

УДК 52-14:524.35-337

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ И РОДСТВЕННЫХ ИМ ЗВЕЗД. IX. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 2022 ГОДА И АНАЛИЗ БЛИЖАЙШИХ ПЕРСПЕКТИВ

© 2023 И. И. Романюк^{1*}

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 17 августа 2023 года; после доработки 26 августа 2023 года; принята к публикации 11 сентября 2023 года

Приводится обзор работ, опубликованных в 2022 году, и выполненных в области исследования звездного магнетизма. Всего проанализировано 75 статей. Основной интерес исследователей заключен в изучении магнетизма химически пекулярных звезд, активных холодных звезд. Найдено, что для последних наблюдается миграция магнитных пятен и изменение их конфигурации. Представлены проекты спектрографов и спектрополяриметров для новых крупных телескопов.

Ключевые слова: *звезды: магнитное поле — звезды: химически пекулярные — белые карлики*

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящей работой продолжается серия ежегодных обзоров (Romanuk, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022) в которых публикуются результаты исследований магнитного поля химически пекулярных (CP) и родственных им звезд. Представляемая статья посвящена описанию результатов, опубликованных в рецензируемых астрономических журналах в 2022 г.

В работе сохраняется традиционный порядок разделов, в которых приводится описание инструментов; обзор новых программ и методов анализа химически пекулярных звезд, магнитных белых карликов, активных холодных магнитных звезд и других объектов. Активно обсуждается проблема наблюдений экзопланет. По-прежнему, основными источниками наблюдательных данных являются 6-м телескоп САО РАН, спектрополяриметры FORS1/2¹⁾ и CRIRES²⁾ на VLT, ESPaDOnS³⁾ CFHT.

*E-mail: roman@sao.ru

¹⁾Веб-страница FORS1/2: <https://www.eso.org/public/teles-instr/paranal-observatory/vlt/vlt-instr/fors/>

²⁾Веб-страница CRIRES: <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/crires.html>

³⁾Веб-страница ESPaDOnS: <https://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Spectroscopy/Espadons/>

2. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

В данном разделе рассматриваются проекты новых телескопов и навесного оборудования. Разрабатываются новые программы обработки и анализа данных.

2.1. Новые телескопы и навесное оборудование

Рассмотрим несколько статей, посвященных описанию спектрографа CRIRES (CRyogenic high-resolution InfraRed Echelle Spectrograph).

Dorn et al. (2023) усовершенствовали спектрограф CRIRES. Инструмент установлен на VLT Unit Telescope 3. Обновленная версия CRIRES+ работает в ИК-диапазоне и существенно расширяет возможности для наблюдений. Этот инструмент преобразован в кросс-дисперсионный спектрограф с увеличением одновременно перекрывающейся области длин волн на порядок. В новой фокальной плоскости вместо прежней системы установлена линейка из трех матриц Hawaii 2RG. Расширяются возможности и для спектрополяриметрии. В статье представлены первые результаты наблюдений и приводится обзор возможностей прибора.

Bristow et al. (2022) описывают процесс установки и отладки прибора во время пандемии COVID-19. Ввод в эксплуатацию и тестирование характеристик проводились удаленно из Европы. Авторы разработали специальные методы и подходы для проведения подобной работы. Благодаря

созданной стратегии авторы смогли достигнуть поставленных целей и новый прибор CRIRES+ готов к работе.

Для интерферометра VLTI⁴⁾ разработан новый прибор MATISSE⁵⁾, работающий в средней ИК-области в полосах L , M и N . Lopez et al. (2022) представили обзор основных принципов работы инструмента и его функциональных возможностей. Прибор достигает спектрального разрешения 30, 500, 1000, 3400 в полосе L и 30, 200 — в N . Прибор работает на Cerro Paranal ESO, Chile с 2018 года и открыт для международных научных исследований с апреля 2019 г. У спектроинтерферометра большой потенциал, с его помощью можно исследовать такие передовые темы как звездная активность и потеря массы, образование и эволюция планет в газопылевых дисках вокруг молодых звезд, взаимодействие с окружающей средой и процессы аккреции вокруг сверхмассивных черных дыр в активных ядрах галактик.

Dannert et al. (2022) описывают интерферометр для изучения атмосфер экзопланет LIFE⁶⁾. Он предназначен для работы в средней ИК-области. Авторы планируют изучать тепловое излучение сотен экзопланет и определять характеристики их атмосфер. Для количественной оценки технического потенциала прибора авторы создали программный инструмент LIFESIM, который симулирует наблюдения экзопланетных систем.

Quanz et al. (2022) провели оценку эффективности поиска экзопланет и необходимых для этого технических требований для интерферометра LIFE. Авторы искусственно заселили экзопланетами звезды главной последовательности в пределах 20 пк от Солнца. Это позволило определить количество и типы экзопланет, которые могут быть обнаружены прибором в концепции миссии. В результате авторы выяснили, что при апертуре в два метра, в диапазоне длин волн 4–18.5 мкм, при общей пропускной способности около 5% и интегральным отношением $S/N \geq 7$ прибор может обнаружить примерно 550 экзопланет с радиусами (0.5–6.0) R_{\oplus} , при этом примерно 25–45 экзопланет земного типа находятся в эмпирической зоне обитания. При увеличении апертуры до 3.5-м число обнаружений значительно увеличивается: всего можно зарегистрировать около 770 экзопланет различных типов и 60–80 экзопланет земного типа. Подавляющее большинство небольших экзопланет обнаруживается вокруг М-карликов.

Konrad et al. (2022) провели серию тестов для оценки минимальных требований к отношению

сигнал–шум (S/N), спектральному разрешению (R) и диапазону длин волн для концепции миссии LIFE. Для этой цели авторы искусственно воссоздали экзопланету — близнеца Земли, вращающуюся вокруг звезды G2V на расстоянии 10 пк от Солнца, в качестве эталонного объекта. Авторы количественно оценили, насколько хорошо планетарные и атмосферные свойства могут быть получены из его спектра теплового излучения в зависимости от диапазона длин волн, S/N и R . В результате Konrad et al. (2022) нашли, что H_2O , CO_2 и O_3 обнаруживаются при $S/N \geq 10$, нижние пределы для обнаружения CH_4 составляют $R = 50$ и $S/N = 10$. Поисковая система авторов правильно оценивает физические параметры экзопланет: радиус с точностью 10%, температуру поверхности с ошибкой в 20 К и ускорение силы тяжести с неопределенностью в 0.5 dex. Можно сделать заключение о технических требованиях к интерферометру для изучения похожих на Землю планет: минимальный охват длин волн должен покрывать область 4–18 мкм, $R = 50$ и $S/N \geq 10$. При соблюдении этих условий атмосферные характеристики некоторых земноподобных планет можно получить с апертурами более двух метров.

В статье Marconi et al. (2022) описывается проект ANDES⁷⁾ — спектрографа высокого разрешения для 39-м телескопа ELT. Прибор состоит из трех оптоволоконных спектрографов, работающих в областях UBV , RIZ , YJH соответственно. В спектрографе предусматривается высокое спектральное разрешение вплоть до $R = 100\,000$, охватывается широкая спектральная область (от 0.4 мкм до 2.4 мкм) и достигается экстремальная стабильность для измерений лучевых скоростей (точность 0.02 мс^{-1} за десятилетний период в избранной длине волны). Планируемый спектр работ для данного спектрографа довольно обширный. Основные перспективные задачи: поиск биосигнатур в атмосферах экзопланет, изучение стабильности и природы фундаментальных констант в течение жизни Вселенной, прямые измерения космического ускорения. Проект ANDES поддерживается большим международным консорциумом, состоящим из 35 институтов из 13 стран, формирующих команду из более чем 200 ученых и инженеров.

Далее рассмотрим несколько проектов Э. Муслимова и его коллег.

Muslimov and Neiner (2022) разработали дизайн спектрополяриметра для миссии ARAGO ESA M7⁸⁾. В основе концепции лежит 1-м телескоп Ричи–Кретьена F/13. Научная нагрузка включает

⁴⁾Very Large Telescope Interferometer

⁵⁾Multi AperTure mid-Infrared SpectroScopic Experiment

⁶⁾Large Interferometer For Exoplanets

⁷⁾ArmazoNes high Dispersion Echelle Spectrograph

⁸⁾Веб-страница миссии ARAGO: <https://arago-mission.obspm.fr/index.php>

в себя общий поляриметрический блок и два спектрографа, соединенных через дихроичный разветвитель. Поляриметрический блок состоит из шести пластин MgF₂, попарно соединенных оптическим волокном, и анализатора Волластона. Каждый из спектральных каналов представляет собой эшелле-спектрограф. Первый будет работать в УФ-диапазоне 119–320 нм с разрешающей способностью $R > 25\,000$, а второй спектральный канал работает в видимом диапазоне 350–888 нм с $R > 35\,000$. В работе подробно описываются детали конструкции.

В другой работе предложен спектрограф с низким спектральным разрешением для малого роботизированного телескопа CASTLE (Muslimov et al., 2022a). Этот прибор разработан для объектов сверхнизкой поверхностной яркости, а также для поиска и обнаружения транзитных объектов. Он сконструирован в лаборатории астрофизики в Марселе и будет установлен в обсерватории Калар-Альто. Авторы рассмотрели возможность реализации режима бесщелевой спектроскопии низкого разрешения для этого телескопа. Такой дополнительный режим наблюдения может быть реализован введением гризмы, которая позволяет получить спектральное разрешение $R = 163\text{--}698$ и расширенную спектральную область 350–950 нм при сохранении номинала телескопа. Для компенсации абберации и увеличения дифракционной эффективности авторы используют композитный голографический компонент. Сравнение показывает выигрыш до трех раз в качестве изображения и до 4.2 раза в дифракционной эффективности.

Muslimov et al. (2022b) разработали конструкцию системы адаптивной оптики для оптоволоконного эшелле-спектрографа высокого разрешения в фокусе Нэсмита 6-м телескопа БТА САО РАН. Система базируется на пирамидальном сенсоре длин волн и будет работать в видимой области 430–680 нм. Система состоит из двух сферических зеркал. В дихроичном расщепителе используется длинноволновый компонент с пирамидальным сенсором, базирующемся только на оптике преломления. Конечной целью системы адаптивной оптики является увеличение концентрации энергии в пятне на входе в спектрограф, и предварительное моделирование показывает, что можно получить выигрыш в 69.5 раз при типичных атмосферных условиях САО РАН.

Стартует проект для изучения характеристик гигантских экзопланет (El Morsy et al., 2022). Планируется использовать большой наземный телескоп с экстремальной адаптивной оптикой (ExAO) и спектроскопией высокого разрешения. Для увеличения точности центрирования объекта авторы

модернизировали систему отладки для высококонтрастных изображений (high-contrast imaging testbed) MITHiC, чтобы воспроизвести настройку, близкую к той, которая будет принята в HiRISE, и наладить систему связи, которая вскоре будет внедрена между VLT/SPHERE и VLT/CRIFES+. Авторы продемонстрировали, что достижение заданной точности в $0.1 \lambda/D$ является чрезвычайно сложной задачей, независимо от выбранной стратегии центрирования.

Yakovlev et al. (2022) использовали 0.5-м роботизированные телескопы САО РАН для мониторинга двух квадратных градусов небесной сферы с целью обнаружения новых экзопланет. Получено более 25 000 отдельных изображений и построены фазовые кривые примерно для 30 000 звезд. Авторы исследовали параметры транзитов для пяти недавно обнаруженных кандидатов в экзопланеты.

Valyavin et al. (2022) представили краткое описание совместного российско-корейского проекта, целью которого является массовый поиск нестационарных событий во Вселенной с помощью фотометрических, интерферометрических, спектральных и радиоболометрических методов наблюдений, а также изучение экзопланет.

2.2. Методы обработки и анализа данных

Stift and Leone (2022) в очередной раз подвергают критике метод Доплер-Зеемановского картирования. Проблема в том, что согласие между картами, полученными методом ZDI, и предсказаниями атомной диффузии неудовлетворительное. Требуются большие численные расчеты для описания химической стратификации и функций регуляризации для восстановления магнитных и химических карт.

Для определения характеристик экзопланет требуются точные определения фундаментальных параметров родительских звезд. Для этого Wehrhahn et al. (2023) разработали новый пакет программ PySME, который основан на проверенном пакете SME, написанном на языке IDL. В PySME часть исходного кода SME была переписана на Python, но авторы сохранили эффективный код C++ и FORTRAN, отвечающий за молекулярно-ионизационное равновесие, непрозрачность и спектральный синтез. Авторы испытали PySME для некоторых звезд разных спектральных классов и сравнили результаты оценки физических параметров с результатами IDL SME и других методов. В итоге было получено отличное соответствие параметров и тесты показали, что PySME справляется с поставленными задачами не хуже IDL SME. Основное преимущество заключается в том, что PySME прост в использовании, доступен для распространенных платформ и свободен от коммерческих лицензий.

3. МАГНИТНЫЕ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫЕ ЗВЕЗДЫ

В этом разделе рассмотрим химическое содержание элементов, магнитное поле, эволюционный статус и другие параметры химически пекулярных звезд.

3.1. Химическое содержание элементов CP-звезд

HgMn-звезды имеют характерные для Ap/Bp-звезд аномалии химического состава, но при этом у них наблюдается медленное вращение и отсутствует сильное магнитное поле (Макаганиук et al., 2011). В данном обзоре показано, что кроме магнитного поля существуют и другие механизмы, приводящие к образованию химических неоднородностей.

Kochukhov et al. (2021) получили кривые блеска 64 HgMn-звезд на спутнике TESS. Авторы нашли вращательную переменность от 0.1–3.0 mmag в 84% наблюдавшихся объектов, что указывает на наличие пятен на поверхности практически всех HgMn-звезд. Авторы выявили шесть быстровращающихся HgMn-звезд с периодом вращения менее 1.2 суток и одну звезду HD 14228 с очень коротким периодом в 0.34 суток. Несколько объектов показывают мультипериодическую переменность.

Ryabchikova et al. (2022b) провели детальное исследование SB2 системы HD 60803, основанное на спектрах высокого разрешения, полученных на разных спектрографах. Дифференциальный анализ обоих компонентов системы не выявил каких-либо различий в их физических параметрах, оба компонента имеют солнечное содержание за исключением лития: его содержание на два порядка выше солнечного. Оценен возраст системы $t = 5.5 \pm 0.5$ млрд лет.

Joshi et al. (2022) представили результаты спектроскопии высокого разрешения и K2-фотометрии пяти химически пекулярных звезд в рассеянном скоплении M44. Анализ высокоточной фотометрии HD 73045 и HD 76310 показал, что вариации их блеска носят вращательный характер из-за пятнистой структуры поверхности звезд. Одновременные исследования лучевой скорости и K2-фотометрии подтверждают, что у HD 73045 не выявлено никаких периодических изменений на временах короче 1.3 суток в противовес прежним сообщениям в литературе. Авторы показали, что HD 73619 относится к классическим Am-звездам с магнитным полем менее 200 Гс и что даже в отсутствии магнитного поля могут возникнуть химические пятна.

Mikulášek et al. (2022) представили результаты исследования CP-звезды HD 60341 с наиболее коротким известным периодом вращения ($P = 0^d47$).

Для исследований использовалась спектрополяриметрия, спектроскопия и фотометрия. Авторы нашли возраст звезды, оценили физические параметры и химическое содержание элементов. Она расположена близко к ZAMS, является членом рассеянного скопления NGC 2457 в комплексе VELA OB2. Авторы подтвердили ее статус классической CP2-звезды позднего B-типа. По спектроскопическим данным магнитного поля не обнаружено. Кривая блеска HD 60431 оставалась постоянной в течение последних четырех десятилетий. Имеющиеся фотометрические данные подтверждают короткий период вращения и указывают на его небольшое вековое увеличение. Таким образом, вопрос об установлении и сохранении химических особенностей в таком молодом и быстро вращающемся объекте остается открытым.

Raunzen (2022) представил каталог результатов измерений звезд в семицветной Женевской системе, которая успешно применяется для изучения переменности различных объектов. Эта версия каталога является первой работой после последнего подобного каталога, который был опубликован 30 лет назад. Идентификация отдельных звезд была перепроверена на основе каталогов Gaia и 2MASS. В новый каталог впервые включены координаты высокой точности вместе с собственными движениями. В результате полученный каталог содержит сведения о 42 911 звездах с высокоточной фотометрией.

Raunzen and Prišegen (2022) выполнили Δα-фотометрию в области депрессии на λ5200 для 1240 известных mCP-звезд и 387 нормальных объектов, включая двойные звезды, используя спектры низкого разрешения миссии Gaia. В результате авторы зафиксировали четкое отличие mCP-звезд от нормальных. Порог обнаружения превышает 95% для A и B-звезд и падает для более холодных звезд. Таким образом, спектры Gaia можно эффективно использовать для поиска mCP-звезд.

Kharchenko et al. (2022) изучали эволюционный статус химически пекулярных звезд — членов рассеянного скопления NGC 2516. Авторы установили принадлежность и эволюционный статус 11 CP-звезд. В работе был использован каталог Gaia DR3 в области с радиусом 1°. Были изучены 37 508 звезд ярче $G = 19^m0$ звездной величины. Принадлежность к скоплению по собственному движению и параллаксу оценена для 719 звезд и 764 возможных кандидатов. Только пять CP-звезд из 11 являются членами скопления. Среди них лишь две магнитные Ap/Bp-звезды, HD 65987 и HD 65712, имеют высокую степень надежности

принадлежности к скоплению, а CPD-60 944B является вероятным членом скопления. Также авторы обнаружили, что звезда с сильным полем HD 66318 с высокой степенью вероятности не принадлежит скоплению.

В работе Catanzaro et al. (2022) приводятся результаты спектрополяриметрического исследования пяти CP-звезд. Для каждого объекта найдены значения эффективной температуры, ускорения силы тяжести, лучевой скорости и проекции скорости вращения, а также выполнен анализ химического содержания элементов методом синтетических спектров. Все объекты оказались двойными SB1 типа. Авторы подтвердили тип пекулярности для четырех объектов, а одна звезда из выборки оказалась нормальной звездой.

Wittman et al. (2022) провели фотометрические исследования восьми магнитных CP-звезд: HD 32966, HD 35298, HD 68292, HD 93226, HD 171247, HD 217833, HD 220147, HD 223358. Получены кривые блеска всех объектов.

Звезда δ Ori является многокомпонентной системой и одним из самых ярких членов ассоциации Орион OB1. Главный компонент Aa1 — уникальная проэволюционировавшая O-звезда, в спектрах которой Oplštilová et al. (2023) нашли линии второго компонента (Aa2). Впервые авторами уточнена орбита третьего компонента (Ab) в 55 450 суток (152 года). Используя данные Gaia DR3, найден параллакс далекого слабого компонента (Ca+Cb), который ограничивает расстояние системы до 382 пк, что свидетельствует о том, что она находится в центре ассоциации. Найден спектральный класс и радиус для всех компонентов системы.

Ryabchikova et al. (2022a) провели сравнительный анализ двух широких двойных пар 16 Cyg с гигантской газовой планетой, вращающейся вокруг 16 Cyg B и HD 219542 — без обнаруженной экзопланеты. Проведен анализ содержания 29 химических элементов для 16 Cyg и 23 — для HD 219542. Для 19 элементов применялся не-ЛТР анализ. Для обеих звезд разница между компонентами A и B незначительная. Это свидетельствует о слабом влиянии гигантской газовой планеты на химический состав родительской звезды.

3.2. Магнитное поле CP-звезд

Звезда σ Ori E — массивная гелиевая B-звезда с быстрым вращением и сильным поверхностным магнитным полем. Song et al. (2022) по параллаксу Gaia подтвердили принадлежность звезды к скоплению. При помощи моделирования авторы попытались воспроизвести наблюдаемые свойства σ Ori E и дали новые оценки ее металличности, массы и возраста. Они нашли, что σ Ori E очень

молодая звезда (возраст менее 1 млн лет) с массой около $9 M_{\odot}$, металличностью 0.020 и с поверхностным магнитным полем порядка 7 кГс. Быстрое вращение и сильное поле являются характерными критериями молодых звезд.

Радиопульсирующие эмиттеры главной последовательности — это магнитные звезды ранних типов, в которых наблюдаются периодические радиоимпульсы, создаваемые циклотронным мазерным излучением. До настоящего времени было известно семь таких объектов. Das et al. (2022a) обнаружили еще восемь новых звезд этого типа. Наблюдения проводились на радиотелескопе Giant Metrewave в Индии. Учитывая все данные, авторы приходят к выводу, что по крайней мере 32% магнитных горячих звезд имеют радиоизлучение. Получены доказательства, что физические параметры (величина магнитного поля и температуры) играют главную роль в эффективности подобного излучения у горячих магнитных звезд.

Fréour et al. (2023) представили результаты спектрополяриметрического анализа горячей звезды V352 Peg. Данные были получены с помощью ESPaDOnS на CFHT в период 2018–2019 гг. Авторы нашли, что V352 Peg является Bp-звездой с избыточным содержанием элементов железного пика (Ti, Cr, Fe) и дефицитом легких элементов He и O. Также авторы нашли магнитное поле, которое в основном дипольное, преимущественно полоидальное и сильно неосесимметричное с полем диполя величиной $B_p \approx 9$ кГс. Сильная переменность спектральных линий указывает на присутствие химических пятен на поверхности звезды.

Shultz et al. (2021) провели анализ экстремально гелиевой звезды (EHe) HD 144941. Этот тип звезд имеет редкий класс OB-субкарликов с большим содержанием He в атмосфере и является результатом слияния двух белых карликов. Кривая блеска указывает на модуляцию из-за вращения, предполагающего наличие магнитного поля. Shultz et al. (2021) впервые провели спектрополяриметрические наблюдения объекта с высоким разрешением. В результате авторы нашли очень сильное магнитное поле, продольный компонент которого составляет 8 кГс, а поверхностное поле — 17 кГс. Также авторы впервые зафиксировали небольшую эмиссию в H α , соответствующую центробежной атмосфере. Наличие этой эмиссии возможно только при массе звезды около $1 M_{\odot}$, что указывает на то, что звезда находится после ГП. Нет указаний на двойственность звезды, что свидетельствует, что слияние белых карликов стало причиной генерации такого магнитного поля.

Przybilla et al. (2021) также исследовали эту уникальную звезду. Новые спектрополяриметрические наблюдения HD 144941 проводились на

FORS2 VLT с июля по август 2021 года. Авторы обнаружили максимальное продольное магнитное поле по измерениям водородных линий $B_e(\text{max}) \approx -9$ кГс, но при измерении всех спектральных линий магнитное поле демонстрируют меньшее значение на 1–1.4 кГс.

Kobzar et al. (2022) проанализировали восемь магнитных химически пекулярных звезд с модулирующей блеска, которая вызвана вращением звезды. Фотометрия была получена на спутнике TESS. Проведен анализ кривой блеска для всех объектов. У большинства из них изменения блеска соответствуют вариации магнитного поля. Используя найденный период вращения, общие звездные параметры, полученные из профилей бальмеровских линий, Женевской и Стремгеновской фотометрии, авторы определили экваториальную скорость вращения и нашли долю $v_{\text{eq}}/v_{\text{crit}}$. Авторы показали, что указанная доля уменьшается с возрастом со скоростью, соответствующей магнитному торможению, которая наблюдается для значительного числа mCP-звезд.

Когерентная радиоэмиссия из-за циклотронной мазерной эмиссии (ЕСМЕ) от горячих магнитных звезд была зарегистрирована более 20 лет назад, но физические условия, способствующие ее генерации до сих пор неясны. Только недавно было найдено эмпирическое соотношение, связывающее светимость ЕСМЕ с магнитным полем и температурой, но оно получено всего по 14 звездам. Das et al. (2022b) провели проверку этого соотношения. В результате авторы выяснили, что когерентное и некогерентное ЕСМЕ горячих магнитных звезд вызываются одним и тем же физическим явлением. Оба типа излучения безразличны к T_{eff} или скорости потери массы для В- и А-звезд поздних спектральных классов, но для ранних В- и О-звезд повышение температуры приводит к уменьшению когерентной радиосветимости.

Звезда Пласскетта HD 47129 относится к малому количеству короткопериодических двойных систем с наличием горячей магнитной звезды. Grunhut et al. (2022) скомбинировали обширные спектрополяриметрические данные с архивной фотометрией CoRoT и спектрополяриметрией. Анализируя все данные, авторы оценили период вращения звезды $P = 1^{\text{d}}21$. Моделируя профили V-параметра Стокса с помощью Доплер–Зеемановского картирования, они впервые составили достоверную магнитную карту О-звезды. Магнитное поле звезды преимущественно дипольное с величиной $B_p = 850$ Гс, наклон оси вращения к оси диполя составляет около 90° . Авторы зафиксировали переменность $\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$ и He II , что подтверждает наличие плотной центробежной магнитосферы, окружающей звезду. Также не

обнаружена вариация лучевой скорости звезды, что ставит под сомнение историческую модель звезды Пласскетта как двойной системы из двух О-звезд почти равной массой.

Kochukhov et al. (2023) рассматривают детальные наблюдательные поверхностные характеристики структуры Ар-звезды 45 Her со слабым магнитным полем. Авторы обнаружили, что она является долгопериодической двойной SB1-типа. Они построили и нашли параметры орбиты, а также фундаментальные параметры для главного компонента системы. Доплер–Зеемановское картирование показало, что поверхность имеет искаженную дипольную топологию со средним магнитным полем величиной 77 Гс и дипольным компонентом 119 Гс. Авторы подтвердили, что это одна из Ар-звезд со слабейшим магнитным полем. Несмотря на это, 45 Her демонстрирует химические неоднородности, превышающие нормальные до шести порядков. Нет признаков дифференциального вращения или эволюции химических пятен. Это доказывает, что для образования химических пятен не требуется наличие сильного магнитного поля. Также авторы показали, что структура звезды и глобальное магнитное поле менее 100 Гс остаются стабильными, вопреки теоретическим предсказаниям.

Главный компонент кратной системы ϕ Dra является одной из ярчайших CP-звезд на северном небе. Kochukhov et al. (2022) изучили вращательную фотометрическую переменность звезды, ее двойственность, геометрию магнитного поля и проанализировали структуру химических пятен. Они оценили по фотометрии TESS период вращения $P = 1^{\text{d}}71$ и орбитальный период $P = 127^{\text{d}}9$. Картирование звезды показывает, что топология магнитного поля имеет дипольную структуру с максимальной величиной 1.4 кГс с большой асимметрией между полюсами. Химические карты показывают значительное усиление хрома и железа и в меньшей степени кремния в ряде пятен, окружающих точки пересечения магнитного и вращательного экваторов. Геометрия этих химических пятен не коррелирует напрямую ни с локальным магнитным полем, ни с его наклоном.

Willamo et al. (2022a) использовали Доплер–Зеемановское картирование к обширному набору спектрополяриметрических данных HARPSpol для магнитоактивного молодого аналога Солнца — V889 Her. Авторы обнаружили переменность профилей V-параметра Стокса, которую можно объяснить двумя путями: неожиданные изменения морфологии крупномасштабного магнитного поля или это проявление сильного дифференциального вращения. Если сильное дифференциальное вращение V889 Her действительно присутствует, то его теоретические и численные оценки нуждаются

в пересмотре. Однако, если эти вариации вызваны магнитным полем, то следует осторожно интерпретировать Доплер–Зеемановские карты, построенные по данным за длительные интервалы времени.

Semenko et al. (2022) подвели основные итоги спектрополяриметрического обзора 56 CP-звезд в ассоциации Орион OB1. Был собран однородный материал полученный на 6-м телескопе БТА САО РАН в период 2013–2021 гг. Авторы обнаружили 14 новых магнитных CP-звезд. Общая выборка состоит из 31 магнитной звезды, что составляет 55% от общей популяции CP-звезд в ассоциации. Они нашли, что доля магнитных CP-звезд резко падает с возрастом. Среднее продольное магнитное поле в самой молодой подгруппе 1b ($\lg t = 6.23$) примерно в три раза сильнее, чем в более старых подгруппах 1a ($\lg t = 7.05$) и 1c ($\lg t = 6.66$). В Туманности Ориона, в области где находится самая молодая популяция 1d и часть 1c, найдено магнитное поле только у 20% звезд. А в окружающей ее области доля магнитных звезд сильно отличается и составляет 83%. Авторы считают, что этот эффект связан с большим количеством звезд Ae/Be Хербига среди самых молодых объектов, у которых магнитное поле плохо обнаруживается из-за сложного профиля спектральных линий.

Существование звезд с периодом вращения в годы и десятилетия (сверхмедленные ротаторы, ssrAp) ставит многие вопросы по поводу происхождения и эволюции магнитных звезд. Сложилось так, что они преимущественно являются Ap-звездами с сильным магнитным полем. Mathys et al. (2022) провели анализ кривых блеска TESS для идентификации ssrAp независимо от величины их магнитного поля. Ранее эта работа уже была проведена для звезд южного полушария. На северном полушарии авторы нашли 67 таких объектов. Среди них 46 отождествлены как кандидаты в сверхмедленные ротаторы. Они подтвердили, что медленное вращение встречается реже у слабомагнитных Ap-звезд, чем у сильномагнитных. Авторы доказали существование разрыва между 2 кГс и 3 кГс в распределении магнитного поля долгопериодических Ap-звезд. Они также подтверждают увеличение доли гоAp-звезд среди ssrAp.

Mathys et al. (2023) исследовали и подтвердили статус HD 213258 как Ap-звезды. Ее спектрополяриметрический материал был получен на ESPaDOnS в течении двух лет, также в работе использовалась фотометрия TESS и база данных CORAVEL. По расщеплению спектральной линии Fe II $\lambda 6149.2$ авторы оценили поверхностное магнитное поле $B_s \approx 3.8$ кГс звезды, которое не претерпело изменений за два года наблюдений. Период вращения по оценке авторов составляет около 50 лет. Они нашли быструю переменность с

периодом пульсаций порядка 7.58 минут. Лучевая скорость показывает небольшие вариации амплитуды, что позволяет предположить, что звезда является двойной SB1 типа.

Hubrig et al. (2021) получили новые данные по исследованию быстрой переменности гоAp-звезды γ Equ. Данные получены на спектрополяриметре PEPSI LBT. Период переменности составляет 12.2 минут. Магнитное поле звезды было измерено с наибольшей до настоящего времени точностью. Величина поверхностного магнитного поля достигает $B_s \approx 4$ кГс. Найдены изменения поперечного компонента магнитного поля, что может быть вызвано воздействием пульсаций, которые изменяют углы наклона магнитных силовых линий.

Jayaraman et al. (2022) сообщили об открытии новой магнитной CP-звезды HD 135348. Звезда исследовалась с помощью фотометрии TESS и спектрополяриметрии RSS SALT. Кривая блеска этой звезды демонстрировала вариации, которые характерны для звезд с жестко вращающимися магнитосферами (rigidly rotating magnetospheres, RRM). Новые спектрополяриметрические данные также подтверждают ее наличие. Фазовые кривые TESS хороший способ нахождения кандидатов в магнитные звезды.

Звезда HD 54879 спектрального класса O9.7V в настоящее время является единственной массивной магнитной звездой. Järvinen et al. (2022b) в течении трех лет проводили дополнительные наблюдения этой звезды на различных инструментах, с целью уточнения периода вращения и геометрии магнитного поля. Сспектрополяриметрические наблюдения объекта проводились на PEPSI LBT. Полученные данные свидетельствуют о малом изменении продольного магнитного поля из-за сверхмедленного вращения звезды. Авторы нашли, что измерения магнитного поля методом LSD по маскам разных элементов отличаются. Авторы считают, что различия связаны с разной глубиной образования этих элементов и неЛТР эффектом.

Поскольку известное в настоящее время число Ap/Vp-звезд, обладающих слабым магнитным полем невелико, Järvinen et al. (2022a) провели дополнительные спектрополяриметрические исследования для доказательства существования критического значения стабильности магнитного поля. Наблюдение выборки магнитных Ap-звезд с узкими и резкими линиями проводились на HARSPol. Из семи исследованных звезд слабое магнитное поле величиной порядка нескольких десятков Гаусс было обнаружено у HD 174779 и HD 203932. Кроме HD 189832 и HD 203932, остальные пять звезд имеют длинные периоды вращения.

Giarrusso (2022) провел прямые наблюдения радиального градиента магнитного поля звезды с

усиленными линиями гелия HD 58260 по спектрополяриметрии эмиссионных линий. Он нашел, что V -параметр Стокса в эмиссионных линиях металлов демонстрирует магнитное поле, значение которого в три раза слабее, чем полученное по линиям поглощения из внутренних слоев звезды. Также автор предоставил список спектральных линий, полезных для измерения поверхностного поля звезд раннего типа.

Hubrig et al. (2022) провели спектрополяриметрические наблюдения с высоким разрешением оптически доминирующей компоненты редкой двойной звезды с дефицитом водорода HD 181615. В настоящее время известно лишь небольшое количество таких систем на поздней стадии горения гелиевой оболочки. Наблюдения на спектрополяриметре HARPSpol показывают, что главный компонент является спектрально-переменной звездой с магнитным полем порядка десятков Гс. Нахождение поля у таких объектов представляет особый интерес, так как скорее всего они являются предшественниками суперновых с коллапсирующими ядрами (core-collapse supernovae) и источником гравитационных волн.

Giarrusso et al. (2022) описывают результаты мониторинга поверхностного магнитного поля с 2001 г. на разных телескопах со спектрографами высокого разрешения с целью поиска долгопериодических объектов. Наблюдения выполнены для 36 звезд, получено 412 новых спектров. Подтверждены периоды вращения 24 звезд. Расширены нижние пределы периодов для трех долгопериодических звезд: HD 55719 ($P > 38$ лет), HD 165474 ($P > 27$ лет) и HD 177765 ($P > 37$ лет). Впервые найдены периоды вращения пяти звезд и нижние пределы периодов еще для четырех. Авторы подтвердили, что период вращения γ Eri превышает 90 лет.

Romanuk et al. (2022) представили результаты измерений магнитного поля 74 звезд, наблюдения которых проводились в 2014 году. Выборка объектов состоит из химически пекулярных звезд и звезд стандартов. Наблюдения выполнялись на 6-м телескопе БТА САО РАН с использованием ОЗСП. При анализе спектров циркулярно-поляризованного излучения у звезд HD 168481, HD 184961, HD 187128, HD 214923 впервые обнаружено магнитное поле.

4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗВЕЗД ДРУГИХ ТИПОВ

В настоящем разделе будут рассмотрены исследования по поиску и анализу магнитного поля цефеид, активных холодных и ярких звезд, а также белых карликов.

4.1. Цефеиды

Классические цефеиды — это важные объекты для изучения звездной эволюции и космологии, однако со слабоизученными магнитными свойствами. Barron et al. (2022a) провели спектрополяриметрические наблюдения цефеид на ESPaDOnS CFHT. У классических цефеид Полярной, ξ Gem, δ Ser, RT Aur авторы обнаружили зеэмановские сигнатуры в спектрах. В результате слабое магнитное поле в единицы Гс было найдено у η Aql по восьми наблюдениям, и по одному наблюдению у Полярной, ξ Gem и δ Ser. Профили V -параметра Стокса для Полярной получены с высоким отношением S/N и демонстрируют сложную топологию магнитного поля. Для остальных звезд профили аналогичны тем, которые наблюдаются для некоторых Am-звезд.

Barron et al. (2022b) представили результаты наблюдений 25 классических цефеид на спектрополяриметрах ESPaDOnS и HARPSpol. Профили V -параметра Стокса показывают разнообразие топологии магнитного поля со слабым значением продольного компонента порядка 1 Гс. Профили V -параметра часто трудно объяснить в рамках нормального эффекта Зеэмана. Объяснить можно модифицированным влиянием скорости в атмосфере или наличием градиента магнитного поля.

4.2. Активные холодные звезды

Cang et al. (2021) исследовали магнитное поле в атмосфере и фотосфере звезды V530 Per с периодом вращения в $P = 0^d32$. Авторы по Доплер-Зеэмановским картам, построенным в разные фазы периода вращения, реконструировали распределение яркости и крупномасштабную геометрию магнитного поля звезды. Параллельно была исследована быстрая переменность поверхности из-за дифференциального вращения. Было найдено большое темное холодное пятно в полярной области и более яркие и горячие пятна на низких широтах. Крупномасштабное магнитное поле тороидальное, с осесимметричным компонентом. Максимальное радиальное поле достигает порядка 1 кГс. Найдено дифференциальное вращение, которое похоже на солнечное.

Детальные исследования магнитных свойств молодых солнцеподобных звезд дает важную информацию о прошлом нашего Солнца и его влиянии на раннюю Землю. Voro Saikia et al. (2022) изучили свойства и циклы магнитного поля умеренно вращающейся молодой солнцеподобной звезды κ Ceti, используя пятидесятилетние данные о хромосферной активности и шесть эпох спектрополяриметрических наблюдений. Алгоритмы анализа периода выявили хромосферный цикл с периодом 3.1 лет в дополнение к хорошо

известному периоду цикла звезды — 6 лет. Хотя два периода цикла имеют примерное соотношение 1 : 2, они демонстрируют необычную временную эволюцию. Спектрополяриметрические данные показывают смену полярности магнитного поля со временем порядка 10 лет. Такая сложная эволюция магнитной активности может быть похожей на эволюцию нашего молодого Солнца.

Магнитное поле может привести к торможению вращения из-за намагниченного звездного ветра. Степень потери углового момента зависит от величины и морфологии магнитного поля, потери массы, периода вращения, массы и радиуса. Metcalfe et al. (2022) выполнили спектрополяриметрические наблюдения двух F-звезд с разным возрастом 18 Sco и 16 Cyg A и B на Large Binocular Telescope. Авторы нашли магнитное торможение на порядок величины для 18 Sco и более умеренное для более старой звезды 16 Cyg.

Brown et al. (2022) получили спектрополяриметрические данные одновременно по мониторингу хромосферной активности и свойств магнитного поля для поздних карликов. Найдена положительная корреляция между указанными величинами. Хромосферная активность, переменность активности и тороидальное магнитное поле падают на главной последовательности с уменьшением скорости вращения.

Kochukhov (2021) выполнил обзор магнитного поля M-карликов. Определение величины и топологии магнитного поля играет ключевую роль в понимании физики планет. В работе рассматриваются современные методы и особенности определения магнитного поля этих объектов, с акцентом на прямую диагностику, основанную на интерпретации сигнатур эффекта Зеемана в спектрах интенсивности и поляризации с высоким разрешением.

Reiners et al. (2022) также озаботились изучением магнитного поля и его влиянием на звездную эволюцию M-карликов. Авторы провели наблюдения и получили более 15 000 спектров в ходе реализации проекта CARMENES для 292 M-карликов. Измерение поверхностного магнитного поля в сравнении с расчетами переноса излучения для 260 звезд проводилось впервые. Также были собраны данные, которые показали наличие тесной связи между нетермальным рентгеновским излучением, хромосферной активностью и магнитным потоком. Авторы продемонстрировали, что магнитное динамо генерирует магнитный поток на поверхности звезды пропорционально фазе вращения. Эмиссия в линиях Ca H и K насыщается при среднем магнитном поле порядка 800 Гс, в то время как эмиссия в H α и в рентгене растет при более сильном поле у более быстровращающихся звезд.

Lehtinen et al. (2022) рассмотрели топологические изменения магнитного поля переменной

во время минимума активности типа BY Dra — LQ Hya. Была проведена спектрополяриметрия на HARPSpol и ESPaDOnS. Карты магнитного поля и поверхностной яркости показывают сходные закономерности по сравнению с предыдущими исследованиями длительной фотометрии: неосесимметричная полярная структура магнитного поля, сложная структура поля в экваториальных областях. Авторы обнаружили слабую, но четкую тенденцию связи полярных структур с сильным радиальным полем и экваториальных — с азимутальным полем. Авторы нашли изменение полярности между 2016 г. и 2017 г., которые совпадают с минимумом пятнистости, наблюдаемом в длительной фотометрии. Полученные наблюдения могут быть объяснены турбулентным динамо, в котором дифференциальное вращение играет доминирующую роль.

Perugini et al. (2021) изучили эволюцию светимости и магнитных особенностей у молодой звезды солнечного типа HIP 89829. Наблюдения проводились на протяжении восьми периодов с 2010 г. по 2015 г. По Доплер—Зеемановским картам найдено большое стабильное пятно между широтами 20° и 30°. Оно стабильное на протяжении, по крайней мере, пяти лет наблюдений. Магнитное поле имеет доминирующий полоидальный компонент и более слабый тороидальный. У звезды наблюдается короткий период вращения $P = 0^d.57$. Авторы заключили, что HIP 89829 является активной молодой звездой солнечного типа с долгоживущими пятнами и имеющей близкое к твердотельному вращению.

Картирование крупномасштабного магнитного поля поздних F-звезд важно для понимания природы звездного динамо и динамики тонкой внешней конвективной зоны. Seach et al. (2022a) изучили звезды β Vir (F9V) и θ Dra (F8IV). Результаты авторов демонстрируют, что либо простое, либо сложное динамо-магнитное поле присутствует в зрелых поздних звездах F-типа с неглубокими внешними зонами конвекции. Результаты моделирования звездного ветра показывают, что его среднее давление для β Vir на расстоянии 1 а. е. соответствует условиям, наблюдаемым на Земле. Однако θ Dra создает давление ветра, на порядок превышающее давление солнечного ветра.

Изучение магнетизма звезд, находящихся вблизи перехода от реликтового магнитного поля к динамо важно для понимания их природы и эволюции. Seach et al. (2022b) изучили звезды по разные стороны от этой переходной зоны: β CrV (A9SrEuCr) и σ Boo. В работе представлены карты распределения поверхностного магнитного поля этих звезд. Реконструированное магнитное поле β CrV показывает сложную топологию реликтового магнитного поля, которое в значительной степени полоидальное. Такая конфигурация нетипична

для реликтового магнитного поля. Напротив, карта σ Boo демонстрирует простую топологию магнитного поля, преимущественно полоидальное и дипольное, что согласуется с наблюдениями других F-звезд.

Willamo et al. (2022b) выполнили Доплер–Зеемановское картирование пяти молодых звезд солнечного типа. Представлены новые ZDI карты от декабря 2017 г. Особый интерес представляет звезда V1358 Ori, у которой авторами была зафиксирована смена полярности. Корреляция между картами яркости и магнитного поля плохая. Причиной является присутствие мелкомасштабных магнитных структур различной полярности, которые компенсируют друг друга и не разрешаются на полученных авторами картах.

Известно, что на Солнце механизм динамо обеспечивает баланс между величиной магнитного потока, который виден в различных слоях атмосферы с помощью многоволновых наблюдений. Jeffers et al. (2022) применили такую же наблюдательную диагностику для двух активных и маломассивных K-карликов. Авторы показали, магнитное поле 61 Sng генерирует солнцеподобный динамомеханизм, поток которого наблюдается на всех длинах волн. В случае ϵ Eri работает более экстремальный вариант солнечного динамо. Авторы впервые построили магнитную диаграмму бабочки для других звезд, отличных от Солнца. Для ϵ Eri они нашли два хромосферных периода (три года и 13 лет), соответствующих двум налагающимся магнитным циклам.

4.3. Слабое магнитное поле ярких звезд. Экзопланеты

Yan et al. (2023), используя усовершенствованную версию спектрографа CRRES+, получили дневные спектры теплового излучения в ближнем инфракрасном диапазоне двух экзопланет WASP-18b и WASP-76b. Авторами методом кросс-корреляции обнаружены сильные эмиссионные линии CO и слабые H₂O на обеих планетах, что подтверждает наличие температурной инверсии на их дневных полушариях. Найденны экваториальные скорости вращения обеих планет.

Petit et al. (2022) провели долговременный мониторинг магнитного поля Веги в период 2008–2018 гг. Всего было получено более 2000 наблюдений. Авторы подтверждают, что результаты поляриметрии указывают на модуляцию магнитного поля с периодом 0.68 суток, который интерпретируется как период вращения. Доплер–Зеемановские карты звезды демонстрируют поверхностное магнитное поле сложной структуры. Авторы подтверждают существование локального полярного магнитного пятна, ранее обнаруженного

на Веге, с радиальным полем величиной 5 Гс. Топология поверхностного поля в основном дипольная с величиной $B_p = 9$ Гс и наклоном магнитной оси $\beta \approx 90^\circ$. Обе структуры стабильны на протяжении десятилетий.

Farrell et al. (2022) с целью изучить распределение начального магнитного поля изучили AB-звезды в диапазоне масс (1.6–3.4) M_\odot . Авторы протестировали множество моделей распределений различной формы и обнаружили, что гауссово распределение со средним значением поля 800 Гс и полной шириной 600 Гс соответствует наблюдаемой доле звезд с сильным магнитным полем.

Khodachenko et al. (2021) провели наблюдения расширяющейся атмосферы HD 209458b в далеком ультрафиолете транзитных линий поглощения метастабильного He I. Для интерпретации полученных данных авторы использовали гидродинамическое и численное моделирование методом Монте-Карло различной степени сложности и согласованности. Авторы выполнили глобальные самосогласованные 3D MHD-симуляции расширяющейся атмосферы со взаимодействующим звездным ветром. Также авторы исследовали формирование планетарной магнитосферы в звездном ветре и показали, что ее размер в большей степени определяется вытекающим из атмосферы потоком, чем напряженностью магнитного поля.

Для изучения влияния звездного ветра и прямого магнитного воздействия магнитного поля звезды на экзопланеты, вращающиеся внутри альфвеновского радиуса звезды, Folsom et al. (2022) наблюдали звезды 55 Cnc и HD 219134 с близкими экзопланетами. Анализ результатов проводился с использованием Доплер–Зеемановского картирования и MHD-моделирования звездного ветра. В случае HD 219134b наблюдается сильный звездный ветер, который воздействием на планету вызывает наблюдаемые эффекты за счет выдувания атмосферы с поверхности планеты. Вокруг 55 Cnc планета вращается внутри альфвеновского радиуса, вследствие чего прямое магнитное воздействие генерирует яркие области на поверхности планеты.

4.4. Магнитные белые карлики

Aitov et al. (2022a) представили результаты наблюдений эволюционно старых сильно намагниченных белых карликов. Были обнаружены новые кандидаты в белые карлики с разным возрастом со сверхсильным магнитным полем. Авторы нашли, что частота встречаемости белых карликов и с температурами менее 10 000 К находится на уровне 15% и более, в то время как для таких звезд среди молодых белых карликов не превышает 4–6%. Это означает, что тепловая эволюция физических свойств магнитных белых карликов отличается от

тепловой эволюции их слабомагнитных родственников.

В другой работе Aitov et al. (2022b) провели исследование влияния магнитоиндуцированного контроля внешней конвекции у звезд разных типов. В результате модельного анализа авторы подтвердили гипотезу о том, что сильно замагниченные белые карлики остывают медленнее слабомагнитных.

Berdyugin et al. (2023) провели магнитный обзор внутри объема в 20 пк для поиска магнитных белых карликов с разным возрастом в диапазоне 2–3 млрд лет. Авторы продемонстрировали высокую частоту магнитного поля среди белых карликов в указанном диапазоне возраста, в белых карликах малой и средней массы эффекты магнетизма становятся более распространенными по мере их старения, и величина поля в среднем становятся сильнее. Однако, имеющаяся статистика белых карликов старше 5 млрд лет не позволяет понять как эволюционирует поле после этого возраста. Авторы обнаружили магнитное поле пяти белых карликов DC-типа из выборки 23 подобных объектов.

Bagnulo and Landstreet (2022) изучают магнетизм изолированных белых карликов. Присутствие сильного магнитного поля справедливо для существенной доли вырожденных звезд. Авторы демонстрируют, что у массивных белых карликов, которые, вероятно, являются результатом слияний, наличие чрезвычайно сильного магнитного поля является типичным явлением и оно появляется сразу в фазе остывания. Это поле может быть сгенерировано динамо-механизмом, который активно проявляется во время слияния. Белые карлики с меньшей массой, которые часто являются продуктом эволюции одиночных звезд, редко обнаруживают магнитные свойства при рождении, но слабое поле появляется медленно примерно у четверти из них. Это внутреннее поле белого карлика, созданное на более ранней стадии эволюции, постепенно релаксирует на поверхность изнутри. Частота и величина магнитного поля продолжает расти, пока не сравняется с величиной поля массивных белых карликов.

Berdyugin et al. (2022) продемонстрировали результаты высокочувствительного изучения магнитного поля белых карликов, используя широкополосную поляриметрию. Циркулярная поляризация белых карликов с разным возрастом и спектральным типом используется для изучения магнитного поля и эволюции магнитного поля вырожденных звезд. По сравнению со спектрополяризацией, широкополосная циркулярная поляризация имеет преимущество из-за более высокой точности в континууме и может использоваться для поиска магнитного поля. Работа демонстрирует первые результаты этой наблюдательной программы.

После получения новых спектрополяризационных наблюдений и с учетом литературных данных Bagnulo and Landstreet (2021) проверили почти всю выборку в количестве 152 белых карликов в пределах 20 пк от Солнца с точностью выше 1 кГс для белых карликов DA-типа и до 1 МГс — для DC-типа. Авторы нашли, что 33 белых карлика DC-типа внутри являются магнитными. Распределение магнитного поля колеблется от 40 кГс до 300 МГс и является однородным, что резко контрастирует с распределением частоты поля, которое получено в результате спектроскопических исследований. Примечательно, что поле слабее 40 кГс не обнаружено. Авторы подтверждают, что магнитное поле чаще встречается у белых карликов с массой выше средней, особенно у более молодых звезд. Обнаружен заметный дефицит магнитных белых карликов моложе 0.5 млрд лет. Частота появления магнитного поля у белых карликов, прошедших процесс кристаллизации ядра, значительно выше, чем у таковых с полностью жидким ядром.

Wilson et al. (2021) исследовали магнитное поле белого карлика в обособленной двойной системе с общей оболочкой SS Cet. Найдено среднее магнитное поле величиной порядка 600–700 кГс, которое не является осесимметричным относительно оси вращения. Период вращения белого карлика составляет $P = 0^d5$. Моделирование предсказывает, что SS Cet превратится в промежуточный поляр через 7–17 млрд лет.

Romanuk (2022) провел обзор работ, опубликованных в 2021 году, по тематике исследования магнитного поля химически пекулярных и родственных им звезд. Рассматриваются инструменты, методы наблюдений и анализа данных, результаты фотометрии, спектроскопии и спектрополяриметрии, которые предназначены для анализа магнитных звезд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен обзор 75 статей, посвященных исследованиям магнетизма звезд разных спектральных классов: 33 статьи касаются химически пекулярных звезд, 24 — магнитных звезд других типов и 14 работ представляют новые приборы и методы анализа исследований. В журнале *Monthly Notices Royal Astronomical Society* опубликовано 26 статей, 20 — в *Astronomy and Astrophysics*, пять — в *Astrophysical Bulletin* и 24 — в других изданиях. По-прежнему основной массив наблюдательных данных получен на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа, спектрополяриметрах FORS 1/2, CRIRES VLT и ESPaDOnS CFHT, PEPSI LBT. Описываются спектрографы и другие приборы для будущих больших телескопов.

БЛАГОДАРНОСТИ

В этом исследовании использовалась система астрофизических данных NASA's Astrophysics Data System (ADS).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Автор благодарит Российский научный фонд за финансовую поддержку работы (грант РНФ № 21-12-00147).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. N. Aitov, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 301 (2022a).
2. V. N. Aitov, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 308 (2022b).
3. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (4), 5902 (2021).
4. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **935** (1), L12 (2022).
5. J. A. Barron, G. A. Wade, N. R. Evans, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **512** (3), 4021 (2022a).
6. J. A. Barron, G. A. Wade, C. P. Folsom, and O. Kochukhov, arXiv e-prints astro/ph:2207.09255 (2022b).
7. A. V. Berdyugin, V. Piirola, S. Bagnulo, et al., *Astron. and Astrophys.* **657**, id. A105 (2022).
8. A. V. Berdyugin, V. Piirola, S. Bagnulo, et al., *Astron. and Astrophys.* **670**, id. A2 (2023).
9. S. Boro Saikia, T. Lüftinger, C. P. Folsom, et al., *Astron. and Astrophys.* **658**, id. A16 (2022).
10. P. Bristow, A. Baruffolo, J. Smoker, et al., *SPIE Conf. Proc.* **12184**, p. 121845X (2022).
11. E. L. Brown, S. V. Jeffers, S. C. Marsden, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **514** (3), 4300 (2022).
12. T. Q. Cang, P. Petit, J. F. Donati, and C. P. Folsom, *Astron. and Astrophys.* **654**, id. A42 (2021).
13. G. Catanzaro, C. Colombo, C. Ferrara, and M. Giarrusso, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **515** (3), 4350 (2022).
14. F. A. Dannert, M. Ottiger, S. P. Quanz, et al., *Astron. and Astrophys.* **664**, id. A22 (2022).
15. B. Das, P. Chandra, M. E. Shultz, et al., *Astrophys. J.* **925** (2), id. 125 (2022a).
16. B. Das, P. Chandra, M. E. Shultz, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **517** (4), 5756 (2022b).
17. R. J. Dorn, P. Bristow, J. V. Smoker, et al., *Astron. and Astrophys.* **671**, id. A24 (2023).
18. M. El Morsy, A. Vigan, M. Lopez, et al., *SPIE Conf. Proc.* **12185**, p. 121858O (2022).
19. E. Farrell, A. S. Jermyn, M. Cantiello, and D. Foreman-Mackey, *Astrophys. J.* **938** (1), id. 10 (2022).
20. C. P. Folsom, A. A. Vidotto, and L. Fossati, in *Proc. 21st Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, Toulouse, France, 2022*, id. 203 (<https://zenodo.org/record/7592884>).
21. L. Fréour, C. Neiner, J. D. Landstreet, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **520** (3), 3201 (2023).
22. M. Giarrusso, *Astrophys. J.* **925** (1), id. 2 (2022).
23. M. Giarrusso, M. Cecconi, R. Cosentino, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **514** (3), 3485 (2022).
24. J. H. Grunhut, G. A. Wade, C. P. Folsom, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **512** (2), 1944 (2022).
25. S. Hubrig, S. P. Järvinen, I. Ilyin, and M. Schöller, *Astrophys. J.* **933** (1), id. 27 (2022).
26. S. Hubrig, S. P. Järvinen, I. Ilyin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **508** (1), L17 (2021).
27. S. P. Järvinen, S. Hubrig, R. Jayaraman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **516** (2), 2629 (2022a).
28. S. P. Järvinen, S. Hubrig, M. Schöller, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **510** (3), 4405 (2022b).
29. R. Jayaraman, S. Hubrig, D. L. Holdsworth, et al., *Astrophys. J.* **924** (1), id. L10 (2022).
30. S. V. Jeffers, R. H. Cameron, S. C. Marsden, et al., *Astron. and Astrophys.* **661**, id. A152 (2022).
31. S. Joshi, O. Trust, E. Semenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **510** (4), 5854 (2022).
32. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Hubrig, and M. Schöller, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **515** (2), 3094 (2022).
33. M. L. Khodachenko, I. F. Shaikhislamov, H. Lammer, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (3), 3626 (2021).
34. O. Kobzar, V. Khalack, D. Bohlender, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **517** (4), 5340 (2022).
35. O. Kochukhov, *Astron. and Astrophys.* **29** (1), article id. 1 (2021).
36. O. Kochukhov, H. Gürsoytrak Mutlay, A. M. Amarsi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **521** (3), 3480 (2023).
37. O. Kochukhov, V. Khalack, O. Kobzar, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **506** (4), 5328 (2021).
38. O. Kochukhov, N. Papakonstantinou, and C. Neiner, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **510** (4), 5821 (2022).
39. B. S. Konrad, E. Alei, S. P. Quanz, et al., *Astron. and Astrophys.* **664**, id. A23 (2022).
40. J. J. Lehtinen, M. J. Käpylä, T. Hackman, et al., *Astron. and Astrophys.* **660**, id. A141 (2022).
41. B. Lopez, S. Lagarde, R. G. Petrov, et al., *Astron. and Astrophys.* **659**, id. A192 (2022).
42. V. Makaganiuk, O. Kochukhov, N. Piskunov, et al., *Astron. and Astrophys.* **525**, id. A97 (2011).
43. A. Marconi, M. Abreu, V. Adibekyan, et al., *SPIE Conf. Proc.* **12184**, p. 1218424 (2022).
44. G. Mathys, V. Khalack, O. Kobzar, et al., *Astron. and Astrophys.* **670**, id. A72 (2023).
45. G. Mathys, D. W. Kurtz, and D. L. Holdsworth, *Astron. and Astrophys.* **660**, id. A70 (2022).

46. T. S. Metcalfe, A. J. Finley, O. Kochukhov et al., *Astrophysical Journal*, **933** (1), id. L17.
47. Z. Mikulášek, E. Semenko, E. Paurzen, et al., *Astron. and Astrophys.* **668**, id. A159 (2022).
48. E. Muslimov and C. Neiner, arXiv e-prints astro/ph:2211.09931 (2022).
49. E. Muslimov, J.-F. Sauvage, S. Lombardo, et al., *SPIE Conf. Proc.* **12184**, p. 121848G (2022a).
50. E. Muslimov, G. Valyavin, V. Chambouleyron, et al., in L. Schreiber, D. Schmidt, and E. Vernet (eds.), *SPIE Conf. Proc.* **12185**, p. 1218548 (2022b).
51. A. Oplištilová, P. Mayer, P. Harmanec, et al., *Astron. and Astrophys.* **672**, id. A31 (2023).
52. E. Paurzen, *Astron. and Astrophys.* **661**, id. A89 (2022).
53. E. Paurzen and M. Prišegen, *Astron. and Astrophys.* **667**, id. L10 (2022).
54. G. M. Perugini, S. C. Marsden, I. A. Waite, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **508** (3), 3304 (2021).
55. P. Petit, T. Böhm, C. P. Folsom, et al., *Astron. and Astrophys.* **666**, id. A20 (2022).
56. N. Przybilla, L. Fossati, and C. S. Jeffery, *Research Notes of the American Astronomical Society* **5** (10), id. 254 (2021).
57. S. P. Quanz, M. Ottiger, E. Fontanet, et al., *Astron. and Astrophys.* **664**, id. A21 (2022).
58. A. Reiners, D. Shulyak, P. J. Käpylä, et al., *Astron. and Astrophys.* **662**, id. A41 (2022).
59. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **70** (2), 191 (2015).
60. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **71** (3), 314 (2016).
61. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 286 (2017).
62. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 437 (2018).
63. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 437 (2019).
64. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **75** (4), 447 (2020).
65. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 498 (2021).
66. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **77** (4), 437 (2022).
67. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, E. A. Semenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 271 (2022).
68. T. Ryabchikova, Y. Pakhomov, L. Mashonkina, and T. Sitnova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **514** (4), 4958 (2022a).
69. T. Ryabchikova, S. Zvyagintsev, A. Tkachenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **509** (1), 202 (2022b).
70. J. M. Seach, S. C. Marsden, B. D. Carter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **509** (4), 5117 (2022a).
71. J. M. Seach, S. C. Marsden, B. D. Carter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **513** (3), 4278 (2022b).
72. E. Semenko, I. Romanyuk, I. Yakunin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **515** (1), 998 (2022).
73. M. E. Shultz, O. Kochukhov, J. Labadie-Bartz, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (1), 1283 (2021).
74. H. F. Song, G. Meynet, A. Maeder, et al., *Astron. and Astrophys.* **657**, id. A60 (2022).
75. M. J. Stift and F. Leone, *Astron. and Astrophys.* **659**, id. A33 (2022).
76. G. Valyavin, G. Beskin, A. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (4), 495 (2022).
77. A. Wehrhahn, N. Piskunov, and T. Ryabchikova, *Astron. and Astrophys.* **671**, id. A171 (2023).
78. T. Willamo, T. Hackman, J. J. Lehtinen, et al., arXiv e-prints astro/ph:2203.13398 (2022a).
79. T. Willamo, J. J. Lehtinen, T. Hackman, et al., *Astron. and Astrophys.* **659**, id. A71 (2022b).
80. D. J. Wilson, O. Toloza, J. D. Landstreet, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **508** (1), 561 (2021).
81. T. Wittman, J. R. Dukes, Jr., and S. J. Adelman, *Astronomische Nachrichten* **343** (9-10), article id. e20220040 (2022).
82. O. Y. Yakovlev, A. F. Valeev, G. G. Valyavin, et al., *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **9**, id. 903429 (2022).
83. F. Yan, L. Nortmann, A. Reiners, et al., *Astron. and Astrophys.* **672**, id. A107 (2023).

Magnetic Fields in Chemically Peculiar and Related Stars. IX. Main Results Obtained in 2022 and an Analysis of Immediate Prospects

I. I. Romanyuk¹

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

We review the stellar magnetism studies published in 2022. We analyzed a total of 75 papers, which focus mostly on the study of magnetic fields in chemically peculiar and active cool stars. In the latter, migration of magnetic spots and change of their configuration is observed. Projects of spectrographs and spectropolarimeters for new big telescopes are also presented.

Keywords: *stars: magnetic field—stars: chemically peculiar—white dwarfs*