

УДК 524.31.084-337

ЧАСТОТЫ ВСТРЕЧАЕМОСТИ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ С РЕГУЛЯРНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

© 2024 В. Н. Аитов^{1*}, Е. П. Корчагина¹, Г. Г. Валявин¹, С. Н. Фабрика¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 14 мая 2024; после доработки 18 июня 2024; принята к публикации 28 июня 2024

В работе приводится и анализируется сводка магнитометрических исследований одиночных белых карликов (БК), проводимых в САО РАН совместно с рядом других обсерваторий. Целями исследований являются поиск у этих звезд регулярных крупномасштабных магнитных полей и построение вероятностного распределения встречаемости БК в зависимости от напряженности этих полей. На основе проведенного анализа определены БК, магнитосферы которых не меняют свои конфигурации на протяжении длительного времени — от нескольких десятков до сотен лет как минимум, а возможно, и более. Эти звезды могут быть использованы в качестве стандартов круговой поляризации. С использованием данных современных обзоров и данных наблюдений САО РАН построены версии наблюдаемых вероятностных распределений БК по их поверхностным магнитным полям в диапазоне 10^3 – 10^9 Гс. Распределение БК с полями от 10^6 Гс до 10^9 Гс хорошо описывается степенной зависимостью. В области меньших полей зависимость нарушается, демонстрируя селекционный «завал». Селекция вызвана технической сложностью магнитометрических исследований БК. В работе обсуждается также и физическая природа селекции, связанная с усложнением взаимодействия глобальных магнитных полей малой напряженности (менее 10 кГс) с динамическими процессами в поверхностных слоях БК. В частности, конвекция способна разрушать глобальную симметрию поверхностного магнитного поля напряженностью в несколько килогаусс. На основе анализа полученных распределений сделан вывод о том, что все БК с поверхностными полями свыше нескольких десятков килогаусс являются носителями регулярных глобальных полей, затухающих на временах 10^{10} лет. Магнитные поля с напряженностями от нескольких килогаусс и ниже теряют свою глобальную структуру, фрагментируясь в пятна, что затрудняет и даже делает невозможным их детектирование стандартными спектрополяриметрическими методами. Приводятся подтверждающие примеры и рекомендации для совершенствования методики магнитометрических наблюдений вырожденных звезд со слабыми магнитными полями.

Ключевые слова: *белые карлики — магнитные поля*

1. ВВЕДЕНИЕ

Большая часть звезд Галактики с умеренными и малыми массами заканчивают свой эволюционный путь БК. На сегодняшний день этот класс звезд изучен в достаточной для понимания его фундаментальных характеристик степени, однако остается целый ряд еще не до конца решенных вопросов. Одной из групп таких вопросов является проблема происхождения одиночных БК с сильными крупномасштабными магнитными полями (магнитные белые карлики, МБК), величины напряженности которых превышают десятки килогаусс и более (см., например, Angel et al., 1981; Schmidt and Smith, 1995; Liebert et al., 2003; Aznar Cuadrado et al., 2004; Valyavin et al., 2003, 2006, 2014; Kepler et al., 2013 и др.).

*E-mail: vit9517@sao.ru

В ранних исследованиях полагалось, что МБК являются конечной стадией эволюции магнитных Ap/Bp-звезд (Angel et al., 1981). Однако более поздние исследования показали, что МБК могут быть потомками звезд и других классов (Liebert et al., 2003; Kawka and Vennes, 2004; Wickramasinghe and Ferrario, 2005), а также образовываться в результате слияния двух БК (Valyavin and Fabrika, 1998, 1999; Tout et al., 2008).

Исследования, посвященные эволюции МБК, выявили некоторые ее особенности. Одной из них является увеличение частоты встречаемости этих объектов с возрастом (Liebert and Sion, 1979; Fabrika and Valyavin, 1998, 1999; Valyavin and Fabrika, 1999; Liebert et al., 2003). В то время как Wendell et al. (1987) предполагают, что магнитные поля БК должны затухать со временем, наблюдения свидетельствуют об увеличении числа МБК с

экстремальными магнитными полями с возрастом. 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 слабомагнитных МБК и исследование уже известных с привлечением более точных методов наблюдений. В области слабых магнитных полей с поверхностными полями менее 1 МГс выборка до сих пор скудная и составляет чуть более одного десятка звезд, в то время как выборку объектов с полями свыше 1 МГс в ближайшем солнечном окружении можно считать полной (см., например, Kepler et al., 2013).

В CAO РАН с конца 1980-х и начала 1990-х годов ведется программа поиска глобальных (регулярных) магнитных полей у БК. Основной целью данной программы является поиск МБК с полями менее 1 МГс и изучение распределения этих объектов в зависимости от величины магнитного поля. Анализ этого распределения может дать ответ на вопрос о физической природе этих объектов, в частности, являются ли МБК отдельным подклассом БК с уникальными эволюционными особенностями или МБК — это объекты с самыми большими величинами напряженности поля среди непрерывного распределения магнитных полей всех БК. В настоящей работе мы еще раз анализируем результаты этих исследований в совокупности с новыми результатами других авторов.

Основной целью работы является получение временных оценок физической стабильности глобальных магнитных полей МБК, наблюдаемая переменность которых обусловлена только вращением звезды. Используемая база наблюдений — до нескольких десятков лет — позволяет исследовать стабильность магнитных полей детектированных объектов программы на временах от нескольких десятков до тысяч лет. Вторая цель работы заключается в построении и исследовании функции вероятностного распределения МБК в зависимости от величин их магнитных полей.

В обзорной части настоящей работы 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. Для каждой магнитной звезды даем характерное время стабильности (отсутствие эволюционных изменений) их магнитосфер. Используются все проведенные наблюдения программы —

как исторически сложившиеся субмегагауссные, с использованием разных спектрополяриметров 6-м телескопа, так и поляризационные наблюдения БК на 1-м телескопе с целью поиска сильномагнитных МБК с полями более 1 МГс, описанные в разделе 3. В разделе 4 мы анализируем весь мировой опыт исследования МБК, включая наши наблюдения, и обсуждаем статистические свойства популяции МБК. Выводы приведены в разделе 5.

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 (Bychkov et al., 1991; Fabrika et al., 1997, 2003; Shtol et al., 1997; Valyavin et al., 2003, 2005ab, 2006, 2008, 2011, 2014), а также в совместных работах CAO РАН с зарубежными группами (Landstreet et al., 2012, 2015, 2016, 2017, 2018; Bagnulo and Landstreet, 2018), в которых в том числе представлены данные с телескопов ESO и 3.6-м телескопа Канадо-Франко-Гавайской обсерватории CFHT.

При проведении наблюдений на базе телескопа БТА CAO РАН использовались следующие инструменты:

1. Водородный магнитометр (Shtol, 1984; Shtol et al., 1985; Shtol, 1991, 1993).
2. Основной звездный спектрограф БТА (ОЗСП БТА, Vasilev et al., 1977; Kudryavtsev et al., 2006; Panchuk et al., 2014).
3. Спектрограф СП-124 с поляризационной приставкой (Gusev et al., 1976; Bychkov et al., 2000).
4. Спектрополяриметр UAGS (Naidenov et al., 2002).

При сотрудничестве с зарубежными коллегами использовались спектрополяриметры FORS-I VLT (Appenzeller et al., 1998), ISIS WHT (Landstreet et al., 2016) и ESPaDOnS (Donati, 2003).

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 Romanuk et al. (2021).

Звезда считалась магнитной, если среднее значение ее магнитного поля превышало ошибку измерений в три и более раз (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

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

Объект	$\langle B_e \rangle$, кГс	$\sigma(\langle B_e \rangle)$, кГс	Ссылки	Объект	$\langle B_e \rangle$, кГс	$\sigma(\langle B_e \rangle)$, кГс	Ссылки
Немагнитные				WD 1126+185	3.2	10.5	[2]
WD 0034–211	35.0	13.0	[2]	WD 1425–811	0.5	1.4	[8]
WD 0101+048	0.5	2.2	[2]	WD 1647+591	5.3	3.1	[5]
WD 0148+467	12.0	7.0	[2]	WD 1733–544	4.1	4.4	[8]
WD 0227+050	2.6	3.3	[2]	WD 1756+827	4.2	4.5	[2]
WD 0232+525	11.4	16.0	[3]	WD 1826–045	2.7	1.5	[8]
WD 0235+064	1.7	5.0	[2]	WD 1952–206	0.5	1.2	[8]
40 Eri B	0.5	0.6	[4]	WD 2032+248	1.9	3.9	[2]
WD 0501+527	3.9	2.8	[5]	WD 2115–560	0.9	1.0	[8]
WD 0509+168	6.2	2.1	[2]	WD 2151–015	0.3	0.2	[8]
WD 0532+414	2.5	5.0	[2]	WD 2333–049	5.1	5.6	[8]
WD 0627+299	15.9	13.0	[2]	WD 2326+049	0.2	2.4	[2]
WD 0644+375	1.9	1.8	[5]	WD 2341+322	9.5	10.6	[2]
WD 0939+071	3.2	4.5	[2]	Магнитные			
WD 0943+441	26.1	19.3	[2]	WD 0009+501	65.5	14.5	[1]
WD 1019+637	8.3	7.5	[2]	WD 1953–011	42.4	1.9	[6]
WD 1026+002	5.8	15.2	[2]	WD 2047+372	9.1	1.6	[7]
WD 1105–048	5.3	2.5	[5]	WD 2105–820	9.6	0.2	[8]
WD 1134+300	5.8	3.8	[2,5]	WD 2359–434	3.6	0.7	[8]

[1] — Valyavin et al. (2005b), [2] — Valyavin et al. (2003), [3] — Fabrika et al. (1997), [4] — Landstreet et al. (2015), [5] — Valyavin et al. (2006), [6] — Valyavin et al. (2008), [7] — Landstreet et al. (2016), [8] — Landstreet et al. (2012).

к среднему значению, близкому к нулю. Таковыми объектами являются, например, WD 0009+501, средняя оценка поля которого за период вращения меняется от -120 кГс до $+50$ кГс, и WD 2047+372 с полем 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, магнитное поле у которых обнаруживается спорадически.

2.1. WD 0009+501 \equiv GJ 1004

Магнитное поле этого объекта впервые обнаружили Schmidt and Smith (1994) 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 (Fabrika et al., 2003; Valyavin et al., 2005b). В ходе наблюдений, длившихся около

пяти лет, получено 97 оценок магнитного поля (Valyavin et al., 2005b) 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 Schmidt and Smith, 1994) 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. WD 1953–011

В работе Schmidt and Smith (1995) 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 для WD 0009+501, для выяснения геометрических свойств и природы магнитного поля этого объекта был проведен мониторинг (Valyavin et al., 2008, 2011, 2014). 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. (Valyavin et al., 2008). В итоге было получено 16 оценок продольного магнитного поля по измерениям в ядре линии H α .

Сопоставив все наблюдательные данные, полученные Maxted et al. (2000) и Valyavin et al. (2008), 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 (Wendell et al., 1987).

2.3. WD 2047+372, WD 2359–434

Одними из самых слабomagнитных известных на данный момент БК, среди рассмотренных нами, являются WD 2047+372 и WD 2359–434. Они были открыты в ходе совместных исследований сотрудников САО РАН с Landstreet et al. (2016; 2017). 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.

2.4. WD 1105–048

У WD 1105–048, как и у обсуждаемого ниже (в разделе 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 Aznar Cuadrado et al. (2004). Три оценки были получены в САО РАН

(Valyavin et al., 2006), но лишь по одной из них, дающей напряженность поля 7–8 кГс, можно было утверждать о его наличии. Кроме того, в работе Bagnulo and Landstreet (2018) 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 разделе 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.

2.5. WD 1647+591

WD 1647+591 — хорошо изученный БК, принадлежащий к классу ZZ Cet. Исследование магнитных свойств этой звезды впервые провели Schmidt and Grauer (1997). В указанной работе лишь несколько оценок магнитного поля этого объекта удовлетворяло критерию 3σ . Среди наблюдений Valyavin et al. (2006) только одно измерение показало значимость на уровне 2.7σ . Таким образом, глобального магнитного поля 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.

2.6. WD 2105–820

Поверхностное магнитное поле WD 2105–820 впервые нашли Koester et al. (1998), получившие оценку 42 кГс. Landstreet et al. (2012) провели пять измерений продольного магнитного поля. По наблюдениям, охватывающим временной промежуток чуть более месяца, оно составило от 8 кГс до 11 кГс. В работе Bagnulo and Landstreet (2018) были приведены три дополнительных измерения продольного поля, сделанных 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.

3. ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МБК НА ЦЕЙСС-1000

Наблюдения проводились с помощью фотометра-поляриметра ММРР (Emelyanov and Fatkhullin, 2019; Komarov et al., 2020) на телескопе Цейсс-1000 САО РАН. Описание программы и основные результаты ее выполнения представлены в работах Aitov et al. (2022) и Aitov and Valyavin (2023). Вопрос стабильности магнитных полей БК был рассмотрен в работе Aitov and Valyavin (2023). В частности, мы анализировали долгосрочное поведение магнитных полей двух классических сильномагнитных БК: GRW +708247 и WD 1312+098. Здесь мы представляем численные оценки времени стабильности их магнитного поля.

3.1. GRW +708247

GRW +708247 — это первый белый карлик, у которого было обнаружено магнитное поле. Его изучали многочисленные группы исследователей (Angel et al., 1972; Landstreet and Angel, 1975; West, 1989; Berdyugin et al., 2022), поэтому его магнитные свойства очень хорошо известны.

В рамках работы по поиску новых МБК, проводимой на телескопе Цейсс-1000 САО РАН, этот объект прежде всего был выбран в качестве стандарта, так как его круговая поляризация, по всей видимости, остается стабильной на протяжении десятков лет, начиная с момента первых исследований Kemp et al. (1970). Стабильность также подтвердили West (1989) и Friedrich and Jordan (2001), рассмотрев возможный период вращения GRW +708247 на временах порядка 20–30 лет и не обнаружив значимых вариаций.

По результатам исследования в белом свете (Aitov et al., 2022) мы оценили круговую поляризацию этого объекта как $V = 3.18 \pm 0.02\%$, что хорошо согласуется с данными других авторов, дающих оценки $V \approx 3\%$.

Для определения характерного времени эволюции магнитного поля звезды мы сравнили наши данные с описанным в работе Landstreet and Angel (1975) распределением круговой поляризации по спектру этой звезды, свернутому с зависимостью квантовой эффективности используемого ПЗС-приемника от длин волн, которая была взята из работы Emelyanov and Fatkhullin (2019). 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 более $\tau \gg 100$ лет.

Чрезвычайно долгое время эволюции также подтверждается тем фактом, что результаты наблюдений круговой поляризации в различных

фильтрах (B, V), приведенные Friedrich and Jordan (2001) и Berdyugin et al. (2022), совпадают в пределах ошибок.

3.2. WD 1312+098

WD 1312+098 был выбран нами в качестве стандарта, так как для этого объекта имеется детальная фазовая кривая вращательно-модулированного изменения круговой поляризации (для периода $P = 5^h 42^m 39.4^s$), полученная Schmidt and Norworthy (1991) по наблюдениям 1979–1989 гг. На рис. 1 мы приводим результаты из указанной работы и наши данные. Они хорошо согласуются между собой.

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.

В таблице 2 также приведены усредненные по времени результаты наблюдений в рамках программы широкополосной поляриметрии, проводимой на телескопе Цейсс-1000 в САО РАН.

В то время как для известных МБК наличие у них гигантских магнитных полей подтверждается, обнаружение новых кандидатов служит основанием для продолжения магнитометрических исследований БК в САО РАН. При этом представленного выше материала, а также опубликованного материала других авторов уже достаточно, чтобы сделать вполне определенные выводы.

4. ВСТРЕЧАЕМОСТЬ МБК И ВЕЛИЧИНА ИХ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОЛЯ

Проведенный нами анализ МБК с субмегагауссными магнитными полями показывает, что все объекты с напряженностью поля от нескольких десятков килогаусс и выше отличаются высокой стабильностью магнитных свойств на временах от нескольких десятков лет и более. Такую же стабильность показывают и магнитосферы МБК с экстремально сильными магнитными полями.

Практически нет сомнений, что и все остальные известные МБК с полями более нескольких десятков–сотен килогаусс также демонстрируют стабильные магнитосферы. Это, с одной стороны, открывает практическую возможность использовать эти 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

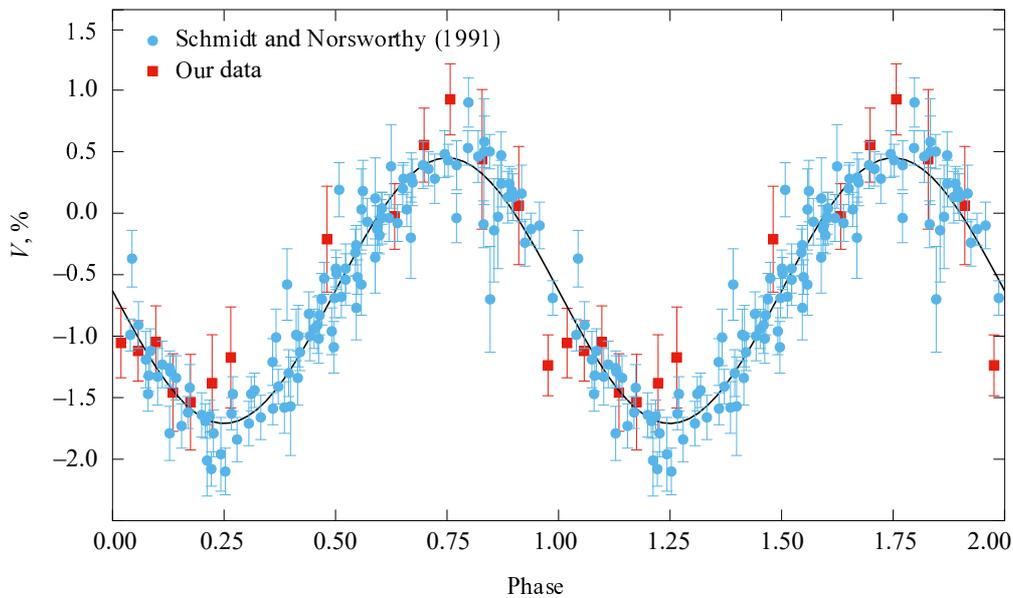


Рис. 1. Фазовая кривая WD 1312+098. Красные квадраты — наши данные, голубые кружки и черная линия — соответственно данные и их аппроксимация из работы Schmidt and Norsworthy (1991).

Таблица 2. Средние оценки круговой поляризации, полученные по наблюдениям на фотометре-поляриметре ММРР телескопа Цейсс-1000 (Aitov and Valyavin, 2023)

Объект	$\langle V \rangle$, %	σ , %	Объект	$\langle V \rangle$, %	σ , %	Объект	$\langle V \rangle$, %	σ , %
WD 1532+129	0.12	0.06	LSR J2059+5517	0.30	0.16	WD 0123+732	0.10	0.04
WD 1257+037	-0.08	0.08	WD 1814+134	0.11	0.12	WD 2248+293	0.14	0.09
GRW +708247 ^a	3.18	0.02	WD 2215+388	0.09	0.06	WD 2347+292	-0.15	0.06
WD 1633+572 ^b	-0.38	0.08	LP 240-30 ^b	0.27	0.09	WD 0245+541 ^b	-0.45	0.08
WD 1309+853 ^a	0.21	0.06	WD 2307+548	-0.05	0.04	WD 0749+426	0.21	0.11
WD 1312+098 ^a	-0.80	0.10	WD 2322+137	-0.11	0.04	WD 0840-136	0.42	0.16
WD 1748+708 ^a	0.60	0.04						

^aИзвестные МБК, ^bновые кандидаты в МБК с оценками поляризации более 3σ .

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 (Wendell et al., 1987). Интригу составляет группа слабомагнитных БК, магнитные поля у которых находят с переменным успехом (см. выше), 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).

Впервые MFF для МБК с величинами магнит-

ного поля в интервале от 500 кГс до 1 ГГс упоминается в работе Fabrika and Valyavin (1998; 1999), которые представили ее 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 магнитным полям в диапазоне от 10 кГс и выше.

Функция магнитного поля и ее наблюдаемые

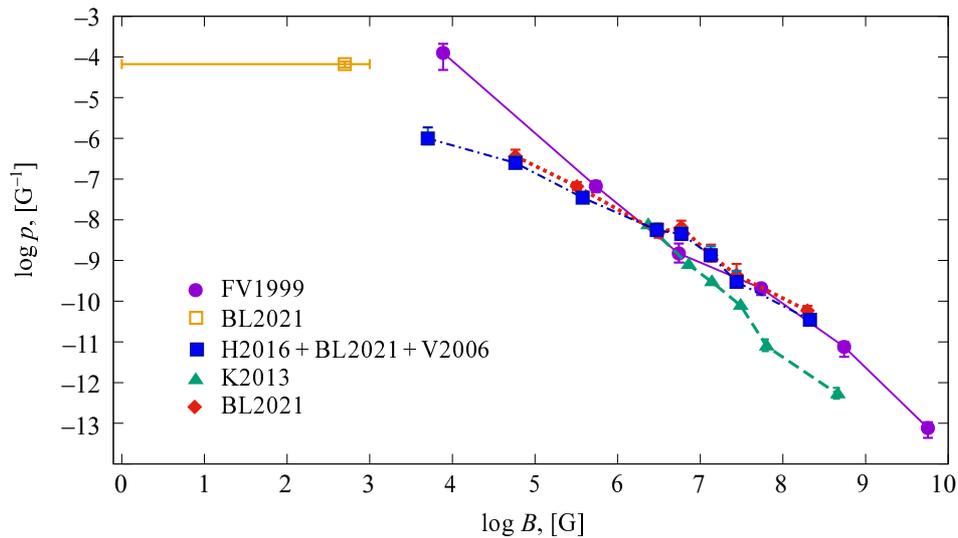


Рис. 2. Функция магнитного поля белых карликов (МФФ) — зависимость плотности вероятности p встретить МБК с заданным значением магнитного поля B — по данным различных авторов: FV1999 — Fabrika and Valyavin (1999), BL2021 — Bagnulo and Landstreet (2021), H2016 — Holberg et al. (2016), V2006 — Valyavin et al. (2006), K2013 — Kepler et al. (2013). Оранжевым пустым квадратом показан нижний предел МФФ по данным Bagnulo and Landstreet (2021) по объектам, у которых магнитное поле не было обнаружено, и критерий 3σ для которых был менее 1 кГс (в статье указана точность 1σ).

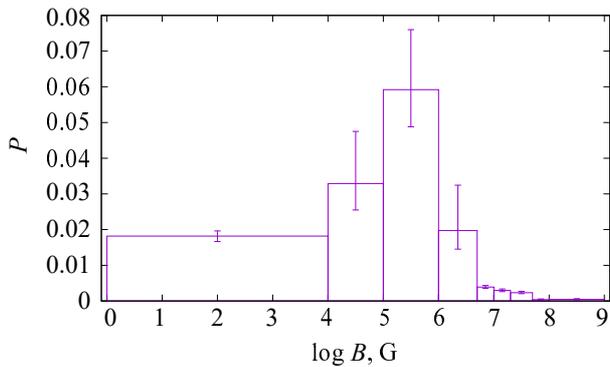


Рис. 3. Вероятность p обнаружения магнитного поля с напряженностью поля B по данным каталога Kepler et al. (2013) и работы Bagnulo and Landstreet (2021) для объектов с высокими и низкими напряженностями магнитных полей соответственно.

версии по результатам обзоров разных авторов представлены на рис. 2 и 3, где приведены также и ссылки на соответствующие публикации. Как можно видеть, увеличение статистики и условия, в которых делался тот или иной обзор, ведут к небольшому различию результатов. В случае, когда авторами обзоров не ставилась задача пространственного ограничения выборки (например, Kepler et al., 2013), частота встречаемости белых карликов в области сильных магнитных полей получалась заниженной. Однако при условии ограничения выборки (20 пк; Bagnulo and Landstreet, 2021) частоты вероятностного распределения БК в сильномагнитной области совпали с исследованиями Fabrika and Valyavin (1998, 1999). 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 Fabrika and Valyavin (1998, 1999), Liebert et al. (2003), Valyavin et al. (2014) 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 различие в результатах 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. 2, является общий для всех представленных обзоров факт отклонения от степенной зависимости, полученной в работах Fabrika and Valyavin (1998, 1999), в сторону уменьшения вероятностей нахождения МБК в слабомангнитной области для величин полей менее 100 кГс. В этой области Fabrika and Valyavin (1998, 1999) не располагали достаточным набором данных и экстраполировали общую степенную зависимость, имея там главным образом лишь ее верхние пределы. На сегодняшний день в этой области достаточно данных, чтобы с уверенностью констатировать отклонение МФФ от степенной зависимости. Это очевидно из гистограммы, приведенной на рис. 3. Гистограмма иллюстрирует МБК не как сильномагнитный «хвост» общего монотонного распре-

деления по магнитным полям, а, скорее, как выделенную популяцию около 10% БК (например, Holberg et al., 2016) с особым эволюционным статусом, отличающимся от остальных 90% белых карликов, у которых вообще не обнаруживаются магнитные поля. Тем не менее, несмотря на кажущуюся очевидность идеи об обособленной популяции, эта идея ошибочна. На наш взгляд, все БК распределены по магнитным полям монотонно, в соответствии со степенным законом на рис. 2, как это было описано Fabrika and Valyavin (1998, 1999). А наблюдаемый «завал» в слабомагнитной области есть не более чем результат наблюдательной селекции, суть которого объяснена ниже, в заключительном разделе.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 +708247 и WD 1312+098. На временах от нескольких десятков — для WD 2359–434 — до сотен лет и более — для GRW +708247, WD 1312+098 — магнитосферы этих звезд остаются стабильными. Данные результаты подтверждают гипотезу о реликтовом происхождении и медленном вырождении магнитных полей БК (Wendell et al., 1987). Это роднит БК с магнитными Ap/Bp-звездами, у которых магнитные свойства также сохраняются на протяжении десятков и более лет (Romanuk, 2010) и которые являются возможным классом-предшественником МБК.

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

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 магнитного поля. Общей чертой, отличающей эти БК от других, является регистрируемое у них, видимо, спорадическое магнитное поле с величинами менее 10 кГс (Valyavin et al., 2006).

По нашему мнению, это отличие связано с тем, что для величин магнитного поля 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.

Эта идея поддерживается и наличием «завала» в слабомагнитной области MFF (рис. 2 и 3). По нашему мнению, этот «завал» однозначно имеет селекционную природу и популяция МБК (рис. 3) 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 α .

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2022-262 (13.MNPMU.21.0003).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. N. Aitov and G. G. Valyavin, *INASAN Science Reports* **8** (2), 51 (2023). DOI:10.51194/INASAN.2023.8.2.002
2. V. N. Aitov, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 301 (2022). DOI:10.1134/S1990341322030026
3. J. R. P. Angel, E. F. Borra, and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **45**, 457 (1981). DOI:10.1086/190720
4. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, and J. B. Oke, *Astrophys. J.* **171**, L11 (1972). DOI:10.1086/180857
5. I. Appenzeller, K. Fricke, W. Fürtig, et al., *The Messenger* **94**, 1 (1998).
6. R. Aznar Cuadrado, S. Jordan, R. Napiwotzki, et al., *Astron. and Astrophys.* **423**, 1081 (2004). DOI:10.1051/0004-6361/20040355
7. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Astron. and Astrophys.* **618**, id. A113 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833235
8. S. Bagnulo and J. D. Landstreet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (4), 5902 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2046
9. A. V. Berdyugin, V. Pirola, S. Bagnulo, et al., *Astron. and Astrophys.* **657**, id. A105 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202142173
10. V. D. Bychkov, S. N. Fabrika, D. N. Monin, and G. G. Valyavin, in *Proc. Int. Meet. on Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1999*, Ed. by Y. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (Nizhnij Arkhyz, 2000), pp. 258–260 (2000).
11. V. D. Bychkov, S. N. Fabrika, and V. G. Shtol, *Sov. Astron. Letters* **17**, 19 (1991).
12. J. F. Donati, *ASP Conf. Ser.*, **307** 41 (2003).
13. E. V. Emelyanov and T. A. Fatkhullin, in *Proc. 9th All-Russian Sci. Conf. on Systemnyj sintez i prikladnaya sinergetika, Rostov-On-Don, Russia, 2019* (SFEDU Press, Rostov-On-Don, 2019), pp. 216–221.
14. S. Fabrika and G. Valyavin, *ASP Conf. Ser.*, **169**, 225 (1999).
15. S. N. Fabrika, V. G. Shtol, G. G. Valyavin, and V. D. Bychkov, *Astronomy Letters* **23** (1), 43 (1997).
16. S. N. Fabrika and G. G. Valyavin, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 84 (1998).
17. S. N. Fabrika, G. G. Valyavin, and T. E. Burlakova, *Astronomy Letters* **29**, 737 (2003). DOI:10.1134/1.1624460
18. S. Friedrich and S. Jordan, *Astron. and Astrophys.* **367**, 577 (2001). DOI:10.1051/0004-6361/20000461
19. O. N. Gusev, M. V. Lobachev, and N. G. Zandin, *Optiko-Mekhanicheskaja Promyshlennost'* **12**, 63 (1976).
20. J. B. Holberg, T. D. Oswalt, E. M. Sion, and G. P. McCook, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462** (3), 2295 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw1357
21. A. Kawka and S. Vennes, *Proc. IAU Symp.* No. 224, Ed. by J. Zverko, J. Ziznovsky, S. J. Adelman, and W. W. Weiss (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2004), pp. 879–885 (2004). DOI:10.1017/S1743921305009920
22. J. C. Kemp, J. B. Swedlund, J. D. Landstreet, and J. R. P. Angel, *Astrophys. J.* **161**, L77 (1970). DOI:10.1086/180574
23. S. O. Kepler, I. Pelisoli, S. Jordan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429** (4), 2934 (2013). DOI:10.1093/mnras/sts522
24. D. Koester, S. Dreizler, V. Weidemann, and N. F. Allard, *Astron. and Astrophys.* **338**, 612 (1998).
25. V. V. Komarov, A. S. Moskvitin, V. D. Bychkov, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (4), 486 (2020). DOI:10.1134/S1990341320040112
26. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and E. Paunzen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372** (4), 1804 (2006). DOI:10.1111/j.1365-2966.2006.10994.x
27. J. D. Landstreet and J. R. P. Angel, *Astrophys. J.* **196**, 819 (1975). DOI:10.1086/153472
28. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, A. Martin, and G. Valyavin, *Astron. and Astrophys.* **591**, id. A80 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201628488
29. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, and G. Valyavin, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48** (1), 284 (2018).
30. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. Valyavin, and A. F. Valeev, *Astron. and Astrophys.* **607**, id. A92 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201731432
31. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. G. Valyavin, et al., *Astron. and Astrophys.* **545**, id. A30 (2012). DOI:10.1051/0004-6361/201219829
32. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. G. Valyavin, et al., *Astron. and Astrophys.* **580**, A120 (2015).
33. J. Liebert, P. Bergeron, and J. B. Holberg, *Astron. J.* **125** (1), 348 (2003). DOI:10.1086/345573
34. J. Liebert and E. M. Sion, *Astrophys. Letters* **20**, 53 (1979). DOI:10.1086/345573
35. P. F. L. Maxted, L. Ferrario, T. R. Marsh, and D. T. Wickramasinghe, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **315** (3), L41 (2000). DOI:10.1046/j.1365-8711.2000.03636.x
36. I. D. Naidenov, G. G. Valyavin, S. N. Fabrika, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 124 (2002).
37. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014). DOI:10.1134/S1990341314030109
38. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **65** (4), 347 (2010). DOI:10.1134/S1990341310040048
39. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (1), 39 (2021). DOI:10.1134/S1990341321010090
40. G. D. Schmidt and A. D. Grauer, *Astrophys. J.* **488** (2), 827 (1997). DOI:10.1086/304746
41. G. D. Schmidt and J. E. Norsworthy, *Astrophys. J.* **366**, 270 (1991). DOI:10.1086/169559

42. G. D. Schmidt and P. S. Smith, *Astrophys. J.* **423**, L63 (1994). DOI:10.1086/187236
43. G. D. Schmidt and P. S. Smith, *Astrophys. J.* **448**, 305 (1995). DOI:10.1086/175962
44. V. G. Shtol, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **18**, 139 (1984).
45. V. G. Shtol, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **33**, 176 (1991).
46. V. G. Shtol, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **35**, 114 (1993).
47. V. G. Shtol, V. D. Bychkov, N. A. Vikuljev, et al., *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **19**, 66 (1985).
48. V. G. Shtol, G. G. Valyavin, S. N. Fabrika, et al., *Astronomy Letters* **23** (1), 48 (1997).
49. C. A. Tout, D. T. Wickramasinghe, J. Liebert, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **387** (2), 897 (2008). DOI:10.1111/j.1365-2966.2008.13291.x
50. G. Valyavin, K. Antonyuk, S. Plachinda, et al., *Astrophys. J.* **734** (1), article id. 17 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/734/1/17
51. G. Valyavin, S. Bagnulo, S. Fabrika, et al., *Odessa Astronomical Publications* **18**, 135 (2005a).
52. G. Valyavin, S. Bagnulo, S. Fabrika, et al., *Astrophys. J.* **648** (1), 559 (2006). DOI:10.1086/505781
53. G. Valyavin, S. Bagnulo, D. Monin, et al., *Astron. and Astrophys.* **439** (3), 1099 (2005b). DOI:10.1086/505781
54. G. Valyavin and S. Fabrika, *ASP Conf. Series*, **169**, 206 (1999).
55. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, et al., *Nature* **515** (7525), 88 (2014). DOI:10.1038/nature13836
56. G. Valyavin, G. A. Wade, S. Bagnulo, et al., *Astrophys. J.* **683** (1), 466 (2008). DOI:10.1086/589234
57. G. G. Valyavin, T. E. Burlakova, S. N. Fabrika, and D. N. Monin, *Astronomy Reports* **47** (7), 587 (2003). DOI:10.1134/1.1592838
58. G. G. Valyavin and S. N. Fabrika, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 69 (1998).
59. A. S. Vasilev, A. M. Evzerov, M. V. Lobachev, and I. V. Peisakhson, *Optiko-Mekhanicheskaiia Promyshlennost'* **44**, 31 (1977).
60. C. E. Wendell, H. M. van Horn, and D. Sargent, *Astrophys. J.* **313**, 284 (1987). DOI:10.1086/164968
61. S. C. West, *Astrophys. J.* **345**, 511 (1989). DOI:10.1086/167926
62. D. T. Wickramasinghe and L. Ferrario, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **356** (4), 1576 (2005). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.08603.x

Occurrence Frequencies of White Dwarfs with Regular Magnetic Fields

V. N. Aitov¹, E. P. Korchagina¹, G. G. Valyavin¹, and S. N. Fabrika¹

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

The paper presents and analyzes a summary of magnetometric studies of single white dwarfs (WD) conducted at SAO RAS jointly with a number of other observatories. The goals of the studies are to search for regular large-scale magnetic fields in these stars and to construct a probability distribution of WD occurrence depending on the strength of these fields. Based on the analysis, the WDs were determined whose magnetospheres do not change their configurations for a long time, from several tens to hundreds of years at least, and possibly more. These stars can be used as standards of circular polarization. Using data from modern surveys and SAO RAS observations, versions of the observed probability distributions of WDs by their surface magnetic fields in the range of 10^3 – 10^9 G were constructed. The distribution of WDs with fields from 10^6 G to 10^9 G is well described by a power-law dependence. In the region of smaller fields the dependence is violated, demonstrating a selection “dip”. The selection is caused by the technical complexity of magnetometric studies of WDs. The paper also discusses the physical nature of the selection associated with the complication of the interaction of global magnetic fields of low intensity (less than 10 kG) with dynamic processes in the surface layers of WDs. In particular, convection is capable of destroying the global symmetry of the surface magnetic field with an intensity of several kilogauss. Based on the analysis of the obtained distributions, it is concluded that all WDs with surface fields above several tens of kilogauss are carriers of regular global fields damped on times of 10^{10} years. Magnetic fields with intensities of several kilogauss and lower lose their global structure, fragmenting into spots, which complicates and even makes impossible their detection by standard spectropolarimetric methods. Confirming examples and recommendations for improving the methodology of magnetometric observations of degenerate stars with weak magnetic fields are given.

Keywords: *white dwarfs—magnetic fields*