

УДК 524.31.084-337:520.82

ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ У МАГНИТНЫХ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ WD 2047+372 И WD 0009+501

© 2019 К. А. Антониук^{1*}, Г. Г. Валявин^{2,1}, А. Ф. Валеев²,
С. В. Карпов², Н. В. Пить¹, В. Н. Аитов³, Т. А. Фатхуллин²,
Г. А. Галазутдинов^{4,5,2}, А. С. Танашкин⁶, О. И. Антониук¹, Н. Р. Ихсанов^{5,6,2}

¹Крымская астрофизическая обсерватория, Научный, Крым, 298409 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Астрономический институт им. В. В. Соболева, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

⁴Католический университет Севера, Антофагаста, 0610 Чили

⁵Пулковская обсерватория, Санкт-Петербург, 196140 Россия

⁶Астрономический институт им. В. В. Соболева, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

Поступила в редакцию 24 июля 2018 года; после доработки 15 октября 2019 года; принята к публикации 15 октября 2019 года

Представлены результаты длительных фотометрических наблюдений магнитных белых карликов WD 2047+372 и WD 0009+501, которые проводятся для поиска и изучения регулярной переменности блеска этих звезд. По данным в полосе V фильтра Джонсона у конвективно спокойного белого карлика WD 2047+372 обнаружены признаки нерегулярной переменности на временах от часов до 1–3 дней с характерными амплитудами около 0^m005 . Эта переменность может быть обусловлена как нерегулярными собственными пульсациями звезды или даже наличием дебрис-диска, так и причинами неуставленной инструментальной природы. Регулярных изменений блеска WD 2047+372 на уровне, превышающем 0^m005 , не найдено. В отличие от WD 2047+372, у конвективно активного магнитного белого карлика WD 0009+501 наблюдается стабильная на шкале порядка десяти и более лет фотометрическая переменность, связанная с собственным вращением объекта и коррелирующая с переменностью его магнитных свойств. Амплитуда переменности — порядка 0^m01 . На основании сравнения результатов наших наблюдений этих двух объектов сделан вывод о фотометрической переменности у магнитных белых карликов, находящихся в конвективной температурной зоне. Отмечается стабильность переменности на длительных промежутках времени (годы, десятки и более лет).

Ключевые слова: *белые карлики*

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе мы представляем результаты очередного этапа программы фотометрических наблюдений одиночных магнитных белых карликов [1–6]. Целями исследования являются поиск и изучение связи между магнитными и фотометрическими свойствами белых карликов [5, 6], построение селекционно-независимой диаграммы «период вращения—магнитное поле» и поиск гипотетических планет-индукторов, способных оказывать влияние на наблюдательные характеристики белых карликов с сильными магнитными полями. В частности, согласно [7], железная планета достаточно большого размера, близко расположенная

к поверхности белого карлика, может, подобно униполярному индуктору, генерировать в его атмосфере систему замкнутых электрических токов. Вследствие омических потерь энергия этих токов может эффективно конвертироваться в тепло, что приводит к изменению свойств атмосферы белого карлика и, соответственно, фотометрической переменности с периодом обращения планеты [7, 8]. Поиск аномалий в периодах вращения белых карликов также является одной из целей исследования в контексте поиска вращающихся вокруг них планет. Здесь мы приводим новые результаты фотометрических наблюдений магнитных белых карликов WD 2047+372 и WD 0009+501.

*E-mail: antoniuk@craocrimea.ru

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Фотометрические наблюдения белых карликов проводятся на регулярной основе с 2012 г. по настоящее время главным образом на 1-м телескопе САО РАН, 1.25-м телескопе КраО и группе малых телескопов, установленных на Северокавказской астрономической станции Казанского (Приволжского) федерального университета (КФУ). В основном используются широкополосные фильтры системы Джонсона. Методика наблюдений и редукции данных стандартные, подробно они описаны в работе [4].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом разделе дается сводка результатов, полученных при мониторинге двух звезд программы.

3.1. WD 2047+372

Объект WD 2047+372 является белым карликом с крупномасштабным магнитным полем относительно невысокой, около 60 кГс, напряженности для этого класса звезд [9]. Величины продольного поля и модуля полного вектора поля (поверхностное поле) звезды регулярно меняются с периодом $P = 0^{\text{d}}243168 \pm 0.000024$, соответствующим периоду ее вращения [10]. Мотивацией проведения фотометрических наблюдений этой звезды послужило то, что для нее с хорошей точностью известны как период вращения, так и детали распределения магнитного поля по поверхности [10]. Более того, температура поверхности звезды, составляющая $T_{\text{eff}} = 14\,712 \pm 286$ К [10], превышает критическую температуру (около 13 000 К [11]), при которой под фотосферой белого карлика ожидается развитие конвективной зоны. Согласно [6], наличие магнитоиндуцированной фотометрической переменности в случае магнитных белых карликов с такими параметрами маловероятно. Таким образом, фотометрические наблюдения конвективно-спокойного белого карлика WD 2047+372 рассматриваются нами в качестве контрольного теста справедливости гипотезы, высказанной в работе [6].

Наблюдения WD 2047+372 проводились на 1.25-м телескопе АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории летом 2017-го года в течение 11 ночей в трех последовательных сетах. Использовались камера ProLine PL23042 и широкополосный фильтр V системы Джонсона. Обработка и калибровка наблюдательных данных осуществлялись стандартным образом в программе MaxIm DL, необходимые вспомогательные кадры «плоских полей» и темнового тока делались каждую ночь. Дифференциальная

фотометрия объекта проводилась относительно двух звезд сравнения. Выбранные звезды сравнения не являются фотометрическими стандартами, поэтому величина нуль-пункта носит оценочный характер, однако неопределенность в нуль-пункте на результат анализа временных рядов в нашем случае не влияет.

Результаты обработки временных рядов в трех сетах наблюдений представлены на рис. 1. Статистический анализ данных показал наличие спорадической переменности как внутри отдельных ночей (на рис. 1 некоторые из них видны невооруженным глазом), так и от ночи к ночи, на временах 1–3 дня. Между тем, периодограммный анализ всех полученных данных не выявил значимой регулярной переменности блеска WD 2047+372. При фазовой свертке данных с известным периодом вращения звезды $P = 0^{\text{d}}243168 \pm 0.000024$ (см. рис. 2) признаков какой-либо зависимости на уровне амплитуды, превышающем $0^{\text{m}}005$, также не найдено.

Нерегулярная переменность источника с амплитудой до $0^{\text{m}}01$ рассматривается в разделе «Обсуждение результатов» Однако сделать заключение о природе этой переменности на базе имеющихся в настоящее время данных затруднительно, требуется проведение дополнительных наблюдений.

3.2. WD 0009+501

WD 0009+501 (LHS 1038, $V = 14^{\text{m}}4$) — магнитный белый карлик — был выбран нами в качестве объекта исследований вследствие его регулярной фотометрической переменности, которая, по-видимому, отражает свойства магнитного поля этого объекта (см. работу [4] и ссылки в ней). Мы продолжили наблюдения этого объекта для того, чтобы получить дополнительные данные для преодоления возникших ранее неопределенностей в выводах относительно характера переменности его блеска, т.е. регулярности, формы и т.д.

Новые фотометрические наблюдения этого объекта проводились по стандартной методике в течение трех последовательных ночей в летне-осенний период 2017 г. на 1-м телескопе САО РАН. Все наблюдения были выполнены в широкополосном фильтре V системы Джонсона. Для обработки фотометрических данных использовались программы на языке Python и стандартный пакет редукции астрофизических данных IRAF¹.

¹IRAF распространяется Национальной обсерваторией оптической астрономии под управлением Ассоциации университетов для исследований в области астрономии в кооперации с Национальным научным фондом (США).

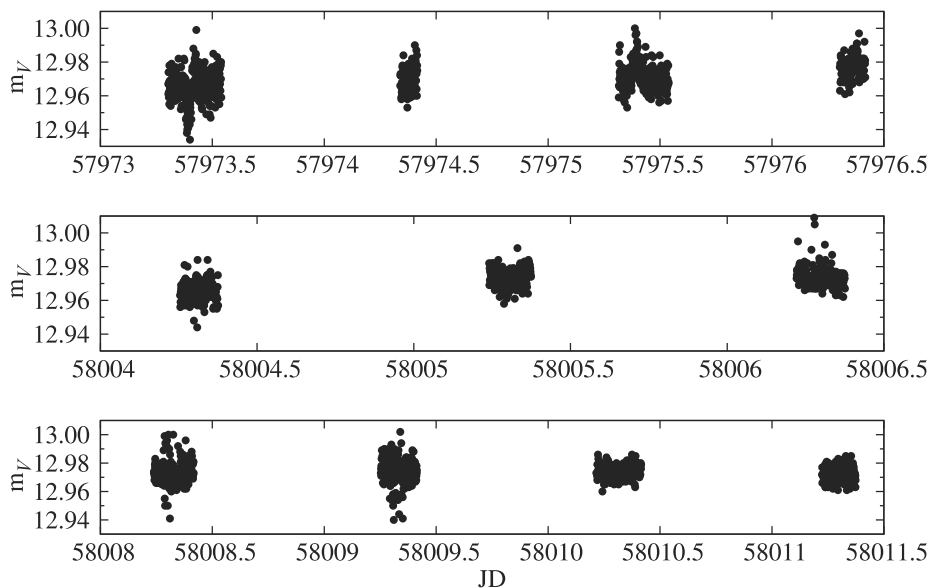


Рис. 1. Временные ряды наблюдений WD 2047+372 в полосе фильтра V . Юлианская дата (горизонтальная ось) приведена в формате $JD(-2400000)$.

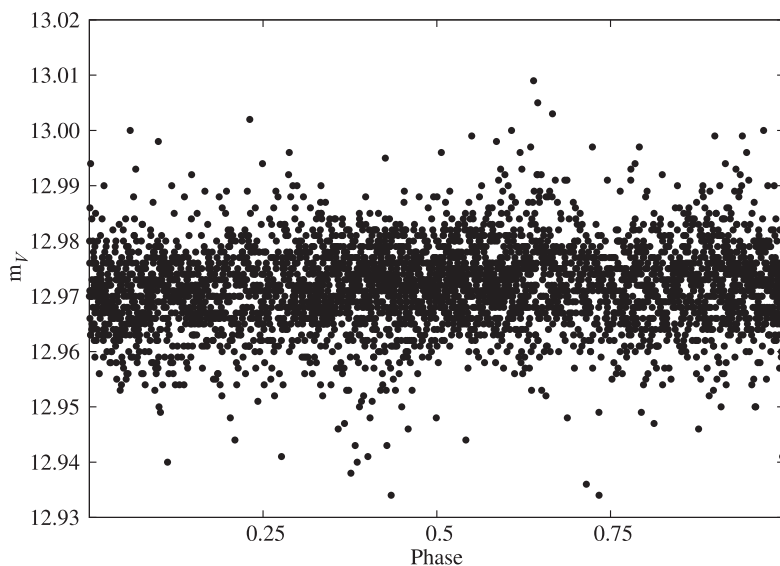


Рис. 2. Кривая блеска WD 2047+372 в полосе фильтра V после приведения временных рядов наблюдений звезды к периоду ее вращения $P = 0^d.243168 \pm 0.000024$.

Полученные в ходе этих наблюдений ряды анализировались совместно со старыми данными, опубликованными в работе [4]. На рис. 3 представлены все ряды наблюдений WD 0009+501 в фильтре V , проведенных на 1-м телескопе САО РАН. Переменность блеска с амплитудой около $0^m.01$ обнаруживается даже при визуальном просмотре представленных данных. Наблюдаемые вариации потока обусловлены как регулярной, так и, возможно, нерегулярной составляющими. В этой работе мы ограничиваемся анализом только

первой. Регулярная переменность ожидалась нами вследствие магнитной природы исследуемого объекта [12], его относительно невысокой температуры $T_{\text{eff}} = 6540 \text{ K}$ [13] и очень вероятных в таком случае низкоамплитудных изменений блеска, индуцированных собственным вращением звезды [5, 6]. Его период, согласно [14], составляет около 8^h .

На рис. 4 представлена периодограмма Ломба, построенная с целью поиска периода переменности по совокупности всех выполненных нами наблюдений объекта WD 0009+501. Сильная неоднород-

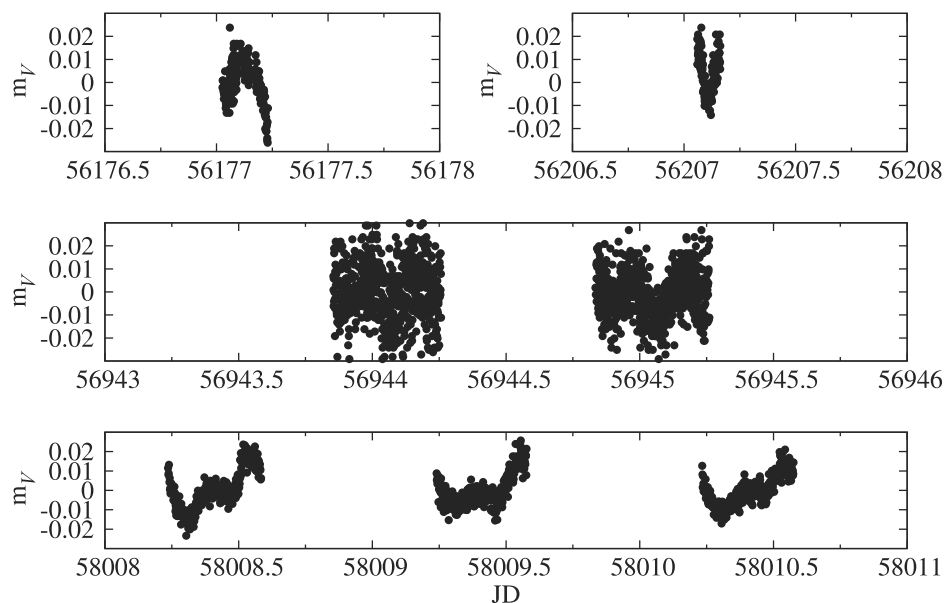


Рис. 3. Временные ряды наблюдений WD 0009+501 в полосе фильтра V. Юлианская дата (горизонтальная ось) приведена в формате JD(-2400000).

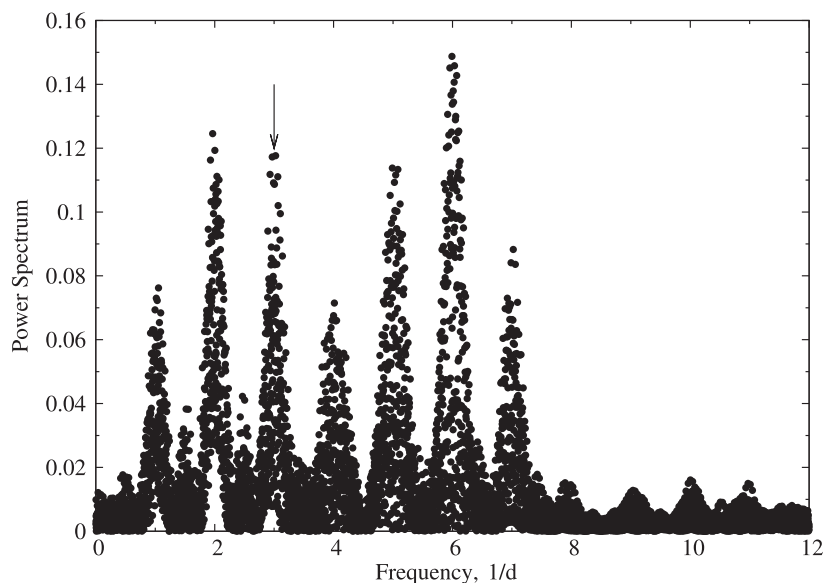


Рис. 4. Периодограмма Ломба для временных рядов наблюдений WD 0009+501.

ность рядов и ожидаемая сложная, двухмодовая фотометрическая переменность (см. [4]) проявляются в наборе значимых пиков, отфильтровать которые (например, процедурой Clean) нелегко. Однако, зная период вращения этой звезды из магнитометрических наблюдений [14]:

$JD = 2453003.34 \pm 0.005 + 0^d334 \pm 0.008 E$,
можно идентифицировать его на периодограмме (вертикальная стрелка) и заключить, что регулярная фотометрическая переменность, индуцированная вращением WD 0009+501, проявляется, как

минимум, на шкале наших наблюдений, охватывающих около 5 лет.

К сожалению, из-за значительной (около 10 лет) разнесенности во времени ближайших спектрополяриметрических наблюдений данного объекта и сильной неравномерности фотометрических рядов однозначно восстановить картину корреляции между переменностью магнитного поля и фотометрической переменностью звезды оказывается затруднительным. В частности, на рис. 5 и 6 показаны два примера такой воз-

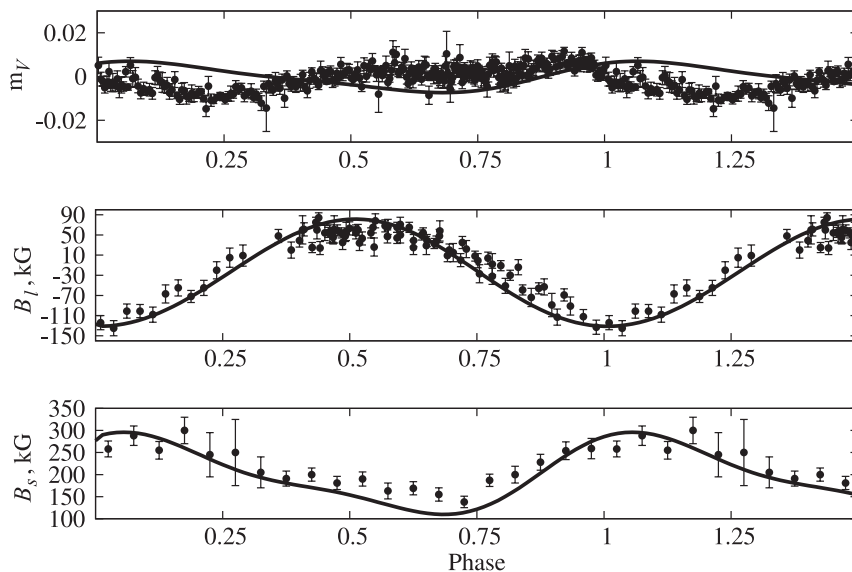


Рис. 5. Изменения потока WD 0009+501 в полосе фильтра V (а), наблюдаемого продольного поля B_l звезды (б) и ее поверхностного поля B_s (в) в зависимости от фазы после приведения данных к периоду вращения звезды $P = 0^d.3328$. Заполненные кружки с барами ошибок соответствуют наблюдениям, сплошными линиями представлены результаты моделирования наблюдательных данных.

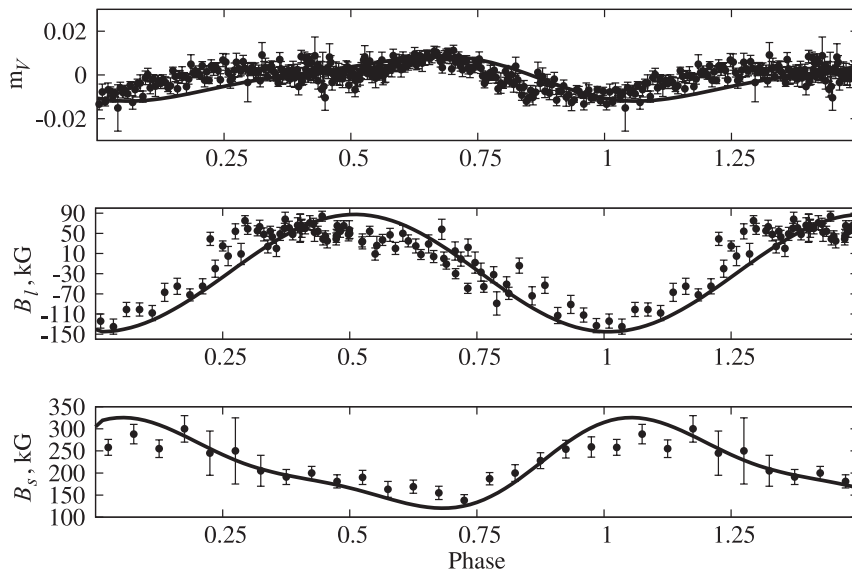


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, при величине периода $P = 0^d.3369$.

возможной корреляции внутри ошибок определения периода вращения WD 0009+501. Верхние панели рисунков иллюстрируют фотометрические ряды наблюдений звезды, свернутые с двумя вероятными периодами вращения $P = 0^d.332(8)$ (рис. 5) и $P = 0^d.336(9)$ (рис. 6). Средние и нижние панели рисунков иллюстрируют магнитометрические наблюдения продольного (средняя панель) и поверхностного (нижняя панель) полей WD 0009+501 и результаты их моделирования

(объяснения см. ниже). Как можно видеть, в обоих случаях в поведении сфазированных с периодом вращения фотометрической и магнитометрической кривых наблюдается скоррелированное поведение: в одном случае (рис. 5) моменты минимумов яркости вырожденной звезды совпадают с моментами максимумов поверхностного поля, в другом случае (рис. 6) моменты максимумов видимого поверхностного поля, наоборот, соответствуют фазам наибольшей яркости. В этом исследовании

однозначно выделить какой-либо один из этих двух вариантов не представляется возможным, но очевидно, что в обоих случаях мы с высокой степенью вероятности имеем дело с магнитоиндуцированной природой фотометрической переменности WD 0009+501. Ниже мы обсуждаем вероятную природу этого явления.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы представили новые результаты фотометрического исследования двух магнитных белых карликов WD 2047+372 и WD 0009+501. По данным наблюдений конвективно спокойного белого карлика WD 2047+372 в полосе V фильтра Джонсона регулярная переменность этого объекта не обнаружена на уровне амплитуды более $0^m.005$. В отличие от WD 2047+372, у конвективно активного магнитного белого карлика WD 0009+501 наблюдается стабильная на шкале порядка десяти и более лет фотометрическая переменность, обусловленная собственным вращением объекта и коррелирующая с переменностью его магнитных свойств. Амплитуда переменности — порядка $0^m.01$.

Вследствие того, что перенос излучения в атмосферах звезд этого класса при эффективных температурах значительно выше 10 000 К является исключительно радиативным, происходящим без участия конвекции, нами ожидалось отсутствие переменности с периодом вращения у WD 2047+372. В таких условиях магнитное поле величиной, характерной для данного объекта, в первом приближении не влияет на эффективность переноса излучения в атмосфере звезды и не создает на ее поверхности температурных неоднородностей, которые могут привести к существенным вариациям блеска.

Магнитный белый карлик WD 0009+501, напротив, имеет низкую эффективную температуру ($T_{\text{эфф}} = 6540$ К [13]). В этих условиях конвективный перенос энергии во внешних слоях атмосферы звезды является доминирующим. В свою очередь, магнитное поле на поверхности белого карлика величиной более нескольких десятков килогаусс способно канализировать и частично подавлять [6] конвекцию, что неизбежно ведет к возникновению температурных неоднородностей, способных вызвать заметную фотометрическую переменность.

В работе [6] предложена эмпирическая связь между температурой T_{loc} и модулем $|B|_{\text{loc}}$ магнитного поля локальной области поверхности белого карлика $T_{\text{loc}} = A |B|_{\text{loc}}^\gamma$. Зная из работы [14] детали геометрии магнитосферы WD 0009+501 и подбирая свободно варьируемые константы A и

γ , можно смоделировать распределение поверхностной температуры и, как результат, фотометрическую переменность блеска звезды в зависимости от ее вращения. Варианты такого моделирования для двух возможных периодов вращения WD 0009+501 представлены на рис. 5 и 6 (сплошная линия на верхних панелях рисунков). Как можно видеть, конфигурация, в которой максимумы блеска звезды соответствуют максимумам модуля полного вектора поля, является предпочтительной, хотя и неокончательной. Дело в том, что параметры геометрии магнитосферы WD 0009+501, взятые нами для моделирования, были получены в работе [14] в предположении о неизменной температуре WD 0009+501 во всех точках его поверхности. Интегрируя наблюдаемые величины продольного и поверхностного поля, для этой работы мы использовали модель неоднородного распределения температуры по поверхности звезды, что неизбежно привело к небольшому, но вполне заметным отклонениям наблюдаемых магнитометрических величин поля от модельных (см. средние и нижние панели на рис. 5 и 6). В свою очередь, это говорит о том, что в предположении существования горизонтальных температурных неоднородностей параметры магнитосферы должны быть скорректированы.

Уточнить модель магнитосферы WD 0009+501 мы планируем в дальнейшем. В данной работе можно лишь оценить характерные величины изменений температуры при рассмотрении горизонтальных температурных неоднородностей поверхности звезды. Вне зависимости от типов модели, которую мы применяли, но в пределах геометрических размеров температурных пятен, сравнимых с размерами полярных и экваториальных областей магнитосферы WD 0009+501, изменения температуры в разных областях не превышают 0.5 % от средней эффективной температуры звезды $T_{\text{эфф}} = 6540$ К.

В заключение остановимся еще раз на обнаруженной нами нерегулярной фотометрической переменности WD 2047+372. С одной стороны, это может быть аппаратным эффектом. Имея большой опыт наблюдений по программе исследования магнетизма белых карликов, мы обратили внимание на то, что у некоторых из наших программных объектов зачастую наблюдаются признаки стохастической переменности, которые несколько превышают характерные точности, встречающиеся в нашей практике (вплоть до $0^m.001$ и даже выше [4]). С другой стороны, согласно недавним исследованиям (см., например, [15] и ссылки там), значительная часть белых карликов может быть окружена остатками скалистых планет и дебрис-дисками. Такие объекты в окружении белых карликов могут, при определенных обстоятельствах, индуцировать нерегулярную составляющую в их фо-

тометрической переменности на уровне амплитуд, с которыми мы столкнулись в данной работе. Однако для окончательного вывода о природе найденной нерегулярной переменности фотометрическое исследование WD 2047+372 следует дополнить новыми наблюдениями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдения выполнены при поддержке фонда РФФИ (грант 15-02-05183). Анализ данных выполнен при поддержке Российского научного фонда (проект №14-50-00043, направление «Экзопланеты»). Моделирование магнитосферы WD 0009+501 выполнено при поддержке фонда РФФИ (грант 18-29-21030). Интерпретация результатов проводилась при частичной поддержке Программой Президиума РАН N28 «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей». ГГВ и ГАГ благодарят Чилийский фонд CONICYT REDERS 180136 за финансовую поддержку международной кооперации в исследовании.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, et al., in *Stars: From Collapse to Collapse*, Edited by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (2017), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 510, p. 504.
2. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 44 (2017).
3. K. A. Antonyuk, S. V. Kolesnikov, N. V. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 475 (2016).
4. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 318 (2015).
5. G. Valyavin, K. Antonyuk, S. Plachinda, et al., *Astrophys. J.* **734**, 17 (2011).
6. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, et al., *Nature* **515**, 88 (2014).
7. D. T. Wickramasinghe, J. Farihi, C. A. Tout, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **404**, 1984 (2010).
8. C. S. Brinkworth, M. R. Burleigh, G. A. Wynn, and T. R. Marsh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **348**, L33 (2004).
9. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, A. Martin, and G. Valyavin, *Astron. and Astrophys.* **591**, A80 (2016).
10. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, G. Valyavin, and A. F. Valeev, *Astron. and Astrophys.* **607**, A92 (2017).
11. S. O. Kepler, I. Pelisoli, S. Jordan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 2934 (2013).
12. G. D. Schmidt and P. S. Smith, *Astrophys. J.* **448**, 305 (1995).
13. P. Bergeron, S. K. Leggett, and M. T. Ruiz, *Astrophys. J. Suppl.* **133**, 413 (2001).
14. G. Valyavin, S. Bagnulo, D. Monin, et al., *Astron. and Astrophys.* **439**, 1099 (2005).
15. N. Hallakoun, D. Maoz, E. Agol, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476**, 933 (2018).

Search for and Study of Photometric Variability of Magnetic White Dwarfs WD 2047+372 and WD 0009+501

K. A. Antonyuk, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, S. V. Karpov, N. V. Pit, V. N. Aitov, T. A. Fatkhullin, G. A. Galazutdinov, A. S. Tanashkin, O. I. Antonyuk, and N. R. Ikhsanov

We report the results of long-term photometric observations of the magnetic white dwarfs WD 2047+372 and WD 0009+501, aimed to search for and study regular brightness variability in these stars. The data in the V band of the Johnson filter revealed signs of irregular variability in the convectively inactive white dwarf WD 2047+372 at times from hours to 1–3 days with characteristic amplitudes of about 0^m005 . This variability can be due to both irregular proper pulsations of the star or even the debris disk and reasons of unidentified instrumental nature. We have not found the brightness variability of WD 2047+372 at the level of greater than 0^m005 . As distinct from WD 2047+372, the convectively active magnetic white dwarf WD 0009+501 shows stable photometric variability associated with the proper rotation of the object and correlating with the variability of its magnetic properties. The variability amplitude is about 0^m01 . Based on comparison of the observations of these two targets, we concluded on the photometric variability of magnetic dwarfs located in the thermal convection zone. We noticed the stable variability on long-term timescales (years, decades, and over).

Keywords: *white dwarfs*