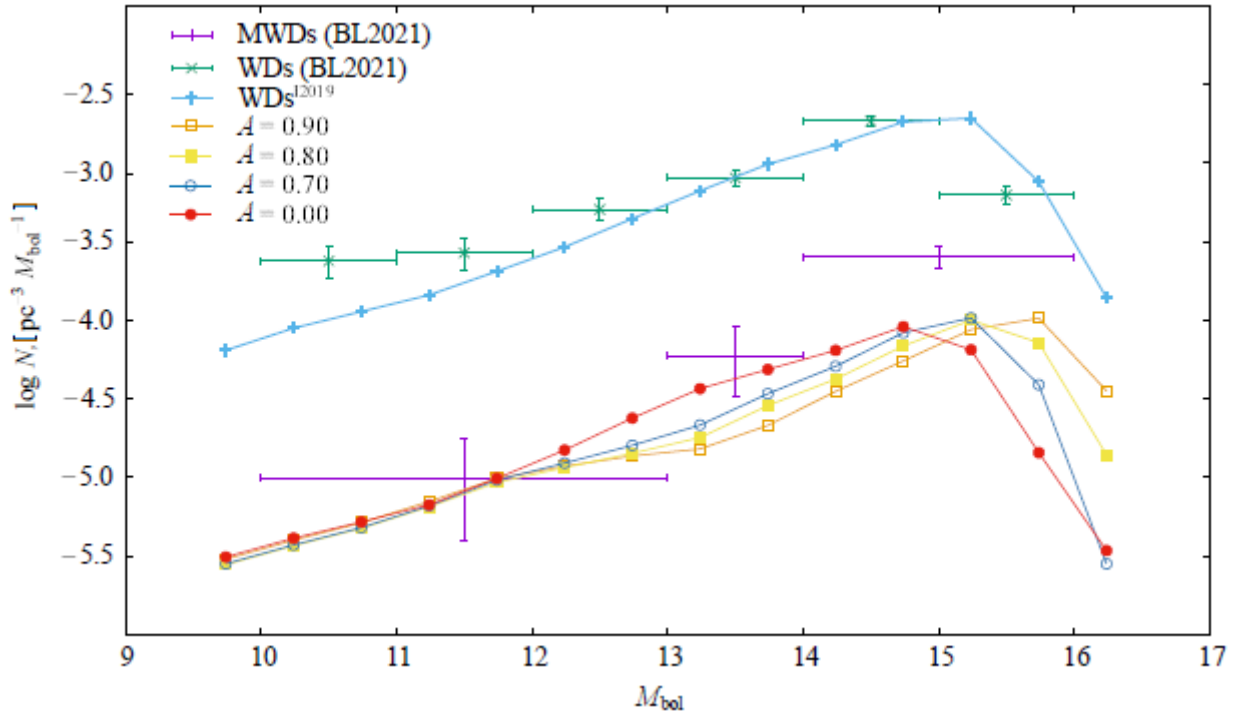


Рисунок 17: Варианты модельной функции светимости МБК для разных значений параметра A в сравнении с вариантами ФС по всей выборке БК при темпе звездообразования из работы [121].

3. Расчет велся только для населения диска Галактики, поскольку мы имеем дело с ближайшим солнечным окружением. Если время остывания БК с заданной массой и звездной величиной в сумме со временем нахождения звезды до стадии БК превышало возраст диска (9.3 млрд. лет, [30]), 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 [121]). Получившуюся функцию светимости мы подгоняли к наблюдениям так, чтобы ее интеграл соответствовал интегралу наблюдаемой функции светимости [110] в заданном диапазоне звездных величин. В случае МБК мы подгоняли к частоте встречаемости 4–5% [13] в области $M_{\text{bol}} < 13^{\text{m}}$.
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 функции светимости из работы [110]. 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. 16. Как видно, какой-либо значимой разницы между ними не обнаруживается, особенно в области больших M_{bol} , представляющей наибольший интерес для нашего исследования.

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

Аналогично нашему предыдущему исследованию (раздел 3.2) в этой части главы мы повторяем моделирование функции светимости МБК в предположении, что сильное поверхностное поле звезды, останавливая конвекцию, существенно тормозит вертикальный вынос тепловой энергии. Нами [106] создана эмпирическая модель, рассчитывающая поправку к интегральной светимости поверхности МБК и, соответственно, поправку к временам остывания белых карликов разных масс в стандартных моделях (см., например, [30]). Детали моделирования подробно рассмотрены в разделе 3.2. В основе используемой нами техники моделирования лежит введение параметра $A(|B|)$ ($0 < A(|B|) < 1$) в зависимости от усредненного по всей поверхности звезды модуля магнитного поля $|B|$. Введение этого параметра смещает 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. 17.

Мотивированные публикацией сравнительно новых наблюдательных данных и выводов по магнетизму БК в работах [15, 116], здесь мы провели повторный анализ частот встречаемости МБК как функции его абсолютной звездной величины в ограниченном объеме радиусом 20 пк. В этом объеме выборка МБК наиболее полна, поскольку прошла также и через спектрополяриметрическую диагностику. 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, [13]) число холодных МБК больших M_{bol} , очевидно, недооценено, в то время как оценка средней частоты встречаемости МБК с температурами в интервале 10 000–40 000 К (4% [13]) является, по всей видимости, корректной, поскольку согласуется с результатами других исследователей (например, [15]). 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 [13]), оценена на уровне 3% (оценка частоты встречаемости по данным [15] при самом левом горизонтальном баре на Рис. 18). Если сравнить эти оценки с частотой $20 \pm 3\%$ при горизонтальном баре M_{bol} 14^m – 16^m (Рис. 18), становится очевидно, что разница в частотах весьма значительна. 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 научном сообществе до сих пор нет единого мнения по поводу физической природы этого явления. В частности, [15] считают, что для подтверждения данного эффекта необходим анализ статистики МБК на больших объемах солнечного окружения. Между тем, разницы в частотах встречаемости на уровне более 4σ , полученной в настоящем исследовании, достаточно для того, чтобы считать эффект увеличения частот встречаемости МБК с возрастом,

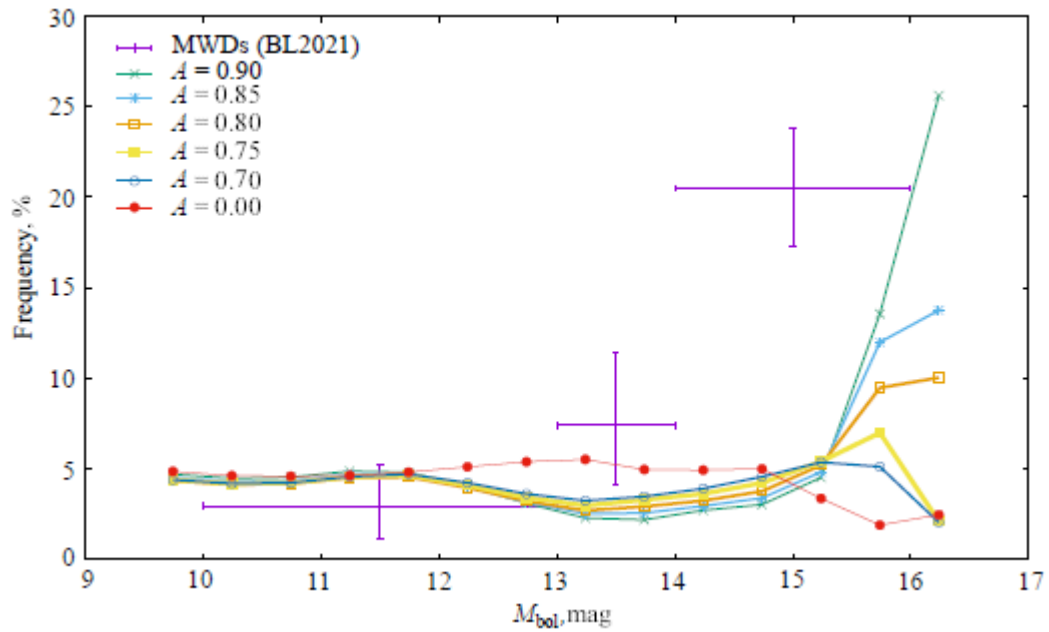


Рисунок 18: Модельная частота встречаемости МБК как функция абсолютной болометрической величины для разных значений параметра A . Три значения в интервалах, указанных горизонтальными барами — частоты встречаемости по данным BL2021[15].

установленным в очередной раз.

3.4. Функции светимости МБК с переменной частотой рождения МБК

В предыдущих частях главы мы моделировали и сравнивали с наблюдениями функцию светимости МБК в предположении подавления конвекции их сильными (от нескольких и до сотен мегагаусс), крупномасштабными магнитными полями. В качестве фактора подавления использовался эмпирически подбираемый параметр A – функции отсечки доли конвективного выноса энергии относительно случая с нулевым магнитным полем [106]. Параметр $A=0$ соответствует случаю с нулевым магнитным полем. Значение $A=1$ соответствует случаю полностью остановленной магнитным полем конвекции. Для сравнения использовались 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 белых карликов. Смоделированные частоты сравнивались с частотами, полученными из наблюдений. В результате для случая экстремально больших значений параметра A ($A > 0.8$) мы получали резкий рост частоты встречаемости в области самых холодных/старых белых карликов с эффективными температурами T_{eff} ниже 6000 К. В области температур 6000—8000 К, однако, мы получили не рост числа МБК, а их дефицит, что связано их покраснением в связи с подавлением конвекции магнитным полем и более быстрым смещением этой популяции МБК вправо на шкале абсолютных звездных величин $M_{\text{bol}} = 12^{\text{m}}.0$ — $13^{\text{m}}.5$ (см. Рис. 15). Для абсолютных величин более $13^{\text{m}}.5$ популяция МБК снова начинает расти уже за счет замедления их времени жизни и в области $M_{\text{bol}} > 15^{\text{m}}.0$ начинает демонстрировать избыток, что отражается в увеличении частот их встречаемости на шкале абсолютных звездных величин. Наблюдения же демонстрируют рост уже начиная с $M_{\text{bol}} > 13^{\text{m}}.0$.

Попытка объяснить наблюдаемое очевидное расхождение теории и наблюдений недоучетом в расчетах наличия во внешней оболочке белых карликов более тяжелых, чем водород, химических фракций (в частности, гелия) также не привела к положительному решению ввиду того, что соответствующие слои БК находятся на достаточно большой глубине и имеют температуру, существенно превышающую температуру включения конвективного переноса энергии. Поэтому нами была предпринята попытка поиска альтернативного механизма, 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 [87,122,123] 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 рождаются МБК) в молодых областях активного звездообразования в два раза выше, чем у звезд поля [123-124]. 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. Последующий 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 взяли эту разницу за основу моделирования наблюдаемой функции светимости МБК.

Общепринято (например, [125]), 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 первичного образования Галактики была выше, чем в настоящее время. Все это аргументирует идею, что самые старые массивные звезды главной последовательности имели крупномасштабные магнитные поля и, соответственно, частоты встречаемости таких звезд были значительно выше, чем в настоящее время. Миллиарды лет эволюции Галактики, постепенное уменьшение энергетика 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 произойдут МБК, становятся менее намагниченными и частоты их детектирования уменьшатся. Эта идея легла в основу тестирования нашего модельного метода с рассмотрением переменной частоты возникновения звезд-предков МБК со

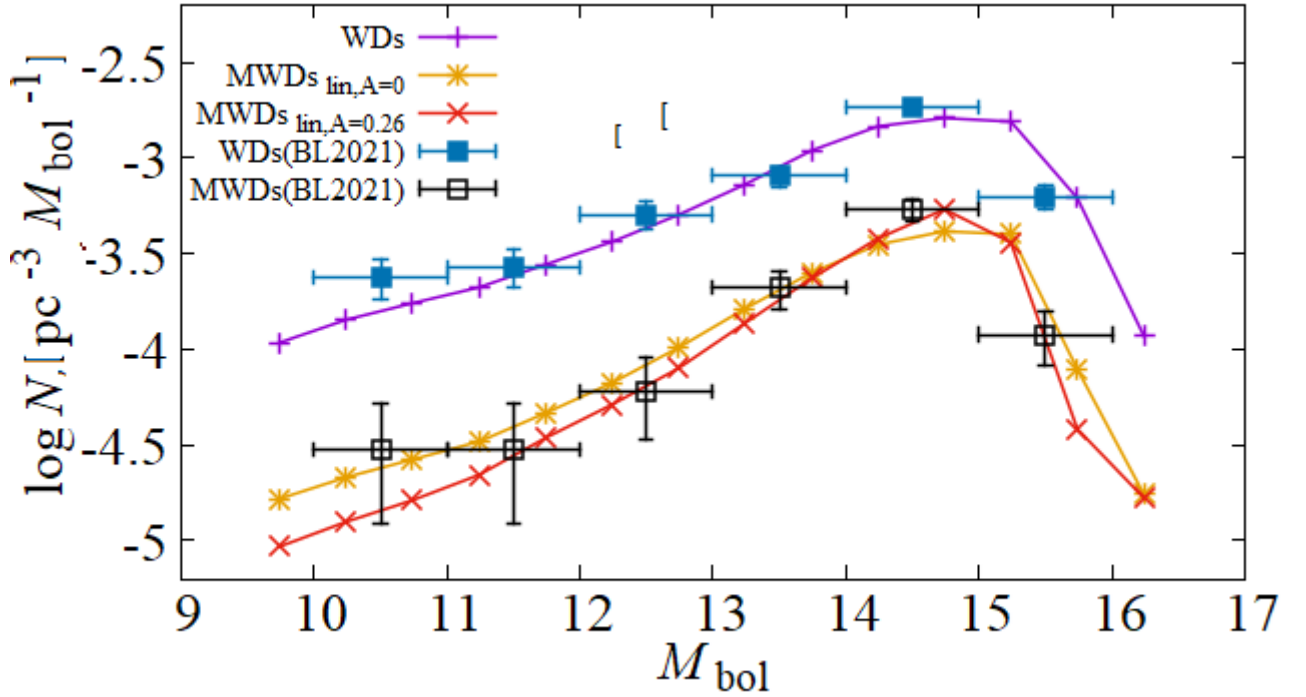


Рисунок 19: Наблюдаемые (символы с барами ошибок) и синтезированные (сплошные линии) функции светимости для известных БК в окрестности Солнца радиусом 20 Пк (BL2021)[15]. Заполненные квадраты голубого цвета с вертикальными и горизонтальными барами ошибок иллюстрируют наблюдаемую функцию светимости для всей совокупности выборки белых карликов. Сиреневая сплошная линия – ее модель. Черные пустые квадраты с вертикальными и горизонтальными барами ошибок иллюстрируют наблюдаемую функцию светимости MWDs в рассматриваемом объеме. Оранжевая линия – модель с учетом монотонного уменьшения рождения звезд-предков MWDs в процессе эволюции галактики. Красная линия – то же самое с включением в модель процесса подавления конвекции. временем.

3.4.1. Моделирование функции светимости с учетом переменной частоты звездообразования МБК

В нашу модель [106-107], в которой частота образования магнитных звезд-предков МБК считалась не зависящей от времени, мы внесли переменную

линейную функцию уменьшения этой частоты со временем. Т.к. частота звездообразования 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 (черные квадраты на Рис. 19). Получившиеся значения частоты рождения магнитных звезд составили $P=52\%$ в начальный, и $P=21\%$ в современный моменты эволюции Галактики. Результаты моделирования представлены на Рис. 19, 20 настоящего исследования. На Рис. 19 представлены наблюдаемые и синтезированные функции светимости для известных белых карликов в окрестности Солнца радиусом 20 Пк [15]. Наблюдаемая функция светимости для всей совокупности выборки белых карликов в этом объеме (голубые квадраты с барами ошибок) описана стандартной моделью в разделе 3.3 (постоянная скорость звездообразования) без рассмотрения магнитных свойств МБК (сиреневая сплошная линия). Оранжевая линия – модель с учетом монотонного уменьшения скорости звездообразования звезд-предков МБК с крупномасштабными магнитными полями. На Рис. 20 представлены наблюдаемые и синтезированные частоты встречаемости в том же объеме. Шесть квадратов с вертикальными и горизонтальными барами ошибок черного цвета иллюстрируют наблюдаемые частоты встречаемости МБК в зависимости от их абсолютной звездной величины. Оранжевая сплошная линия – модельные частоты встречаемости МБК с учетом монотонного уменьшения скорости звездообразования их предков в процессе эволюции Галактики. Эффект подавления конвекции в этот вариант расчета не включен.

Как можно видеть из сравнения модели с наблюдательными данными, введение в расчет коэффициента редукции вероятности образования сильнозамагниченной звезды-предка МБК качественно объясняет результаты наблюдений. Между тем, как видно на Рис. 20, рост модельной кривой с уменьшением температуры недостаточно большой, чтобы описать одновременно горячую и холодную зоны температурного распределения. Включение в модель процесса редукции выноса тепла конвекцией полностью согласует модель с

наблюдениями. На Рис. 20 представлена модель с переменной частотой

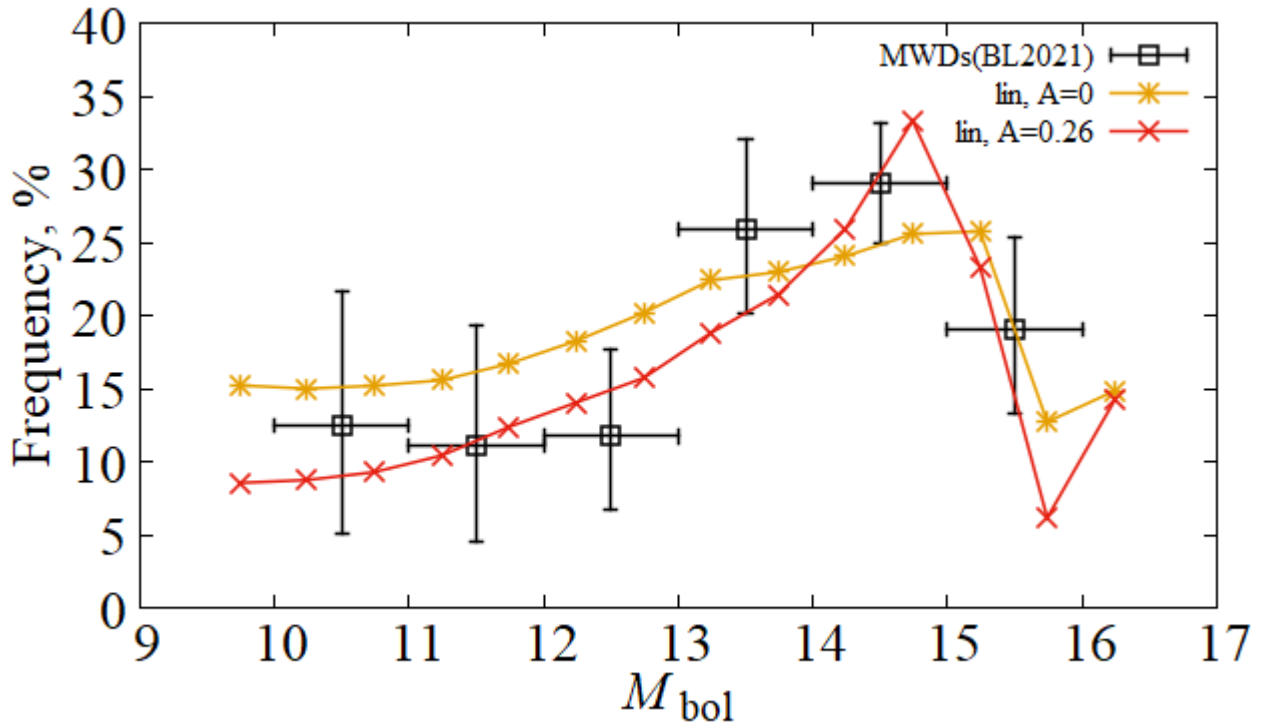


Рисунок 20: Наблюдаемые (символы с барами ошибок) и синтезированные (сплошные линии) частоты встречаемости для известных БК в окрестности Солнца радиусом 20 Пк (BL2021)[15]. Шесть пустых квадратов с вертикальными и горизонтальными барами ошибок черного цвета иллюстрируют наблюдаемые частоты встречаемости МБК в зависимости от их абсолютной звездной величины. Оранжевая сплошная линия – модельные частоты встречаемости МБК с учетом монотонного уменьшения рождения в процессе эволюции Галактики их предков – звезд с крупномасштабными магнитными полями. Красная линия – то же самое с включением в модель процесса подавления конвекции.

рождаемости магнитных звезд-предков МБК и с учетом магнитоиндуцированного торможения конвекции (красная линия). Параметры звездообразования и подавления конвекции подбирались так, чтобы лучше соответствовать наблюдаемой функции светимости МБК (черные квадраты). Получившееся значение параметра функции отсечки $A=0.26$ и частоты образования магнитных звезд-предков МБК: $P=59\%$ в начальный и $P=10\%$ в текущий моменты эволюции Галактики. Стоит отметить, что получившаяся частота образования в текущий

момент эволюции Галактики соответствует частоте встречаемости магнитных звезд в верхней части главной последовательности (10%, см. [126] и ссылки в ней).

Полученный результат объясняет, с одной стороны, давно обсуждаемый феномен неравномерного распределения встречаемости МБК с их возрастом, с другой стороны, фракцию 10% числа A_p/V_p магнитных звезд в современной Галактике. Вследствие этого, мы получаем алгоритм для изучения глобальных свойств магнетизма Галактики в процессе ее эволюции. Отдельно стоит отметить, что без учета подавления конвективного выноса энергии мы получаем худшее соответствие модели наблюдательным данным и неверную оценку фракции магнитных звезд в Галактике. Приведенное исследование, таким образом, аргументирует, в том числе, необходимость ревизии теории остывания МБК для случая сильных магнитных полей.

3.5. Результаты

В главе представлены результаты моделирования функции светимости и частоты встречаемости МБК. Последовательно в модель включались различные механизмы влияния магнитных полей на эволюцию МБК. Было показано, что функция масс МБК, отличная от функции масс БК, не объясняет роста частоты встречаемости. Включение подавления конвекции дало возможность объяснить повышенную частоту встречаемости МБК в самой холодной области их температурного распределения, однако данное повышение наблюдается для более горячих МБК. Учет различной скорости звездообразования при постоянной частоте рождения МБК не дал значимых результатов. Но ввод переменной частоты рождения МБК при подавленной конвекции дал интересные результаты. Во-первых, удалось достаточно точно описать наблюдаемую частоту встречаемости в объеме радиусом 20 пк. Во-вторых, частота рождения магнитных звезд-предков МБК в итоговой модели совпала с наблюдаемой для верхней части ГП, что независимо подтверждает жизнеспособность нашей модели. Таким образом, нам удалось выявить основные механизмы влияния особенностей

эволюции МБК на частоту их встречаемости.

Кроме того, полученный результат описывает частоту рождения магнитных звезд в диске Галактики на протяжении всего времени существования диска, что позволяет исследовать особенности возникновения и эволюции глобальных магнитных свойств Галактики.

Положение, выносимое на защиту:

Вывод о том, что для объяснения существенного роста числа МБК с низкими поверхностными температурами необходим учет нескольких факторов: отличие масс этих объектов от масс обычных белых карликов, подавление конвективного выноса энергии магнитным полем и переменная во времени частота звездообразования звезд-предков МБК относительно БК. Учет всех факторов позволяет исчерпывающе объяснить рост частоты встречаемости МБК относительно БК.

Глава 4. ВСТРЕЧАЕМОСТЬ МБК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ИХ ПОВЕРХНОСТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

4.1. Введение

Проведенное нами в главе 2 исследование МБК с регулярными магнитными полями показывает, что все объекты с напряженностью поля от нескольких десятков килогаусс и выше отличает высокая стабильность магнитных свойств на временах от нескольких десятков лет и более.

Практически нет сомнений, что и все остальные известные МБК с полями напряженностью более нескольких десятков–сотен килогаусс также демонстрируют стабильные магнитосферы. Это, с одной стороны, открывает практическую возможность использовать такие звезды в качестве стандартов круговой поляризации (тем более что в данном направлении в практической астрофизике до сих пор нет систематического исследования — имеются только списки стандартов линейной поляризации), и результаты нашей работы являются основанием к созданию на базе САО РАН первого обзора стандартов круговой поляризации. С другой стороны, существование популяции МБК со стабильными (регулярными) глобальными магнитными полями полностью подтверждает гипотезу о реликтовом происхождении и медленном вырождении магнитных полей БК [43, 56]. Интригу составляет группа слабомагнитных БК, магнитные поля которых детектируют с переменным успехом (см. главу 2), и подавляющее большинство БК, у которых, несмотря на многочисленные попытки, магнитное поле не удается обнаружить. По нашему мнению, решение этой проблемы даст анализ вероятностного распределения МБК по магнитному полю — так называемой функции магнитного поля, MFF (Magnetic field function). Результаты построения этой функции опубликованы нами в статье [61].

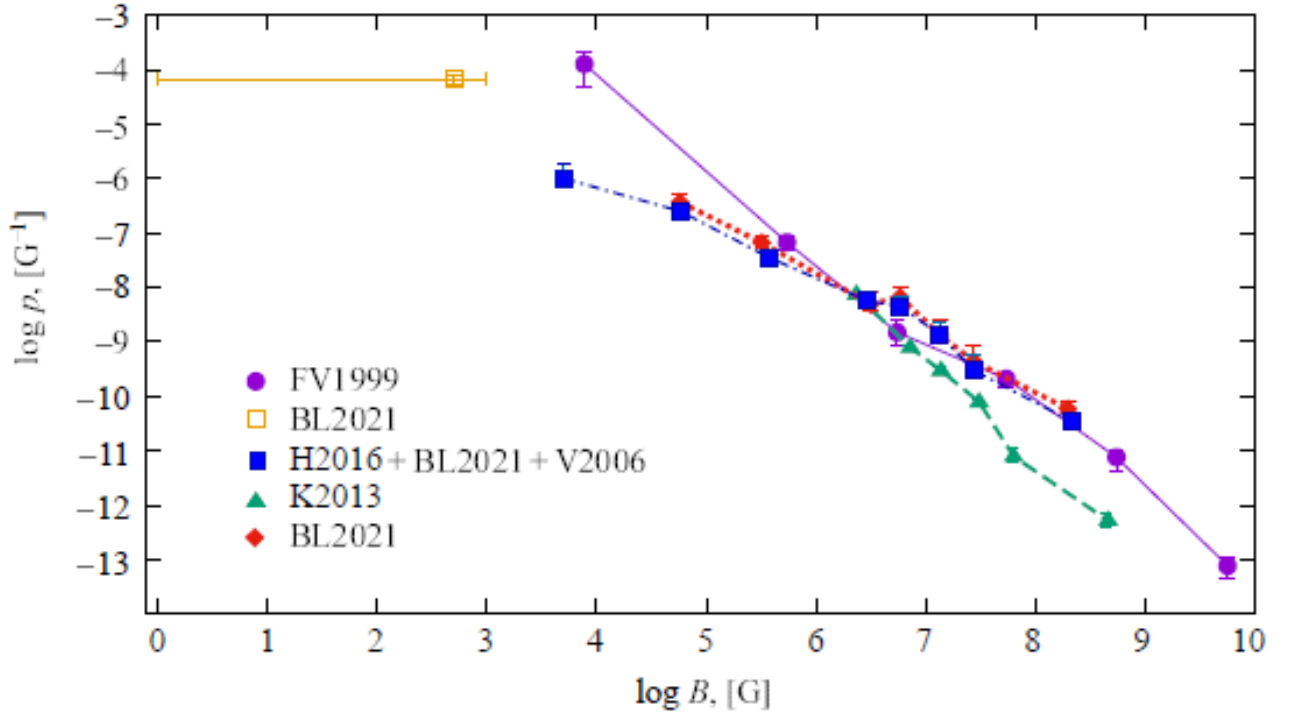


Рисунок 21: Функция магнитного поля белых карликов (MFF) — зависимость плотности вероятности p встречаемости МБК с заданным значением магнитного поля B по данным различных авторов: FV1999 [55], BL2021 [15]), H2016 [95], V2006 [50], K2013 [13]. Оранжевым пустым квадратом показан нижний предел MFF по данным [15] для объектов, у которых магнитное поле не было обнаружено и критерий 3σ для которых был менее 1 кГс (в статье указана точность 1σ).

4.2. Построение и анализ функций магнитного поля для МБК

Впервые MFF для МБК с величинами магнитного поля в интервале от 500 кГс до 1 ГГс упоминается в работах [54-55], где она представлена в виде функциональной зависимости наблюдаемой вероятности встречаемости МБК в ближайшем солнечном окружении (около 100 пк) в расчете на 1 Гс (плотность вероятности встречаемости). Для магнитных полей БК со значениями напряженности поля менее 100 кГс авторами были даны верхние пределы. С того времени статистика известных МБК увеличилась почти в десять раз, в том числе и для МБК с величинами магнитного поля существенно меньше 100 кГс. Эти факторы побудили нас провести аналогичное исследование и построить частотное распределение БК по напряженностям магнитных полей в диапазоне от 10 кГс и

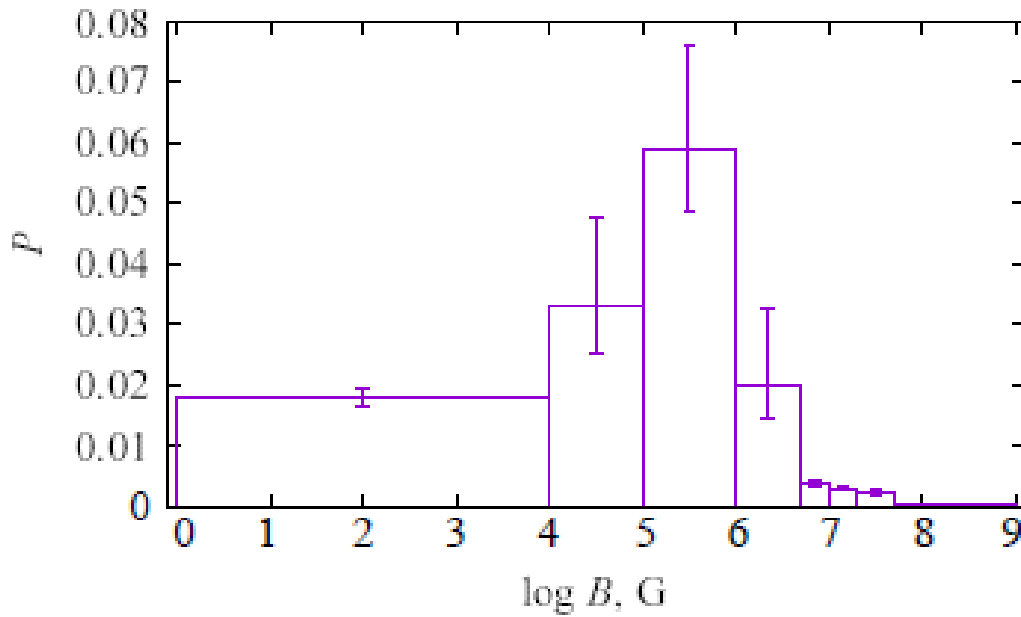


Рисунок 22: Вероятность p обнаружения магнитного поля с величиной поля B по данным каталога [13] и работы [15] для объектов с высокими и низкими напряженностями магнитных полей соответственно.

выше.

Функция магнитного поля и ее наблюдаемые версии по результатам обзоров разных авторов представлены на Рис. 21 и 22, где приведены также ссылки на соответствующие публикации. Как можно видеть, увеличение статистики и условия, в которых делался тот или иной обзор, ведут к небольшому различию результатов. В том случае, когда авторами обзоров не ставилась задача пространственного ограничения выборки (например, [13]), частота встречаемости белых карликов в области сильных магнитных полей получалась заниженной. Однако при условии ограничения выборки (в области радиусом 20 пк в окрестностях Солнца [15]) частоты вероятностного распределения БК в сильномагнитной области совпали с проведёнными в САО раньше [54-55] исследованиями. Этот эффект, очевидно, связан с селекцией выборок. В то время как выборки в ограниченном объеме являются более или менее однородными, отсутствие такого ограничения приводит к переизбытку в выборке ярких (горячих, молодых) БК. Согласно исследованиям [1, 40, 54-55] и ряда других авторов, частота встречаемости МБК с сильными магнитными полями среди ярких

(горячих, молодых) БК в три–четыре раза ниже, чем среди слабых (холодных, старых) звезд этого типа. Этим, с одной стороны, и объясняется разница результатов в сильномагнитном конце распределений. С другой стороны, это независимо подтверждает реальность существенного различия в частотах встречаемости среди старых и молодых МБК.

Наиболее интересным из анализа распределений, показанных на Рис. 21, является общий для всех представленных обзоров факт отклонения от степенной зависимости, полученной в работах [54-55], в сторону уменьшения вероятностей нахождения МБК в слабомагнитной области для полей величиной менее 100 кГс. В этой области [54-55] не располагали достаточным набором данных и экстраполировали общую степенную зависимость, имея главным образом лишь ее верхние пределы. На сегодняшний день в этой области достаточно данных, чтобы с уверенностью констатировать отклонение MFF от степенной зависимости. Это очевидно из гистограммы, приведенной на Рис. 22. Гистограмма показывает, что МБК не являются сильномагнитным «хвостом» общего монотонного распределения по магнитным полям, а, скорее, они составляют выделенную популяцию БК - около 10% (например, [95]) - с особым эволюционным статусом, отличающимся от остальных 90% белых карликов, у которых вообще не обнаруживаются магнитные поля. Тем не менее, несмотря на кажущуюся очевидность вывода об обособленной популяции, эта идея, по мнению автора диссертации, ошибочна. На наш взгляд, все БК распределены по величинам их магнитных полей монотонно, в соответствии со степенным законом, представленным на Рис. 21, как это было описано [54-55]. Наблюдаемый «завал» в слабомагнитной области есть не более чем результат наблюдательной селекции, суть которого объяснена ниже.

4.3. Результаты

Мы не нашли признаков существования стабильных магнитных полей у WD 1105–048 и WD 1647+591, исследования которых проводились в CAO РАН и в

других обсерваториях. По всей видимости, глобальных магнитных полей у этих звезд нет, но ряд измерений свидетельствует о наличии локальных магнитных полей. Общей чертой, отличающей эти БК от других, является регистрируемое у них, видимо, спорадическое магнитное поле с величинами менее 10 кГс [50]. По нашему мнению, эта особенность связана с тем, что для магнитного поля величиной менее нескольких десятков килогаусс плотность их энергии становится меньше плотности энергии газа на уровне фотосферных внешних слоев БК. По этой причине внешние атмосферные части регулярной магнитосферы МБК теряют свою полоидальную симметрию и фрагментируются, проявляясь в поляриметрических исследованиях лишь спорадически, то есть магнитные поля продолжают существовать, но становятся ненаблюдаемыми в поляризационной моде.

Это предположение поддерживается и наличием «завала» в слабомагнитной области MFF (Рис. 21 и 22). По нашему мнению, этот «завал» имеет селекционную природу, и популяция МБК (Рис. 22) есть не что иное, как популяция БК, у которых регулярность внешних магнитосфер поддерживается энергией их магнитного поля. Уменьшение практически до нуля числа МБК в слабомагнитной части гистограммы объясняется отсутствием глобальной симметрии геометрии их магнитного поля, что делает неэффективными поляриметрические наблюдения, которые требуют наличия такой симметрии. Так, например, глобальное магнитное поле Солнца составляет 1 Гс, в то время как в пятнах оно может достигать 100–1000 Гс. Дальнейший прогресс наблюдений МБК в области слабых полей лежит, по нашему мнению, в проведении мониторинговых спектральных наблюдений с высоким спектральным разрешением. В таких наблюдениях магнитное поле можно пытаться детектировать по наблюдениям форм центральных не-ЛТР профилей водородной линии $H\alpha$.

Положение, выносимое на защиту:

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 степенной зависимостью. В области более слабых полей зависимость нарушается, демонстрируя селекционный спад. Показано, что селекция вызвана геометрическим усложнением структур глобальных магнитных полей малой напряженности динамическими процессами в поверхностных слоях белых карликов.

Глава 5. Экспериментальное подтверждение замедления остывания магнитной жидкости с подавленной внешним магнитным полем конвекцией

5.1. Введение

Белый карлик представляет собой финальный этап эволюции звезд малых масс. В том случае, когда у него нет звезды-компаньона, белый карлик не имеет притока энергии и, соответственно, в ходе своей эволюции может только остывать. Таким образом, количество энергии, которое было запасено в ядре звезды на этапе нахождения ее на Главной последовательности и в стадии красного гиганта определяет срок его жизни. А мерой возраста белого карлика может выступать поверхностная температура.

В рамках данного исследования жизнь белого карлика можно разделить на две фазы: первая — энергия к атмосфере доставляется только лучистым переносом (температура поверхности выше 10 000 K), и вторая, когда в податмосферном слое возникает конвективный перенос энергии.

В первой фазе магнитное поле не влияет на перенос энергии, и магнитный белый карлик остывает так же, как и обычный. Во второй фазе магнитное поле подавляет конвекцию, и в результате проявляется фотометрическая переменность, связанная с пятнами [1, 46], происходит общее снижение яркости и накопление МБК в области низких температур/возрастов. Такова наблюдаемая картина особенностей при эволюционном остывании МБК.

Между тем, теории остывания белых карликов в присутствии экстремально сильных магнитных полей на данный момент не существует.

Таким образом, представленные выше рассуждения о влиянии подавления конвекции являются эмпирическими. В связи с этим нами была поставлена задача смоделировать процесс уменьшения теплопроводности токопроводящей жидкости при подавлении конвекции магнитным полем в лабораторных условиях. Эксперимент проводился на базе Северо-Кавказского федерального университета. Результаты эксперимента при участии автора опубликованы в работе [127]. Ниже приводится историческая справка в области подобных экспериментов и делаются вводные замечания к эксперименту.

5.2 Историческая справка и вводные замечания к эксперименту

Задача состояла в наблюдении за развитием тепловой неустойчивости плоского горизонтального слоя электропроводящей жидкости, нагреваемой снизу, в условиях приложенного магнитного поля и без него. Подобные теоретические исследования [128] и эксперименты [129] показали, что развитие неустойчивости в электропроводящих жидкостях зависят от величины приложенного магнитного поля, пропорционально увеличивая критическое число Рэлея. В частности, критическое число Рэлея возрастает, если поле ориентировано перпендикулярно тепловому потоку. Дальнейшее развитие этих исследований для задач с различными материалами и пространственной геометрией было представлено в ряде работ (например, [130–134]).

Другим способом изучения влияния магнитного поля на параметры тепловой конвекции является использование электрически непроводящих слабомагнитных (пара- и диамагнитных) жидкостей. Различные проявления термомагнитной конвекции слабомагнитных жидкостей подробно исследованы экспериментально, теоретически и расчетно в ряде работ (например, [135–139]).

Недостатком использования проводящих жидкостей, а также слабомагнитных жидкостей с целью регулирования тепловой конвекции является

необходимость применения сильных магнитных полей, создание которых в протяженной области пространства может быть проблематичным. Поэтому внимание исследователей привлекает использование композитных наножидкостей, обладающих интересными свойствами, не характерными для классических жидких сред [140–144]. Это относится, в частности, к магнитным наножидкостям. Магнитная наножидкость — это искусственный материал, представляющий собой коллоидную дисперсию сверхмелких ферро- или ферромагнитных наночастиц со средним размером около 10 нм. Магнитные наночастицы стабилизируются поверхностно-активными веществами, чтобы предотвратить их агрегацию. Магнитные наножидкости могут сохранять стабильность в течение длительного времени и используются в различных технологических процессах (магнитожидкостное газопылеулавливание, линейный вибрационный двигатель, разделение руды, слуховые аппараты, адресная доставка лекарств, магнитная гипертермия и др.) [145]. В контексте задач теплообмена и гидродинамики ключевой особенностью магнитных наножидкостей является наличие дополнительной объемной силы, определяемой локальной намагниченностью и градиентом магнитного поля. Это создает привлекательные перспективы для использования магнитных наножидкостей в охлаждающих устройствах и теплообменниках.

Установлен факт влияния магнитного поля на критические параметры запуска тепловой конвекции в магнитных наножидкостях. Кроме того, магнитное поле приводит к изменению картины конвективного течения в магнитных наножидкостях. Классические результаты по термомагнитной конвекции в магнитных наножидкостях обобщены в [146–147]. Современные исследования в этой области сосредоточены в основном на различных геометриях систем, составе наножидкостей и конфигурациях приложенного магнитного поля (см., например, [148–154]). В частности, установлено, что градиент магнитного поля играет ключевую роль в механизме термомагнитной конвекции. Градиент магнитного поля может быть связан с неравномерностью приложенного внешнего магнитного поля. Внешнее однородное магнитное поле может стать неоднородным в полости,

заполненной магнитной наножидкостью, из-за преломления силовых линий магнитного поля на границе образца. Градиент магнитного поля может создаваться и в результате неоднородности магнитных свойств неравномерно нагретой магнитной наножидкости. Но в значительном числе практических случаев приходится иметь дело с однородными внешними магнитными полями, поэтому в данной работе будет рассмотрен именно такой случай. В большинстве существующих исследований сообщается об увеличении теплопередачи в результате действия магнитного поля. В меньшем количестве исследований обсуждается подавление переноса тепла в магнитных наножидкостях в присутствии магнитного поля [154-155]. Настоящее исследование, в том числе, сосредоточено на возможностях снижения теплопередачи магнитным полем, что является нашей основной целью в контексте изучения теплопроводности внешних слоев МБК.

Среди многообразия возможных геометрий системы обращает на себя внимание базовый случай плоского квазидвумерного прямоугольного слоя магнитной наножидкости («квазидвумерным» он назван потому, что прямоугольный слой имеет некоторую, хоть и небольшую, толщину). Влияние внешнего однородного магнитного поля на конвекцию в вертикальном квазидвумерном прямоугольном слое нагреваемой снизу магнитной наножидкости рассмотрено в работах [156–159]. Авторами рассмотрен только случай магнитного поля, параллельного градиенту температуры. В нашей работе [127] рассмотрен плоский вертикальный квазидвумерный прямоугольный слой магнитной наножидкости, нагреваемый снизу, что позволяет в том числе визуализировать картину динамики конвекции. Далее рассмотрен случай магнитного поля, ориентированного только перпендикулярно градиенту температуры. Этого достаточно в контексте качественного описания картины подавления конвекции МБК.

Следует отметить, что в существующих исследованиях преобладающее внимание уделялось стационарным режимам конвективного теплообмена и тем более динамике развития и затухания конвекции в магнитных наножидкостях в

присутствии магнитного поля [160]. В настоящей главе, однако, основной акцент сделан на процессах развития конвекции при включении нагрева и последующем затухании конвекции при выключении нагрева. В частности, рассмотрена динамика нагрева и охлаждения металлических пластин в магнитной наножидкости без и под действием внешнего магнитного поля. Такой эксперимент (вторая его часть, связанная с отсутствием внешнего подогрева системы) в какой-то мере описывает процесс контроля внешней конвекции магнитным полем эволюционно остывающим белым карликом.

5.3. Методика эксперимента

В нашем эксперименте [127] мы использовали электростатически стабилизированную магнитную наножидкость на водной основе с диспергированными наночастицами магнетита размером около 10 нм. Измеренные свойства магнитной наножидкости: плотность 1100 кг/м^3 , динамическая вязкость $1.3 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, начальная статическая магнитная восприимчивость 0.22, намагниченность насыщения 3.9 кА/м (кривая намагниченности на Рис. 23), теплопроводность $0.6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а электропроводность $1.1\cdot 10^{-2} \text{ См/м}$. Плотность измеряли на вибрационном плотнометре («Термекс», Томск, Россия), вязкость – на ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1 (RHEOTEST Medingen GmbH, Ottendorf Okrilla, Германия), теплопроводность – на измерителе теплопроводности DTC-300 (TA) (Instruments, New Castle, DE, USA) и электропроводность – с помощью анализатора импеданса 6510B (Wayne Kerr, Bognor Regis, UK). Размер наночастиц определяли с помощью спектрометра динамического и статического светорассеяния «Фотокор Комплекс» (Фотокор, Москва, Россия).

Для изучения конвективного теплообмена в магнитной наножидкости использовали экспериментальную установку, показанную на Рис. 24. Магнитная наножидкость формировала слой длиной по горизонтали 8 см, по вертикали 1 см и толщиной 2 мм. Снизу и сверху слой был ограничен алюминиевыми пластинами.

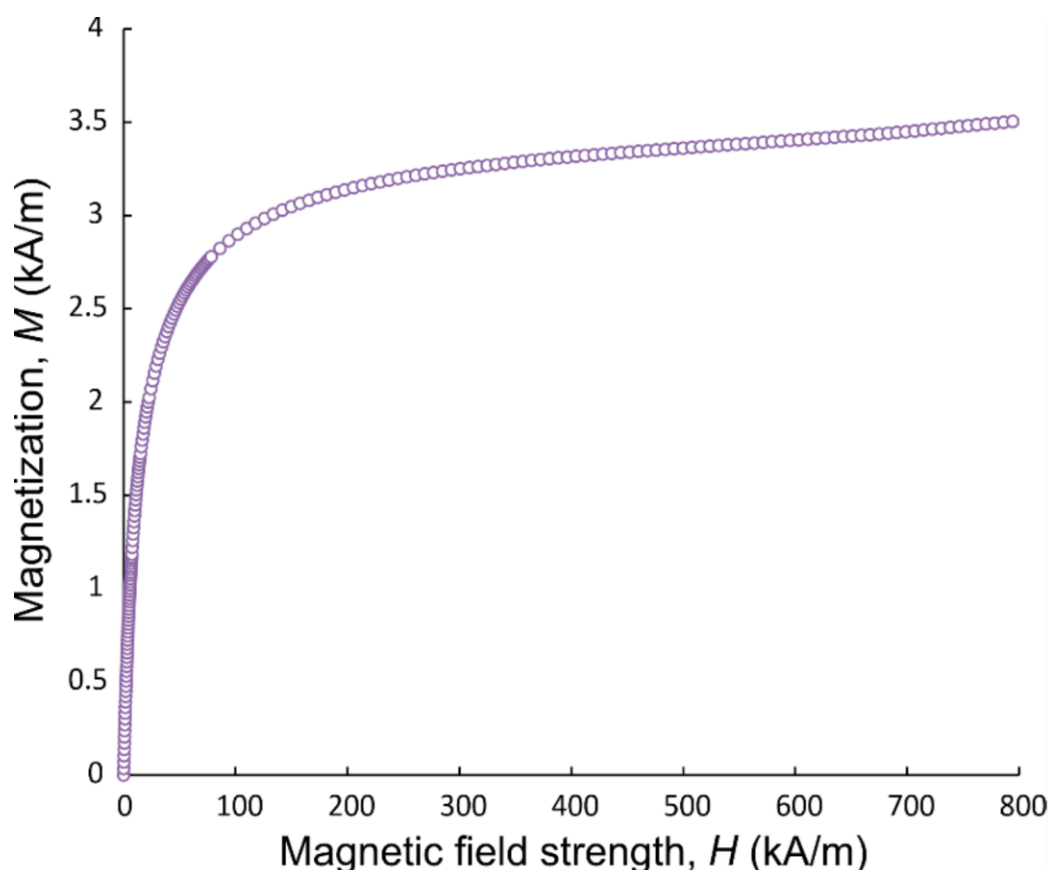


Рисунок 23: Кривая намагничивания магнитной наножидкости, использованной в эксперименте.

С тыльной стороны слой ограничивался плексигласовой пластиной, фиксирующей всю конструкцию измерительной ячейки. Спереди слой магнитной наножидкости был ограничен тонкой пленкой, прозрачной для инфракрасного излучения. Исследуемый слой магнитной наножидкости можно рассматривать как квазидвумерный. Резисторы в керамическом корпусе были плотно прижаты к нижней алюминиевой пластине. Нижняя алюминиевая пластина нагревалась за счет пропускания электрического тока через резисторы. В описываемых экспериментах создавалась мощность нагрева 55 Вт. Нижний конец верхней алюминиевой пластины контактировал с магнитной наножидкостью, а остальная часть этой пластины контактировала с окружающим воздухом и дополнительно не термостатировалась. Таким образом, она работала как пассивный излучатель.

Проанализирован процесс передачи тепла от нижней пластины к верхней при включенном нагреве нижней пластины, а также процесс охлаждения нижней

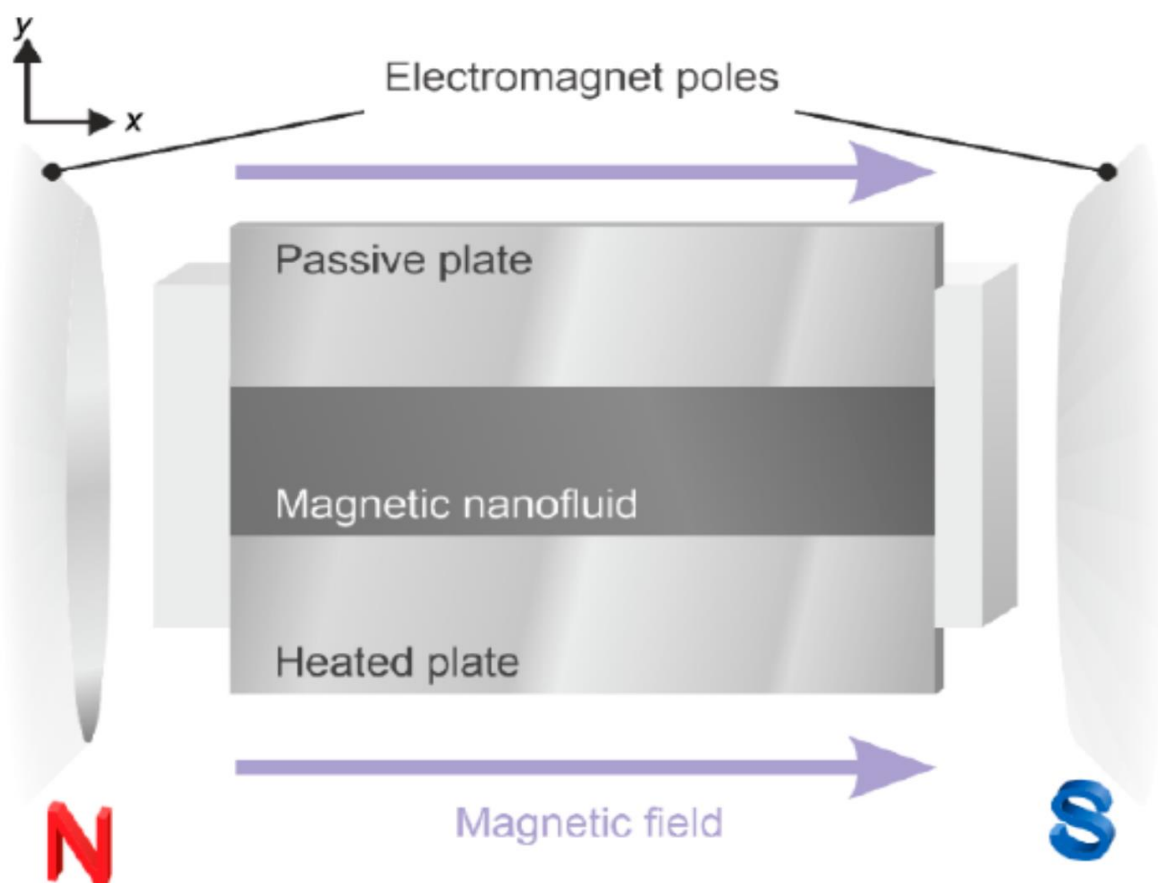


Рисунок 24: Схема экспериментальной установки.

пластины при выключенном нагреве. Изучение теплового режима и измерения распределения температуры в ячейке проводились с помощью тепловизора Flir E8 (FLIR Systems, Wilsonville, OR, USA). Для изучения влияния внешнего магнитного поля измерительную ячейку помещали между полюсами электромагнита. Электромагнит с питанием от источника постоянного тока создавал однородное статическое магнитное поле в направлении, перпендикулярном тепловому потоку в ячейке и параллельном слою магнитной наножидкости. Напряженность магнитного поля измерялась с помощью гауссметра модели 425 (Lake Shore Cryotronics, Westerville, OH, USA). Относительное отклонение магнитного поля от однородного в области расположения магнитной наножидкости не превышало 2%.

5.4. Результаты

Обнаружено, что при нагреве нижней пластины электрическим током силой выше некоторого критического значения в магнитной наножидкости происходит развитие конвективных течений. Дальнейшие исследования проводились при фиксированном значении силы тока, превышающем это критическое значение. Нижняя пластина со временем постепенно нагревалась током в резисторах, и при достижении определенной разности температур между нижней и верхней пластинами возникал конвективный поток. Было обнаружено, что приложение магнитного поля, перпендикулярного градиенту температуры в ячейке, подавляет конвекцию. Таким образом, если к магнитной наножидкости, в которой развилась тепловая конвекция, приложить магнитное поле, то это приведет к размытию конвективных потоков, дезинтеграции конвективной картины и формированию более равномерного распределения теплового поля в ячейке. Эксперимент проиллюстрирован на Рис. 25.

Были построены зависимости температуры нижней (T_b) и верхней (T_t) алюминиевых пластин электролизера от времени при нагреве нижней пластины. Первоначально исследования проводились в отсутствие магнитного поля. На Рис. 26 показана временная зависимость температуры поддона, измеренная после включения нагрева. Видно, что температура достигает некоторого стационарного значения. Было замечено, что повышение температуры верхней пластины значительно ускоряется, когда в системе развивается тепловая конвекция. В условиях эксперимента это происходило примерно через 2 мин. после начала нагрева (Рис. 27). Разница температур между нижней и верхней пластинами увеличивается до тех пор, пока не разовьется конвекция. Это связано с тем, что нижняя пластина нагревается электрическим током значительно быстрее, чем происходит отток тепла за счет теплопроводности. После развития конвекции разность температур между нижней и верхней пластинами начинает уменьшаться до тех пор, пока не установится стационарная разность температур между пластинами (Рис. 28).

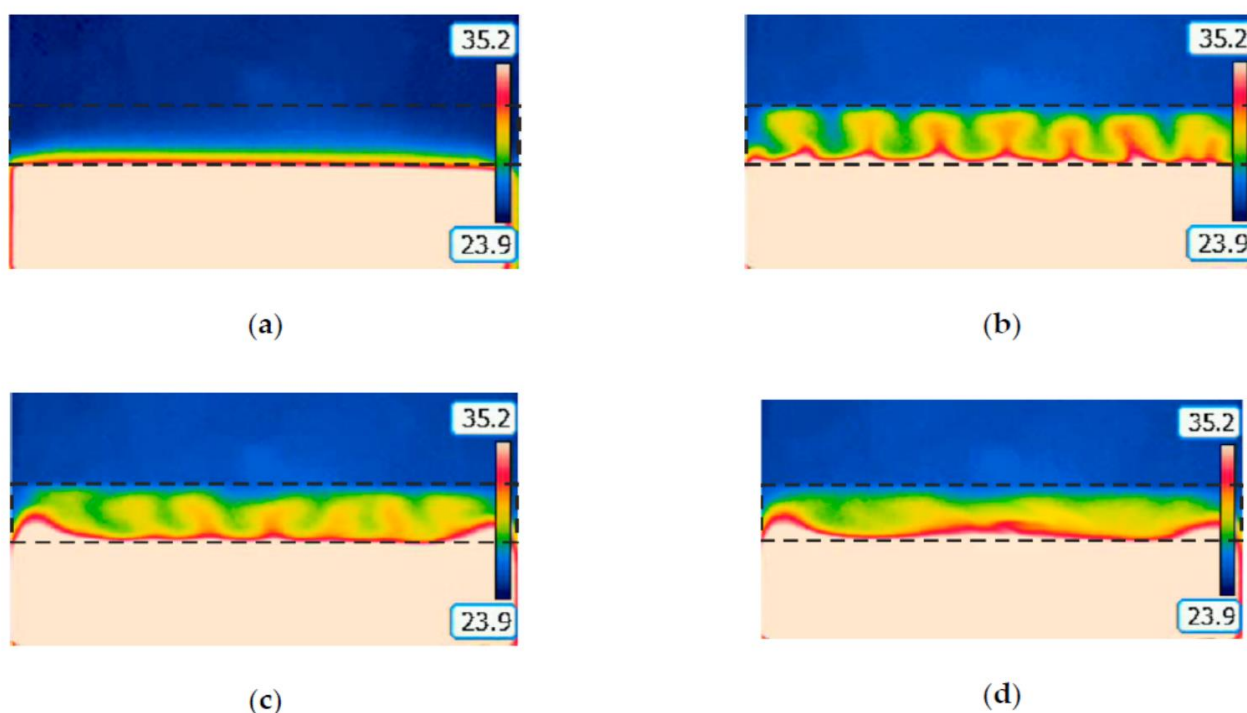


Рисунок 25: Инфракрасное изображение распределения температуры в кювете с магнитной наножидкостью: (a) – равномерное распределение температуры (в горизонтальном направлении) через 1 мин. после начала нагрева; (b) – картина развитой тепловой конвекции через 2.5 мин. после начала нагрева в отсутствие магнитного поля; (c) – картина через 5 с после включения магнитного поля при продолжающемся нагреве; (d) – картина через 12 с после включения магнитного поля при продолжающемся нагреве. Магнитное поле приложено горизонтально в плоскости рисунка; напряженность магнитного поля $H = 135$ кА/м. Площадь магнитной наножидкости указана пунктирной линией.

Эксперименты показали, что наличие магнитного поля задерживает начало конвекции. Конвекция развивается через более длительный промежуток времени по сравнению с аналогичным случаем в отсутствие магнитного поля. При достаточно больших напряженностях магнитного поля (H) может произойти полное торможение развития конвекции. В результате торможения конвекции магнитным полем замедляется передача тепла от нагретой нижней пластины к пассивной верхней пластине ячейки. Это приводит к тому, что температура нижней пластины выше (см. Рис. 26), а температура верхней пластины ниже (см. Рис. 27) соответствующих значений при отсутствии поля. Из-за подавления

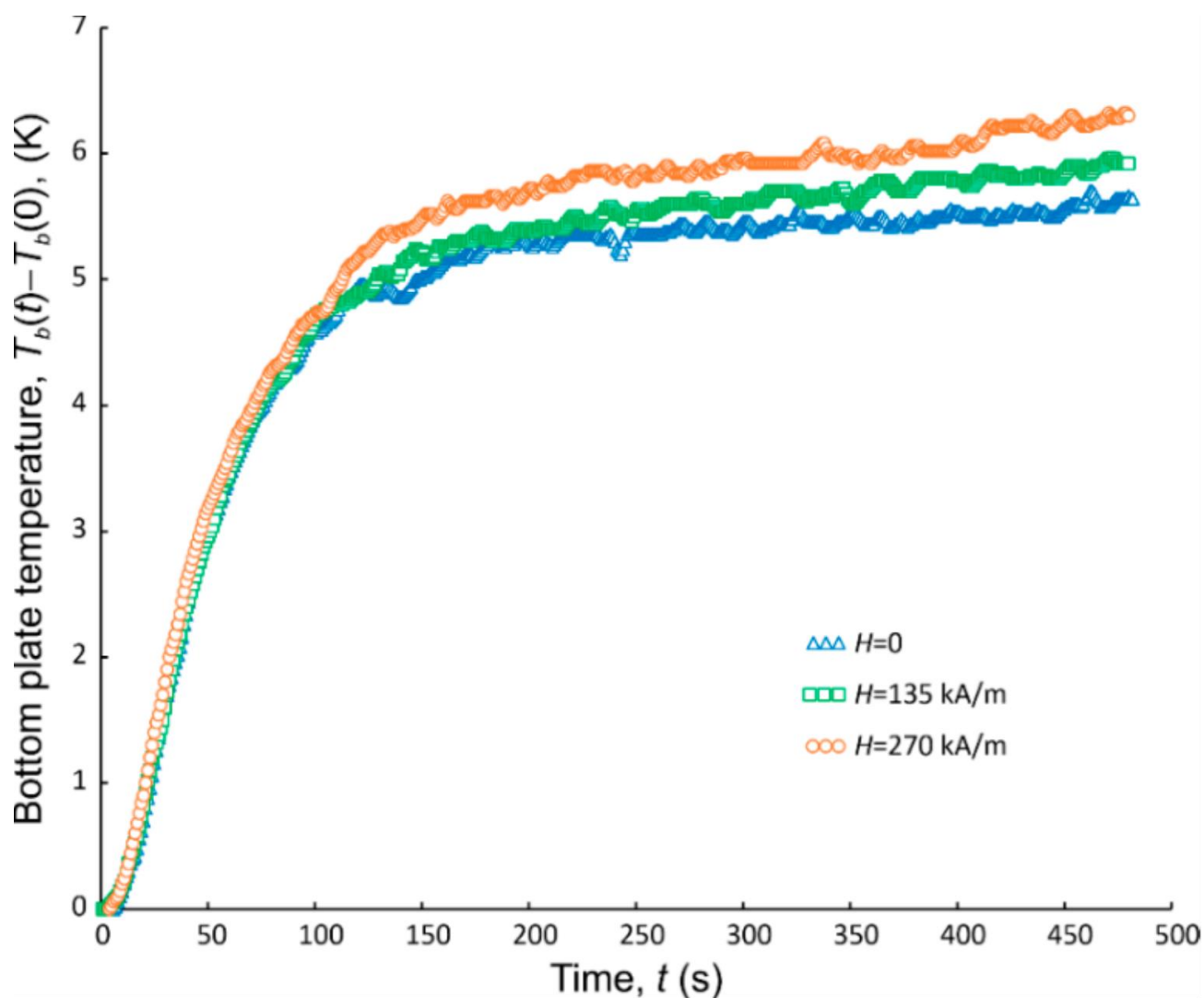


Рисунок 26: Зависимость температуры нижней (нагреваемой) алюминиевой пластины ячейки от времени после включения нагрева.

конвекции магнитным полем исчезает спадающий участок зависимости на Рис. 28. Разность температур между нижней и верхней пластинами ячейки достигает стационарного значения (значительно выше, чем в отсутствие магнитного поля), когда приток тепла от нагревателей нижней пластины уравнивается оттоком тепла за счет теплопроводности. Исследован процесс охлаждения поддона ячейки в зависимости от влияния внешнего магнитного поля. Для этого нижнюю пластину предварительно нагревали в отсутствие магнитного поля до состояния устойчивой тепловой конвекции в магнитной наножидкости. После этого нагрев выключался и одновременно включалось магнитное поле. В отсутствие магнитного поля после выключения нагрева некоторое время сохранялась

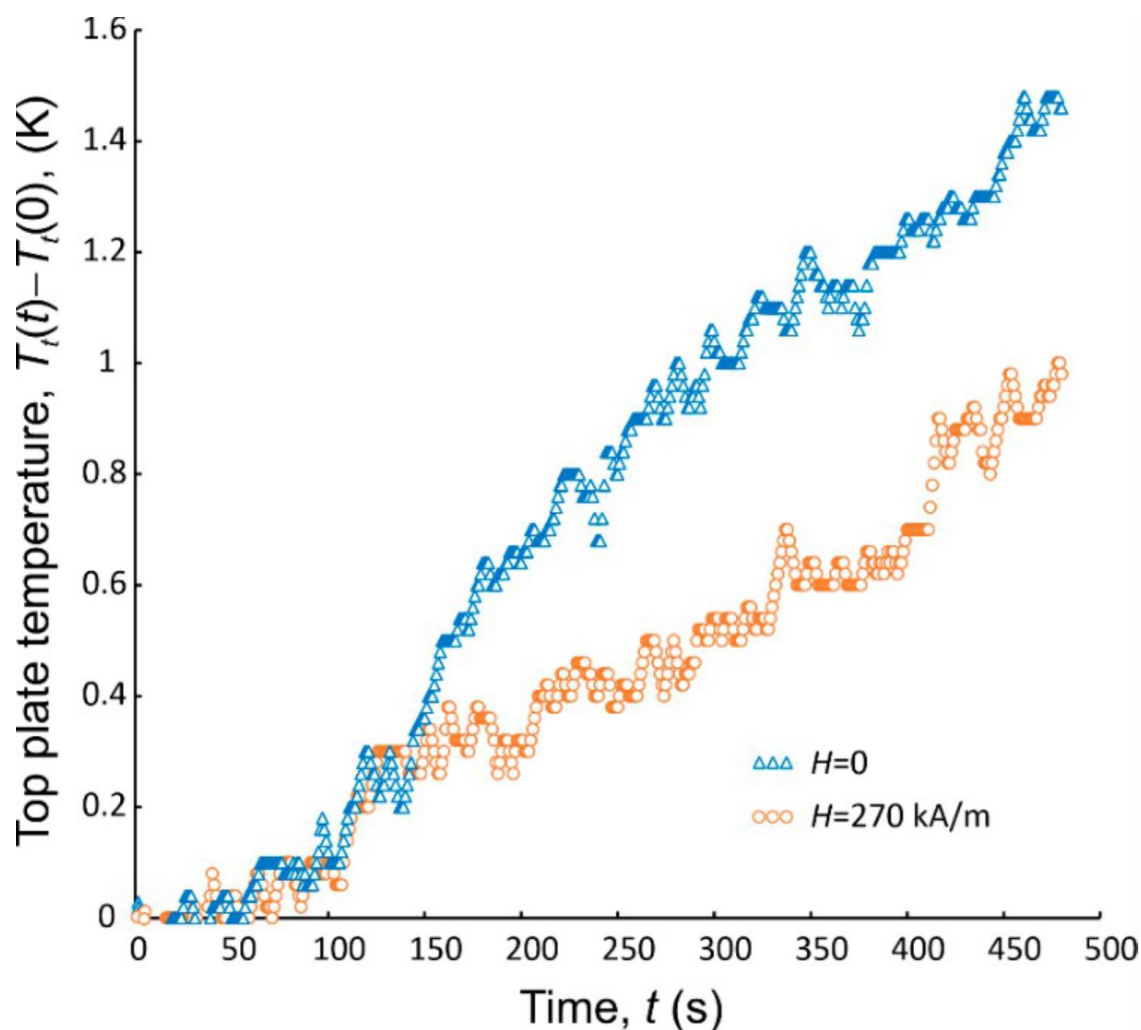


Рисунок 27: Зависимость температуры верхней (пассивной) алюминиевой пластины от времени после включения нагрева.

тепловая конвекция, обеспечивающая более интенсивное охлаждение поддона. Подавление конвекции магнитным полем замедляло процесс охлаждения. Чтобы продемонстрировать этот эффект, была измерена разница температур между нижней и верхней пластинами ячейки в зависимости от времени (Рис. 29). Различие скорости охлаждения нагретой пластины в магнитном поле и в отсутствие поля также продемонстрировано на Рис. 30, на котором показана временная зависимость скорости изменения разности температур нижней и верхней пластин ячейки. Для получения зависимостей, представленных на Рис. 30, данные, представленные на Рис. 29, были аппроксимированы полиномиальными функциями, а затем численно найдена производная этих функций.

Следует отметить, что влияние магнитного поля на тепловую конвекцию в

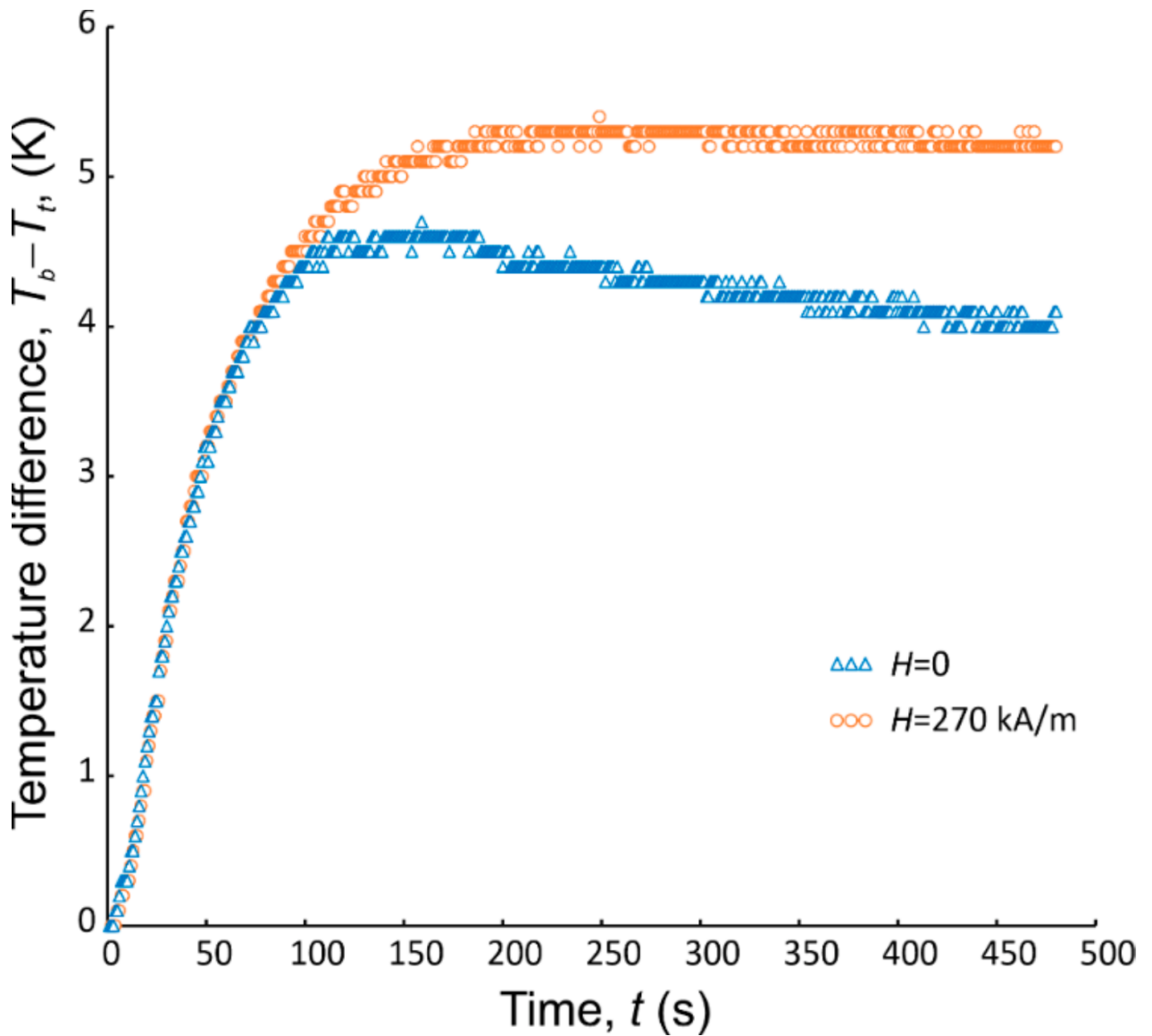


Рисунок 28: Разница температур между нижней и верхней пластинами при нагреве нижней пластины в зависимости от времени.

чистой воде в условиях экспериментов не наблюдалось.

5.5. Обсуждение результатов

Исследуемое квазидвумерное конвективное течение магнитной наножидкости также можно рассматривать как течение Хеле-Шоу. Естественная конвекция магнитной наножидкости в прямоугольной ячейке Хеле-Шоу описывается следующими уравнениями [156–159]:

$$\nabla u = 0 \quad (5)$$

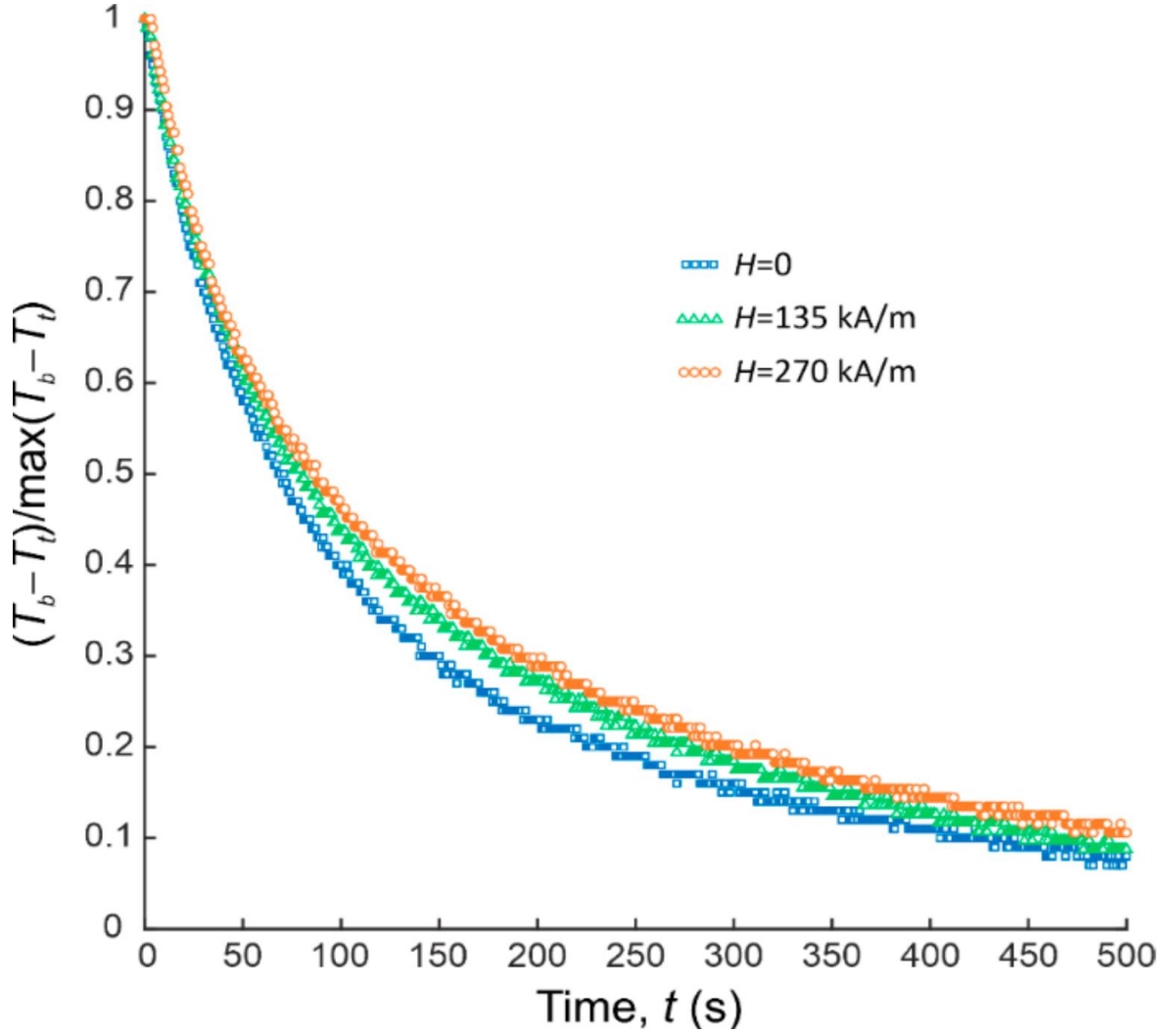


Рисунок 29: Зависимость от времени нормированной разности температур между нижней и верхней пластинами ячейки в процессе охлаждения.

$$\nabla p = \frac{-12\eta}{h^2}u + \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]g + \mu_0(M\nabla)H \quad (6)$$

$$\rho_0 C \frac{dT}{dt} + \mu_0 T \frac{\partial M}{\partial T_{V,H}} \frac{dH}{dt} = \lambda \nabla^2 T \quad (7)$$

$$\nabla B = 0, B = \mu_0(M + H) \quad (8)$$

где η — вязкость, ρ — плотность, α - коэффициент объемного расширения, μ_0 - магнитная постоянная, C - удельная теплоемкость, λ - теплопроводность, M - намагниченность, h - толщина ячейки. Эти уравнения отличаются от уравнений, описывающих конвекцию обычной жидкости, наличием членов, характеризующих магнитное поле и намагниченность среды. Влияние этих магнитных членов на результирующее поведение жидкой среды подробно рассмотрено, например, в [146]. В частности, было показано, что в случае, когда

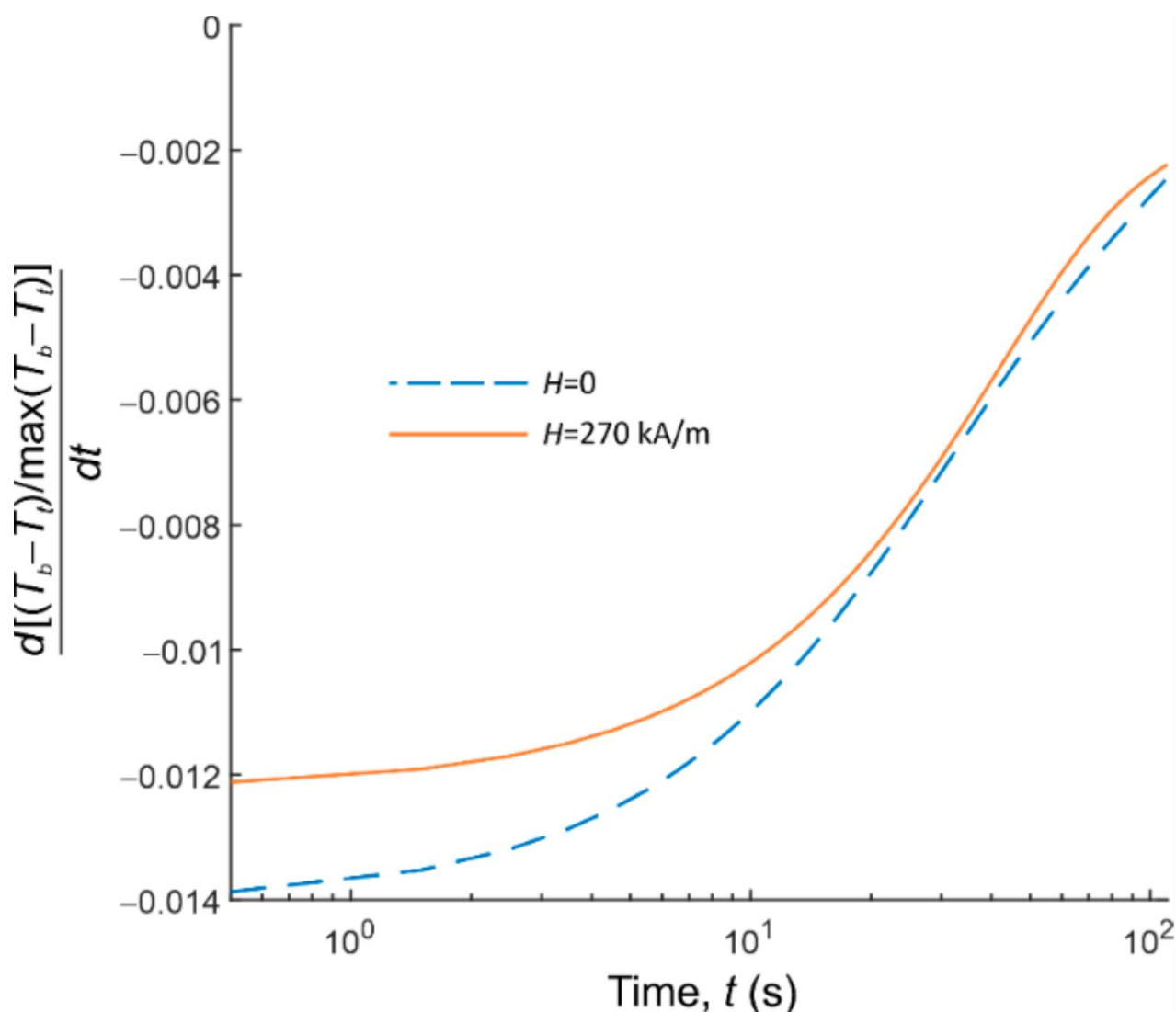


Рисунок 30: Зависимость от времени скорости изменения нормированной разности температур между нижней и верхней пластинами ячейки в процессе охлаждения.

градиент магнитного поля противоположен градиенту температуры в среде, это приводит к подавлению конвекции. В рассматриваемом случае градиент магнитного поля создается неоднородностью намагниченности магнитной наножидкости, возникающей из-за неоднородного распределения температуры в среде. Нижние, более нагретые слои магнитной наножидкости в условиях эксперимента имеют меньшую намагниченность, чем верхние слои. В результате градиент магнитного поля направлен противоположно градиенту температуры.

Абсолютная погрешность экспериментальных измерений, представленных в данной работе, характеризуется величиной разброса точек на соответствующих

зависимостях. Для контроля точности полученных результатов все представленные в работе зависимости измерялись трижды. В результате была установлена воспроизводимость экспериментальных данных в пределах относительной погрешности 5%. Следует отметить, что интерпретация полученных результатов осложняется тем, что в условиях описываемых экспериментов ощутимая часть теплового потока от горячих тел уходит в окружающее пространство и конструктивные элементы измерительной ячейки, а не только в магнитную наножидкость. Однако поток тепла через магнитную наножидкость по-прежнему остается преобладающим, и полученные качественные закономерности и основные результаты можно считать правильными.

Относительно результатов, полученных при охлаждении нагретой пластины в магнитном поле в магнитной наножидкости, следует отметить, что в определенной степени подобные исследования были представлены в [161]. Однако, в отличие от текущей работы, в [161] изменение скорости охлаждения нагретого объекта было связано с изменением теплопроводности магнитной наножидкости в магнитном поле за счет образования микроструктуры в ней. Наблюдения с помощью оптического микроскопа не выявили образования заметной микроструктуры в магнитной наножидкости, использованной в описанных выше наших экспериментах. Для дальнейшего исключения возможности влияния изменения теплопроводности магнитной наножидкости на результаты и выводы, полученные в данном исследовании, были проведены прямые измерения теплопроводности магнитной наножидкости с помощью измерителя теплопроводности DTC-300 (TA Instruments). Измерение не выявило заметных изменений теплопроводности под действием магнитного поля для нашего образца магнитной наножидкости. Можно сделать вывод, что описанные в данной работе эффекты связаны именно с подавлением магнитным полем конвекции в магнитной наножидкости.

Развитие тепловой конвекции носит пороговый характер и происходит при превышении критического значения градиента температуры. Также хорошо

известно, что магнитное поле, действующее перпендикулярно градиенту температуры в слое магнитной наножидкости, увеличивает пороговый уровень возникновения конвекции [146-147], что качественно согласуется с эффектами, наблюдаемыми в текущей работе. Однако все это относится к условиям потери устойчивости и нарушения стационарного режима конвекции в слое магнитной наножидкости. Рассматриваемая в данной работе динамика развития и затухания конвекции не может быть объяснена на качественном уровне в терминах и понятиях, использовавшихся в предыдущих исследованиях. Это требует всестороннего рассмотрения динамической проблемы, что является стимулом и мотивацией для дальнейших исследований в этом направлении.

Основные результаты данного исследования заключаются в установлении того факта, что магнитное поле не только влияет на критические условия возникновения конвекции, но и может тормозить ее развитие. Торможение конвекции приводит к тому, что теплообмен через магнитную наножидкость в магнитном поле снижается по сравнению с теплообменом в отсутствие поля. Это отражается как в динамике нагрева изначально холодных объектов, так и в динамике охлаждения изначально горячих объектов в магнитной наножидкости. Возможность управления теплопередачей с помощью магнитного поля в жидкостных системах может быть очень полезной во многих технологических приложениях, таких как охлаждающие устройства для электроники, теплообменники и техника в условиях невесомости. Помимо непосредственного интереса к предметной области магнитных наножидкостей, результаты, полученные в данной работе, можно рассматривать как модели для понимания процессов, происходящих в других системах, в которых имеет место конвективный перенос, осложненный влиянием внешних магнитных полей.

В контексте данного исследования результаты, описанного выше эксперимента, имеют важное значение. Так как не существует теории остывания МБК, высказанное предположение о магнитной природе торможения эволюции в [1] и модели, описанные в главе 2, являются эмпирическими. Таким образом, эксперимент является качественным описанием происходящего на МБК процесса

охлаждения.

Масштабируя модель эксперимента на белый карлик, получаем, что разность температур между поверхностью и недрами больше в том случае, если в системе присутствует магнитное поле. Кроме того скорость изменения разности температур в случае подавленной конвекции меньше, чем при отсутствии подавления. В итоге холодные МБК с сильными магнитными полями, которые контролируют конвекцию по всей поверхности, будут дольше остывать, что приведёт к накоплению этих звезд в «холодной» области их общего температурного (эволюционного) распределения. Этот эффект известен из наблюдений и описан в главе 3.

Заключение

Магнитные свойства белых карликов исследуются уже более 50 лет. Однако, несмотря на достигнутый прогресс, теории остывания белого карлика в присутствии сильных магнитных полей до сих пор не существует, и некоторые особенности статистических распределений этих звезд по их фундаментальным параметрам остаются без объяснений. В частности, попытки объяснения повышения частоты встречаемости МБК в «холодной» области их температурного распределения бóльшими массами таких белых карликов не нашли подтверждения. Это показано в настоящей диссертации. Если смоделировать частоту встречаемости МБК, используя только известное распределение этих звезд по массам и классическую модель остывания немагнитного белого карлика, то результирующая кривая не описывает наблюдательных данных.

Учет дополнительных процессов в модели позволяет описать имеющиеся наблюдательные данные. При включении в модель торможения конвекции магнитным полем в процессе остывания БК можно объяснить повышение частоты встречаемости МБК, но только в области самых низких температур. В то же время учет переменной частоты рождения МБК относительно БК в зависимости от возраста Галактики даёт рост в нужном диапазоне звездных величин, но недостаточно большой. При включении в модель обоих дополнительных параметров получившаяся кривая наилучшим образом описывает наблюдательные данные.

Для независимого подтверждения вывода о влиянии глобального подавления конвекции у МБК, на базе Северо-Кавказского Федерального университета был проведен эксперимент по торможению конвекции магнитным полем в нагретой магнитной жидкости. Эксперимент показал, что теплопередача значительно замедляется в случае подавленной конвекции. Масштабируя лабораторные условия на белый карлик, можно сделать вывод о существенном уменьшении передачи тепла от ядра звезды к поверхности. Таким образом,

магнитный белый карлик с подавленной конвекцией должен выглядеть существенно более холодным, чем немагнитный того же возраста и массы. Это приводит к увеличению частоты встречаемости МБК с низкими температурами.

Исследования, представленные в диссертации, посвященные подавлению конвекции магнитным полем, могут быть рассмотрены как первые шаги к созданию теории остывания МБК в присутствии сильных магнитных полей

Кроме того, в настоящей диссертации построены обновленные зависимости вероятностей встречаемости и количества МБК от напряженности их магнитного поля. В области напряженностей магнитных полей от одного мегагаусса и выше распределения в целом совпали с историческими, полученными в сериях работ Фабрики и Валявина. Анализируя полученные распределения, мы сделали вывод о непрерывном распределении белых карликов по напряженности магнитных полей. Таким образом, МБК являются самыми сильномагнитными объектами этого распределения, обладающими глобальными магнитными полями. При уменьшении напряженности магнитного поля в области менее одного мегагаусса наблюдается селекционный "завал" распределений. Селекция объясняется разрушением глобальной симметрии магнитного поля белого карлика при взаимодействии с его веществом, что при напряженностях менее десяти килогаусс делает такие поля трудно наблюдаемыми.

В рамках поляризационных исследований белых карликов получен новый наблюдательный материал для 19 звезд: четырех известных объектов с экстремально сильными магнитными полями и 15 объектов с неизвестными магнитными свойствами. Найдены три новых кандидата в магнитные белые карлики: LP 240–30, WD 1633+572, WD 0245+541. Сопоставив собственные наблюдения МБК с данными, полученными в CAO РАН, а также с литературными данными, мы получили численные оценки наблюдаемого времени стабильности магнитосфер шести звезд этого класса. Они составили от нескольких десятков до сотен и более лет. Наши результаты согласуются с гипотезой реликтовой природы поля МБК. Также высокое время стабильности магнитных свойств МБК позволит

использовать эти звезды в качестве стандартов круговой поляризации, списка которых на момент написания диссертации не существует.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю, исполняющему обязанности директора САО РАН Геннадию Геннадьевичу Валявину, под руководством которого была выполнена данная диссертация, своим коллегам из лаборатории исследования звездного магнетизма за содействие в работе и ценные советы, коллегам из группы обеспечения наблюдений за содействие в проведении наблюдений, на которых базируется данное исследование, соавторам из СКФУ за проведение эксперимента по торможению конвекции, своей семье — жене, родителям и брату за моральную поддержку во время написании диссертации.

Список литературы

- [1] 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.
- [2] Discovery of Circularly Polarized Light from a White Dwarf / Kemp, J. C., Swedlung, J. B., Landstreet, J., et al. // Astrophysical Journal. – 1970. – vol. 161. – p. L77 – L79/
- [3] Adams, W. S. Annual Report of the Director of the Mount Wilson Observatory (1937-1938) / Adams W. S., Seahes, F. H.// Mount Wilson Observatory Annual Report. – 1938. – vol. 10. – p. 1-40.
- [4] Greenstein, J., Studies of the White Dwarfs. I. Broad Features in White Dwarf Spectra./ Greenstein, J., Matthews, M. S. // Astrophysical Journal. – 1957. – vol. 126. – p. 14-18.
- [5] Henry, J. R. W., On the magnetic field in the white dwarf GRW +70 8247./ Henry, J. R. W., O'Connell, R. F.// Astrophysical Journal. – 1984. – vol. 282. – p. L97- L98.
- [6] Henry, J. R. W., Hydrogen spectrum in magnetic white dwarfs : H alpha, H beta and H gamma transitions./ Henry, J. R. W., O'Connell, R. F.// Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1985. – vol. 97. – p. 333-339.
- [7] Stationary hydrogen lines in white dwarf magnetic fields and the spectrum of the magnetic degenerate GRW +70 8247 / Wunner, G., Roesner, W., Herold, H., et al. // Astronomy and Astrophysics. – 1985. – vol. 149. – p. 102-108.
- [8] Greenstein, J. L., The identification of hydrogen in GRW +70 8247/ Greenstein, J. L. // Astrophysical Journal. – 1984. – vol. 281. – p. L47-L50.
- [9] Greenstein, J. L., Futher identifications of hydrogen in GRW +708247 / Greenstein, J. L., Henry, R. J. W., O'Connell, R. F. // Astrophysical Journal, Part 2 - Letters to the Editor. – 1985. – vol. 289. – p. L25-L29.
- [10] Jordan, S., Models of white dwarfs with high magnetic fields / Jordan, S.// Astronomy and Astrophysics. – 1992. – vol. 265. – p. 570-576.

- [11] White dwarf and subdwarf stars in the Sloan Digital Sky Survey Data Release 16 / Kepler S. O., Koester D., Pelisoli I. et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society – 2021 – vol. 507. – issue 3 – p.4646-4660
- [12] Spectropolarimetric Survey of Hydrogen-rich White Dwarf Stars / Kawka A., Vennes S., Schmidt G. D., et al. // The Astrophysical Journal. – 2007. – vol. 654. – issue 1. – p. 499-520.
- [13] 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.
- [14] Putney, A., Magnetic white dwarf stars - a review / Putney, A., // ASp. Conf. Ser. 169, 11th European Workshop. on White Dwarfs/ под ред. S.- E. Solheim, E. G. Meistas. – 1999. – p. 195-205.
- [15] Bagnulo S., New insight into the magnetism of degenerate stars from the analysis of a volume-limited sample of white dwarfs / Bagnulo S., Landstreet J. D. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – vol. 507. – issue 4. – p. 5902-5951.
- [16] The magnetic and metallic degenerate G77-50. / Farihi, J., Dufour, P., Napiwotzki, R., et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society – 2011 – vol. 413. – issue 4 – p. 2559–2569.
- [17] Reid, I.N., Discovery of a Magnetic DZ White Dwarf with Zeeman-Split Lines of Heavy Elements. / Reid, I.N., Liebert, J., Schmidt, G.D. // The Astrophysical Journal. – 2001. – vol. 550. – issue 1. – p. L61–L63.
- [18] Kawka, A., The cool magnetic DAZ white dwarf NLTT 10480. / Kawka, A., Vennes, S. // Astronomy & Astrophysics. – 2011. – vol. 532. – id.A7. – pp. 8.
- [19] Kawka, A., The polluted atmospheres of cool white dwarfs and the magnetic field connection. / Kawka, A., Vennes, S. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2014. – vol. 439. – p. L90–L94.
- [20] Rotation period and magnetic field morphology of the white dwarf WD 0009+501 / Valyavin, G., Bagnulo, S., Monin, D., et al. // Astronomy and Astrophysics. – 2005. – vol. 439. – issue 3. – p. 1099-1106.

- [21] 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.
- [22] WD1953-011: a magnetic white dwarf with peculiar field structure / Maxted, P., Ferrario, L., Marsh, T. et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2000. – vol. 315. – issue 3. – p. L41-44.
- [23] 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.
- [24] Ferrario L., Magnetic fields in isolated and interacting white dwarfs / Ferrario L., Wickramasinghe D., Kawka A. //Advances in Space Research. – 2020. – vol. 66. – issue 5. – p. 1025-1056.
- [25] 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.
- [26] Vornanen, T., Photometry of two DQ white dwarfs. Search for spots / Vornanen, T., Berdyugin, A. // Astronomy & Astrophysics. – 2012. – vol. 544. – id.L6. – pp. 4.
- [27] Liebert, J., Is the Relative Frequency of Magnetic White Dwarfs Higher Among Cool Stars than Hot Stars? / Liebert, J., & Sion, E.// Astrophysical Letters. – 1979. – vol. 20. – p. 53-55.
- [28] Valyavin, G., White dwarfs magnetic fields evolution / Valyavin, G., & Fabrika, S. //ASp. Conf. Ser. 169, 11th European Workshop. on White Dwarfs/ под ред. S.- E. Solheim, E. G. Meistas. – 1999. – p. 206-213.
- [29] Nalezyty, M., A catalogue of isolated massive white dwarfs. Mass distribution of massive star / Nalezyty, M., & Madej, Yu. // Astronomy and Astrophysics. – 2004. – vol. 420. – p. 507-513.
- [30] The Cooling of CO White Dwarfs: Influence of the Internal Chemical Distribution / Salaris, M., Dominguez, I., Garcia-Berro, E., et al.// The Astrophysical Journal. – 1997. – vol. 486. – issue 1. – p. 413-419.

- [31] Schmidt, G., Rotation and Magnetism in White Dwarfs / Schmidt, G., & Northworthy, J. / *Astrophysical Journal*. – 1991. – vol. 366. – p. 270-276.
- [32] Angel, J. R. P., The magnetic fields of white dwarfs. / Angel, J. R. P., Borra, E. F., Landstreet, J. D. // *Astrophysical Journal, Suppl. Ser.* – 1981. – vol. 45. – p. 457-474.
- [33] Kawka, A., Ap. stars as progenitors of magnetic white dwarfs / Kawka, A., Vennes, S. // *The A-Star Puzzle*, held in Poprad, Slovakia, July 8-13, 2004. IAU Symposium, No. 224. Cambridge, UK: Cambridge University Press / под ред J. Zverko, J. Ziznovsky, S.J. Adelman, and W.W. Weiss. – 2004. – p. 879-885.
- [34] Wickramasinghe, D. T., The origin of the magnetic fields in white dwarfs / Wickramasinghe, D. T., Ferrario, L. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2005. – vol. 356. – issue 4. – p. 1576-1582.
- [35] Where Are the Magnetic White Dwarfs with Detached, Nondegenerate Companions? / Liebert, J., Wickramasinghe, D.T., Schmidt, G.D., et al.// *The Astronomical Journal*. – 2005. – vol. 129. – issue 5. – p. 2376–2381.
- [36] Enigmas from the Sloan Digital Sky Survey DR7 Kleinman White Dwarf Catalog. / Liebert, J., Ferrario, L., Wickramasinghe, D.T., et al. // *The Astrophysical Journal*. – 2015. – vol. 804. – issue 2. – article id. 93. – pp. 3.
- [37] Binary star origin of high field magnetic white dwarfs. / Tout, C.A., Wickramasinghe, D.T., Liebert, J., et al.// *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2008. – vol. 387. – issue 2. – p. 897–901.
- [38] Valyavin G. G., Evolution of magnetic fields of white dwarfs. / Valyavin G. G., Fabrika S. N. // *Bulletin of the Special Astrophysical Observatory*. – 1998. – vol. 45. – p. 69-83.
- [39] Kawka, A., Evidence of enhanced magnetism in cool, polluted white dwarfs. / Kawka, A., Vennes, S., Ferrario, L., et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2014. – vol. 482. – issue 4. – p. 5201–5210.
- [40] Liebert, J., The True Incidence of Magnetism Among Field White Dwarfs / Liebert, J., Bergeron, P., & Holberg, J. B.// *The Astronomical Journal*. – 2003. – vol. 125. – issue 1. – p. 348-348.
- [41] The White Dwarfs within 25 pc of the Sun: Kinematics and Spectroscopic

Subtypes / Sion E. M., Holberg J. B., Oswalt T. D., et al.// The Astronomical Journal. – 2014. – vol. 147. – issue 6. – article id. 129. – pp. 11.

[42] The Parentage of Magnetic White Dwarfs: Implications from Their Space Motions / Anselowitz, T., Wasatonic, R., Matthews, K., et al.// The Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1999. – vol. 111. – issue 760. – p. 702-708.

[43] Wendell, C., Magnetic Field Evolution in White Dwarfs / Wendell, C., Van Horn, H., Sargent, D. // Astrophysical Journal. – 1987. – vol. 313. – p. 284 -297.

[44] Measuring the Rotational Periods of Isolated Magnetic White Dwarfs / Brinkworth, C., Burleigh, M., Lawrie, K., et al.// The Astrophysical Journal. – 2013. – vol. 773. – issue 1. – article id. 47. – pp. 16.

[45] 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.

[46] Search for and Study of Photometric Variability of Magnetic White Dwarfs WD 2047+372 and WD 0009+501 / Antonyuk K. A., Valyavin G. G., Valeev A. F, et al. // Astrophysical Bulletin. – 2019. – vol. 74. – issue 2. – p. 172-178.

[47] Can magnetic fields suppress convection in the atmosphere of cool white dwarfs? A case study on WD2105–820 / N. P. Gentile Fusillo , P.-E. Tremblay , S. Jordan, et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – vol. 473. – issue 3. – p.3693-3699.

[48] On the Evolution of Magnetic White Dwarfs / Tremblay P.-E., Fontaine G., Freytag B., et al.// The Astrophysical Journal. – 2015. – vol. 812. – issue 1. – article id. 19. – pp.12.

[49] Ginzburg S., Younger age for the oldest magnetic white dwarfs / Ginzburg S. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. – 2024. – vol. 534. – issue 1. – p. L65-L70.

[50] A Search for Kilogauss Magnetic Fields in White Dwarfs and Hot Subdwarf Stars / Valyavin, G., Bagnulo, S., Fabrika, S., et al.// The Astrophysical Journal. – 2006. – vol. 648. – issue 1. – p. 559-564.

[51] Discovery of kilogauss magnetic fields in three DA white dwarfs / Aznar

- Cuadrado R., Jordan S., Napiwotzki R., et al. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2004. – vol. 423. – p. 1081-1094.
- [52] Schmidt G.D., A Search for Magnetic Fields among DA White Dwarfs / Schmidt G.D., Smith P. S. // *Astrophysical Journal*. – 1995. – vol. 448. – p. 305-314.
- [53] Magnetic Fields of White Dwarfs / Valyavin G. G., Burlakova T. E., Fabrika S. N., et al. // *Astronomy Reports*. – 2003. – vol. 47. – issue 7. – p. 587-599.
- [54] Fabrika S. N., Magnetic field function of white dwarfs. / Fabrika S. N., Valyavin G. G. // *Bulletin of the Special Astrophysical Observatory*. – 1998. – vol. 45. – p. 84-92.
- [55] Fabrika, S., Magnetic field function of white dwarfs / Fabrika, S., Valyavin, G. // *ASp. Conf. Ser. 169, 11th European Workshop. on White Dwarfs/* под ред. S.- E. Solheim, E. G. Meistas. – 1999. – p. 214-220.
- [56] Muslimov, A.G., Magnetic Field Evolution in White Dwarfs: The Hall Effect and Complexity of the Field./ Muslimov, A.G., van Horn, H.M., Wood, M.A.// *Astrophysical Journal* – 1995 – vol. 442. – p. 758-767
- [57] Detection of circular polarization and low-amplitude photometric variability of the white dwarf WD1748+508 / Antonyuk K. A., Kolesnikov S. V., Pit N. V., et al. // *Astrophysical Bulletin*. – 2016. – vol. 71. – issue 4. – p. 475-478.
- [58] Bagnulo S., Discovery of six new strongly magnetic white dwarfs in the 20 pc local population / Bagnulo S., Landstreet J. D. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2020. – vol. 643. – id.A134. – pp. 17.
- [59] A high-precision survey of magnetic white dwarfs / Bagnulo S., Landstreet J. D., Martin A. J., et al.// *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. – 2018. – vol. 48. – no. 1. – p. 236-244.
- [60] Bagnulo S., Searching for the weakest detectable magnetic fields in white dwarfs. Highly-sensitive measurements from first VLT and WHT surveys / Bagnulo S., Landstreet J. D.// *Astronomy & Astrophysics*. – 2018. – vol. 618. – id.A113. – pp. 42.
- [61] Occurrence Frequencies of White Dwarfs with Regular Magnetic Fields / Aitov, V. N., Korchagina, E. P., Valyavin, G. G., et al. // *Astrophysical Bulletin*. – 2024. – vol. 79. – issue 3. – p. 494-503.

- [62] 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* / под ред. I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, D. O. Kudryavtsev. – 2020. – p. 153-156.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] Bychkov V. D., Magnetic Field Measurements of White Dwarfs / Bychkov V. D., Fabrika S. N., Shtol V. G.// *Soviet Astronomy Letters*. – 1991. – vol. 17. – no. 1/JAN. – p. 19-22.
- [67] Measurements of magnetic fields on white dwarfs / Fabrika S. N., Shtol V. G., Valyavin G. G., et al.// *Astronomy Letters*. – 1997. – vol. 23. – issue 1. – p. 43-47.
- [68] Fabrika S. N. Magnetic Fields and Rotation of the White Dwarfs 40 Eri B and WD 0009+501 / Fabrika S. N., Valyavin G. G., Burlakova T. E.// *Astronomy Letters*. – 2003. – vol. 29. – p. 737-747.
- [69] Magnetism of White Dwarfs (intermediate results of a survey for kilogauss magnetic fields in white dwarfs) / Valyavin, G., Bagnulo, S., Fabrika, S., et al.// *Odessa Astronomical Publications*. – 2005. – vol. 18. – p. 135.
- [70] On the incidence of weak magnetic fields in DA white dwarfs / Landstreet J. D., Bagnulo S., Valyavin G. G., et al.// *Astronomy & Astrophysics*. – 2012. – vol. 545. – id.A30. – p. 9.
- [71] A novel and sensitive method for measuring very weak magnetic fields of DA white dwarfs. A search for a magnetic field at the 250 G level in 40 Eridani B / Landstreet, J. D., Bagnulo, S., Valyavin, G. G., et al. // *Astronomy & Astrophysics*. –

2015. – id.A120. – p. 8.

[72] Discovery of an extremely weak magnetic field in the white dwarf LTT 16093 = WD2047+372 / Landstreet J. D., Bagnulo S., Martin A., et al.// *Astronomy & Astrophysics*. – 2016. – vol. 591. – id. A80. – p. 9.

[73] Monitoring and modelling of white dwarfs with extremely weak magnetic fields WD2047+372 and WD2359-434 / Landstreet, J. D., Bagnulo, S., Valyavin, G. G., et al. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2017. – vol. 607. – id. A92. – p. 15.

[74] Landstreet, J. D., Monitoring and modelling magnetic variability in two white dwarfs with very weak magnetic fields / Landstreet, J. D., Bagnulo, S., Valyavin, G. G., // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. – 2018. – vol. 48. – no. 1. – p. 284-286.

[75] Shtol V. G., Photometrical Attachment to the Spectrograph UAGS / Shtol V. G. // *Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii*. – 1984. – vol. 18. – p. 139.

[76] A Polarimeter Magnetometer for the Hydrogen Lines / Shtol, V. G., Bychkov, V. D., Vikuljev, N.A., et al.// *Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii*. – 1985. – vol. 19. – p. 66.

[77] Shtol V. G., A hydrogen magnetometer of the 6-m telescope. I. Efficiency estimation. / Shtol V. G. // *Astrofizik. Issledovaniia* – Sofia. – 1991. – vol. 33. – p. 176-202.

[78] Shtol V. G., Hydrogen magnetometer of the 6 m telescope. 2. Some systematic errors and magnetic sensitivity coefficient. / Shtol V. G.// *Bulletin of the Special Astrophysical Observatory*. – 1993. – vol. 35. – p. 114-123.

[79] Vasilev A. S., Primary stellar spectrograph of the large azimuthal telescope /LAT/ / Vasilev A. S., Evzerov A. M., Lobachev M. V., et al. // *Optiko-Mekhanicheskaiia Promyshlennost'*. – 1997. – vol. 44. – p. 31-34.

[80] Kudryavtsev D. O., New magnetic chemically peculiar stars / Kudryavtsev D. O., Romanyuk I. I., Elkin V. G., et al, // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2006. – vol. 372. – issue 4. – p. 1804-1828.

[81] Panchuk V. E., Main stellar spectrograph of the 6-meter telescope. Analysis,

- reconstruction, and operation / Panchuk V. E., Chuntanov G. A., Naidenov I. D. // *Astrophysical Bulletin*. – 2014. – vol. 69. – issue 3. – p. 339-355.
- [82] Gusev O. N., Lobachev M. V., Zandin N. G., Spectrograph for study of planets. // *Opt.-mekh. prom-st'*. – 1976. – no. 12. – p. 63-64.
- [83] The new circular polarization analyser for the Nasmyth-1 focus of the 6m telescope / Bychkov V. D., Fabrika S. N., Monin D. N., et al, // *Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars, Proceedings of the International Meeting, held in Special Astrophysical Observatory of Russian AS, September 23 – 27, 1999* – под ред.: Yu.V. Glagolevskij, I.I. Romanyuk. – 2000. – p.258-260.
- [84] A spectropolarimeter based on the 6 m telescope fast prime focus spectrograph / Naidenov, I. D., Valyavin, G. G., Fabrika, S. N., et al, // *Bulletin of the Special Astrophysical Observatory. Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg. (Izvestiya Spetsial'noi Astrofizicheskoi Observatorii)* (ISSN 0320-9318). – 2002. – vol. 53. – p. 124-130.
- [85] Successful commissioning of FORS1 - the first optical instrument on the VLT. / Appenzeller, I., Fricke, K., Fürtig, W., et al, // *The Messenger*. – 1998. – vol. 94. – p. 1-6.
- [86] Donati J. F., ESPaDOnS: An Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars at CFHT / Donati J. F. // *Solar Polarization, Proceedings of the Conference held 30 September - 4 October, 2002 at Tenerife, Canary Islands, Spain. Edited by Javier Trujillo-Bueno and Jorge Sanchez Almeida. ASp. Conference Proceedings, vol. 307. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. – 2003. – p. 41-50.*
- [87] Magnetic Fields of Cp. Stars in the Orion OB1 Association. IV. Stars of Subgroup. 1b / Romanyuk, I. I., Semenko, E. A., Moiseeva, A. V., et al, // *Astrophysical Bulletin*. – 2021. – vol. 76. – issue 1. – p. 39-54.
- [88] Schmidt G. D., The Incidence of Magnetism among White Dwarfs: The First Stars below 100 Kilogauss / Schmidt G. D., Smith P. S. // *Astrophysical Journal Letters*. – 1994. – vol. 423. – p.L63-L65.
- [89] Schmidt, G. D., Upper Limits for Magnetic Fields on Pulsating White Dwarfs /

- Schmidt, G. D., Grauer, A. D.// The Astrophysical Journal. – 1997. – vol. 488. – issue 2. – p. 827-830.
- [90] Search for rotation in white dwarfs / Koester D., Dreizler S., Weidemann V., et al.// Astronomy and Astrophysics. – 1998. – vol. 338. – p. 612-622.
- [91] Emelyanov E. V., MMPP. — multi-mode photometer-polarimeter. оптическая схема и система управления прибором / Emelyanov E. V., Fatkhullin T. A.// in Proc. 9th All-Russian Sci. Conf. on Systemnyj sintez i prikladnaya sinergetika, Rostov-On-Don, Russia, (SFEDU Press, Rostov-On-Don, 2019). – 2019. – p. 216–221.
- [92] Detection of regular low-amplitude photometric variability of the magnetic dwarf WD0009+501. on the possibility of photometric investigation of exoplanets on the basis of 1-meter class telescopes of the special and crimean astrophysical observatories / Valeev A., Antonyuk K., Pit N. et al. //Astrophysical Bulletin. – 2015. – vol. 70. – issue 3. – p. 318-327.
- [93] Search for and study of photometric variability in magnetic white dwarfs / Valeev A., Antonyuk K., Pit N. et al. // Astrophysical Bulletin. – 2017. – vol. 72. – issue 1. – p. 44-50.
- [94] Exoplanet Studies. Photometric Analysis of the Transmission Spectra of Selected Exoplanets / Valyavin G. G., Gadelshin D. R., Valeev A. F., et al. // Astrophysical Bulletin. – 2018. – vol. 73. – issue 2. – p. 225-234.
- [95] The 25 parsec local white dwarf population / Holberg J. B., Oswalt T. D., Sion E. M., et al.// Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2016. – vol. 462. – issue 3. – p. 2295-2318.
- [96] Landstreet, J., The Polarization Spectrum and Magnetic Field Strength of the White Dwarf Grw+70°8247 / Landstreet, J., Angel, J. R. p. // Astrophysical Journal. – 1975. – vol. 196. – p. 819-826.
- [97] Angel, J. R. P., Further Polarization Studies of Grw+70°8247 and Other White Dwarfs / Angel, J. R. P., Landstreet, J.// Astrophysical Journal. – 1970. – vol. 162. – p. L61-L66.
- [98] Angel, J. R. P., The Spectral Dependence of Circular Polarization in Grw+70°8247 / Angel, J. R. P., Landstreet, J. D., Oke, J. B //Astrophysical Journal. –

1972. – vol. 171. – p. L11-L15.

[99] West S.C., The Optical and Near-Infrared Continuum Polarization of Five Magnetic White Dwarf Stars: New Observations and Considerations Regarding Its Origin / West S.C. // *Astrophysical Journal*. – 1989. – vol. 345. – p. 511-521.

[100] Friedrich S., Search for indications of fast rotation in the linear polarization of the magnetic white dwarf Grw+708247? / Friedrich S., Jordan S. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2001. – vol. 367. – p. 577-581.

[101] Highly sensitive search for magnetic fields in white dwarfs using broad-band circular polarimetry / Berdyugin A. V., Piirola V., Bagnulo S., et al. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2022. – vol. 657. – id. A105. – pp. 8.

[102] Putney, A., Surveying DC White Dwarfs for Magnetic Fields / Putney, A. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. – 1997. – vol. 112. – issue 2. – p. 527-556.

[103] G240-72: a New Magnetic White Dwarf with Unusual Polarization / Angel, J. R. P.; Hintzen, P.; Strittmatter, et al. // *Astrophysical Journal*. – 1974. – vol. 190. – p. L71-L72.

[104] Romanyuk, I. I., Main-sequence magnetic Cp. stars III. Results of magnetic field measurements / Romanyuk, I. I. // *Astrophysical Bulletin*. – 2010. – vol. 65. – issue 4. – p. 347-380.

[105] Mihalas D., Stellar atmospheres / Mihalas D. – San Francisco: W. H. Freeman and company. – 1978.

[106] 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.

[107] Aitov, V.N., Studing the Evolution of Strongly Magnetized White Dwarfs. III. Frequency of Occurrence Depending on Age. / Aitov, V.N., Valyavin, G.G. // *Astrophysical Bulletin* – 2025 – vol. 80. – issue 3. – p. 449–455.

[108] 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.

- [109] Shapiro, S.L., Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects. / Shapiro, S.L., Teukolsky, S.A. – New York: John Wiley & Sons, Inc, – 1983
- [110] The White Dwarf Luminosity Function from Sloan Digital Sky Survey Imaging Data / Harris H. C., Munn J. A., Kilic M., et al. // The Astronomical Journal. – 2006. – vol. 131. – issue 1. – p. 571-581.
- [111] The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera/ Gunn, J. E.; Carr, M.; Rockosi, C.; et al. // The Astronomical Journal – 1998 – vol. 116. – issue 6. – p. 3040-3081.
- [112] The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary/ York D. G., Adelman J., Anderson J. E., Jr. et al.// The Astronomical Journal – 2000 – vol. 120. – issue 3. – p. 1579-1587
- [113] Sloan Digital Sky Survey: Early Data Release/ Stoughton C., Lupton R. H., Bernardi M., et al // The Astronomical Journal – 2002 – vol. 123. – issue 1. – p. 485-548.
- [114] Sion E. M., The space motions and luminosity function of white dwarf. / Sion E. M., Liebert J. // Astrophysical Journal. – 1977. – vol. 213. – p. 468-478.
- [115] Line-by-line opacity stellar model atmospheres / Shulyak D., Tsymbal V., Ryabchikova T., et al. // Astronomy and Astrophysics. – 2004. – vol. 428. – p. 993-1000.
- [116] Bagnulo S., Multiple Channels for the Onset of Magnetism in Isolated White Dwarfs / Bagnulo, S., Landstreet, J. D.// The Astrophysical Journal Letters – 2022 – volume 935 – Issue 1 – id.L12 – pp. 9.
- [117] The Influence of Crystallization on the Luminosity Function of White Dwarfs/ Hernanz, M. ;Garcia-Berro, E. ;Isern, J. et al. // Astrophysical Journal – 1994 – vol.434. – p. 652-661.
- [118] Torres S., The white dwarf population within 40 pc of the Sun / Torres, S. ;García-Berro, E. // Astronomy & Astrophysics – 2016 – vol. 588 – id.A35 – pp. 8.
- [119] Salpeter E. E., The Luminosity Function and Stellar Evolution. / Salpeter, E. E. // Astrophysical Journal – 1955 – vol. 121 – p.161-167.
- [120] The age and colors of massive white dwarf stars / Althaus, L. G. ;García-Berro, E. ;Isern, J. et al.// Astronomy and Astrophysics – 2007 – vol. 465. – issue 1. – p.249-

255

- [121] Isern, J., The Star Formation History in the Solar Neighborhood as Told by Massive White Dwarfs / Isern, Jordi// The Astrophysical Journal Letters – vol. 878. – issue 1. – article id. L11 – pp. 4.
- [122] Magnetic Fields of CP Stars in the Orion OB1 Association. III. Stars of Subgroup (a)./ Romanyuk, I.I., Semenko, E.A., Moiseeva, A.V. et al.// Astrophysical Bulletin – 2019 – vol. 74 – issue 1. – p. 55–61.
- [123] Magnetic Fields of CP Stars in the Orion OB1 Association. V. Stars of Subgroups (c) and (d)./ Romanyuk, I.I., Semenko, E.A., Moiseeva, A.V. et al.// Astrophysical Bulletin – 2021 – vol. 76. – issue 2 – p.163–184.
- [124] Chemically peculiar stars in the orion OB1 association. I. occurrence frequency, spatial distribution, and kinematics. / Romanyuk, I.I., Semenko, E.A., Yakunin, I.A., et al. // Astrophysical Bulletin – 2013 – vol. 68. – issue 3 – p.300–337.
- [125] The bursty origin of the Milky Way thick disc. / Yu S., Bullock J.S., Klein C., et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society – 2021 – vol. 505 – issue 1 – p. 889–902.
- [126] Origin and Evolution of Large-Scale Magnetic Fields of Chemically Peculiar Stars. I. Intermediate-Age Clusters./ Romanyuk, I.I., Yakunin, I.A., Moiseeva, A.V et al. // Astrophysical Bulletin – vol. 79. – issue 1 – p.95–103.
- [127] 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.
- [128] Chandrasekhar, S., Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability / Chandrasekhar, S. // International Series of Monographs on Physics, Oxford: Clarendon. – 1961. – pp. 146–195.
- [129] Nakagawa, Y., An Experiment on the Inhibition of Thermal Convection by a Magnetic Field. / Nakagawa, Y. //Nature. – 1955. – vol. 175. – issue 4453. – p. 417–419.
- [130] Fumizawa, M., Natural Convection Experiment with Liquid NaK under Transverse Magnetic Field / Fumizawa, M. // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1980. – vol. 17. – issue 2. – p. 98–105.

- [131] Effect of a magnetic field on free convection in a rectangular enclosure. / Rudraiah, N., Barron, R.M., Venkatachalappa, M., et al // International Journal of Engineering Science. – 1995. – vol. 33. – issue 8. – p. 1075–1084.
- [132] Aurnou, J.M., Experiments on Rayleigh–Bénard convection, magnetoconvection and rotating magnetoconvection in liquid gallium. / Aurnou, J.M., Olson, P.L. // Journal of Fluid Mechanics. – 2001. – vol. 430. – issue 01. – p. 283–307.
- [133] Sankar, M., Effect of magnetic field on the buoyancy and thermocapillary driven convection of an electrically conducting fluid in an annular enclosure. / Sankar, M., Venkatachalappa, M., Do, Y. // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2011. – vol. 32. – issue 2. – p. 402–412.
- [134] Finite amplitude cellular convection under the influence of a vertical magnetic field. / Rameshwar, Y., Rawoof Sayeed, M.A., Rani, H.P., et al // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – vol. 114. – p. 559–577.
- [135] Braithwaite, D., Magnetically controlled convection in a paramagnetic fluid. / Braithwaite, D., Beaugnon, E., Tournier, R. // Nature. – 1991. – vol. 354. – p. 134–136.
- [136] Tagawa, T., Numerical computation for Rayleigh–Benard convection of water in a magnetic field. / Tagawa, T., Ujihara, A., Ozoe, H. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2003. – vol. 46. – issue 21. – p. 4097–4104.
- [137] Inversion of flow and heat transfer of the paramagnetic fluid in a differentially heated cube. / Kenjereš, S., Fornalik-Wajs, E., Wrobel, W., et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – vol. 151. – id. 119407.
- [138] Wada, K., Rayleigh–Bénard Convection of Paramagnetic Liquid under a Magnetic Field from Permanent Magnets. / Wada, K., Kaneda, M., Suga, K. // Symmetry. – 2020. – vol. 12. – id. 341.
- [139] Fornalik-Wajs, E., Nanofluid flow driven by thermal and magnetic forces—Experimental and numerical studies. / Fornalik-Wajs, E., Roszko, A., Donizak, J. // Energy. – 2020. – vol. 201. – id. 117658.
- [140] Experimental investigation of rheological behavior of the hybrid nanofluid of

- MWCNT–alumina/water (80%)–ethylene-glycol (20%). / Afshari, A., Akbari, M., Toghraie, D., et al. // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – vol. 132. – p. 1001–1015.
- [141] Zadeh, A.D., Experimental investigation for developing a new model for the dynamic viscosity of silver/ethylene glycol nanofluid at different temperatures and solid volume fractions. / Zadeh, A.D., Toghraie, D. // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – vol. 131. – p. 1449–1461.
- [142] Akhgar, A., D. An experimental study on the stability and thermal conductivity of water-ethylene glycol/TiO₂-MWCNTs hybrid nanofluid: Developing a new correlation./ Akhgar, A., Toghraie, D. // *Powder Technology*. – 2018. – vol. 338. – p. 806–818.
- [143] An experimental study on the thermal conductivity of cerium oxide/ethylene glycol nanofluid: Developing a new correlation./ Keyvani, M., Afrand, M., Toghraie, D., et al. // *Journal of Molecular Liquids*. – 2018. – vol. 266. – p. 211–217.
- [144] Saeedi, A.H., An experimental study on rheological behavior of a nanofluid containing oxide nanoparticle and proposing a new correlation. / Saeedi, A.H., Akbari, M., Toghraie, D.// *Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures*. – 2018. – vol. 99. – p. 285–293.
- [145] Odenbach, S., *Ferrofluids, Magnetically Controllable Fluids and Their Applications*/ Odenbach, S. – *Lecture Notes in Physics*; Springer: Berlin, Germany,; Volume 594. – 2002.
- [146] Berkovsky, B.M., *Magnetic Fluids: Engineering Applications*/ Berkovsky, B.M., Medvedev, V.F., Krakov, M.S. – Oxford University Press: Oxford, UK. – 1993.
- [147] Blums, E., *Magnetic Fluids*/ Blums, E., Cebers, A.O., Maiorov, M.M. – Walter de Gruyter: Berlin, Germany. – 1997.
- [148] Thermomagnetic convective flows in a vertical layer of ferrocolloid: Perturbation energy analysis and experimental study. / Suslov, S.A., Bozhko, A.A., Sidorov, A.S., Putin, G.F. // *Physical Review E*. – 2012. – vol. 86. – issue 1. – id. 016301.
- [149] Hindrance of thermomagnetic convection by the magnetoviscous effect. / Engler,

H., Lange, A., Borin, D., Odenbach, S. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – vol. 60. – p. 499–504.

[150] Krakov, M.S., Natural convection in a horizontal cylindrical enclosure filled with a magnetic nanofluid: Influence of the uniform outer magnetic field. / Krakov, M.S., Nikiforov, I.V. // International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – vol. 133. – p. 41–54.

[151] Krakov, M.S., Influence of the shape of the inner boundary on thermomagnetic convection in the annulus between horizontal cylinders: Heat transfer enhancement. / Krakov, M.S.; Nikiforov, I.V. // International Journal of Thermal Sciences. – 2020. – vol. 153. – id. 106374.

[152] Lee, M., Thermomagnetic Convection of Ferrofluid in an Enclosure Channel with an Internal Magnetic Field. / Lee, M.; Kim, Y.-J. // Micromachines. – 2019. – 10. – 553.

[153] A numerical study on heat transfer of a ferrofluid flow in a square cavity under simultaneous gravitational and magnetic convection. / Cunha, L.H.P., Siqueira, I.R., Campos, A.A.R., et al. // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. – 2020. – vol. 34. – issue 1-2. – p. 119–132.

[154] Dixit, D.D., Effect of uniform external magnetic-field on natural convection heat transfer in a cubical cavity filled with magnetic nano-dispersion. / Dixit, D.D., Pattamatta, A. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – vol. 146. – id. 118828.

[155] Bozhko, A.A., Convection in Ferro-Nanofluids: Experiments and Theory / Bozhko, A.A.; Suslov, S.A. – Springer: Berlin, Germany. – 2018.

[156] Natural convection of magnetic fluid in a rectangular box. / Yamaguchi, H., Kobori, I., Uehata, Y., et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1999. – vol. 201. – issue 1-3. – p. 264–267.

[157] Yamaguchi, H., Heat Transfer in Natural Convection of Magnetic Fluids. / Yamaguchi, H., Kobori, I., Uehata, Y. // Journal of Thermophysics and heat transfer – 1999 – vol. 13 – no 4 – p. 501–507.

[158] Wen, C.-Y., Flow visualization of natural convection of magnetic fluid in a

rectangular Hele-Shaw cell. / Wen, C.-Y., Chen, C.-Y., Yang, S.-F. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – vol. 252. – p. 206–208.

[159] Wen, C.-Y., Natural convection of magnetic fluid in a rectangular Hele-Shaw cell. / Wen, C.-Y., Su, W.-P. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2005. – vol. 289. – p. 299–302.

[160] Numerical simulation of combined natural and thermomagnetic convection around a current carrying wire in ferrofluid. / Vatani, A., Woodfield, P.L., Nguyen, N.-T., et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – vol. 489. – id. 165383.

[161] Marin, C.N., Experimental and theoretical investigations on thermal conductivity of a ferrofluid under the influence of magnetic field. / Marin, C.N., Malaescu, I. // The European Physical Journal E. – 2020. – vol. 43. – id. 61.