

УДК 524.3-337; 524.35

О СТРУКТУРЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ 53 САМ

© 2022 И. И. Романюк^{1*}, А. В. Моисеева¹, Д. О. Кудрявцев¹,
И. А. Якунин^{1,2}, В. Н. Аитов¹, Д. Н. Бакланова³

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

³Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

Поступила в редакцию 8 ноября 2021 года; после доработки 14 декабря 2021 года; принята к публикации 14 декабря 2021 года

На основании наших предыдущих и новых наблюдений магнитного поля химически пекулярной звезды 53 Сам на 6-м телескопе и при использовании литературных источников мы делаем вывод о том, что структура ее поля отличается от простой дипольной, в то время как результаты измерений, выполненные по линиям водорода, описываются простой дипольной моделью. Однако данные, полученные по линиям металлов (в том числе методами магнитного картирования), указывают на более сложную структуру поля. Мы провели новые наблюдения магнитного поля по линиям водорода бальмеровской серии в ближнем UV-диапазоне. Найденные особенности могут свидетельствовать о том, что величина поля возрастает с глубиной в атмосфере 53 Сам.

Ключевые слова: звезды: магнитное поле — звезды: химически пекулярные — звезды: индивидуальные: 53 Сам

1. ВВЕДЕНИЕ

53 Сам (HD 65339) — одна из самых изученных близких ($\pi = 11.2$ mas, Gaia Collab. (2018)) ярких ($V = 6^m 0$, Нюг et al. (2000)) химически пекулярных звезд, обладающая очень сильным магнитным полем (продольный компонент B_e превышает 4 кГс), обнаружена Вавсоком (1958a; b). В своих работах автор отмечает, что наблюдается переменность продольного магнитного поля с периодом около 8 суток, а измеряемая его величина соответствует магнитному полю на полюсах звезды $B_p = +12200$ Гс и $B_p = -14350$ Гс. В максимуме B_e в ядрах водородных линий виден эффект Пашена–Бака. Большинство линий в спектре шире в фазе отрицательной полярности. Профили спектральных линий показывают слабую асимметрию, что может быть результатом переналожения π - и σ -компонент расщепления вследствие эффекта Зеемана. Кроме того, было найдено, что кривая B_e ангармонична: большую часть периода звезда показывает положительное поле, а отрицательный экстремум существенно более узкий. Jarzembowski (1960) первым нашел слабые периодические вариации блеска звезды в фильтре с эффективной

длиной волны около 4200 Å. Они были интерпретированы как неоднородности температуры поверхности вращающейся звезды. Preston and Stepien (1968) провели новые измерения магнитного поля звезды и ее блеска и обнаружили, что связь между изменениями блеска и поля сложна и зависит от длины волны. В цветах B и V максимум блеска совпадает с отрицательным экстремумом продольного поля B_e , а в цвете U экстремумы блеска и положительного поля совпадают. Preston (1969) нашел в спектре 53 Сам частично разрешаемые зеемановские компоненты в фазе $\phi = 0.12$ перед положительным кроссовером, то есть в обычно принимаемой фазе $\phi = 0.88$ продольного поля отрицательной полярности. Они указывают на наличие поверхностного поля $B_s = 15$ кГс. Найдена также зависимость величины измеренного поля от интенсивности линий: зеемановские сдвиги для сильных линий оказались почти в два раза меньше, чем для слабых. Так как слабые линии образуются в более глубоких слоях атмосферы, чем сильные, Preston (1969) предположил, что поле может усиливаться с глубиной атмосферы звезды. Многие труды автора стали классическими, он сыграл большую роль в развитии исследований звездного магнетизма. И если Бэбкок является первооткрывателем магнитного поля химически пекулярных звезд, то заслуга Престона в том, что он объяснил

*E-mail: roman@sao.ru

переменность магнитного поля, спектра и блеска как следствие вращения химически неоднородной магнитной звезды.

В перечисленных выше работах были получены первые доказательства заметных отличий структуры магнитного поля звезды от дипольной. Эти исследования выполнялись в эпоху, когда в качестве светоприемников использовались фотографические пластинки. Типичное отношение S/N было около 20, поэтому тонкий анализ профилей спектральных линий проводить было невозможно. Однако все, кто работал со спектрами 53 Cam, отмечали, что в фазе отрицательной полярности продольного поля B_e линии гораздо шире. Интерпретировалось это как указание на то, что отрицательный магнитный полюс звезды существенно сильнее положительного, и наблюдается более сильное магнитное уширение линий, а это означает, что диполь несимметричный.

Впервые модель поля 53 Cam построил Нучра (1972). По расщепленным компонентам фотографических зеемановских спектров объекта, полученным в 1957–1961 гг. и в 1967 г., он измерил величину поверхностного магнитного поля B_s . Оценка напряженности удовлетворяет модели наклонного ротатора со следующими параметрами: степень смещения центра диполя от центра звезды $\alpha = 0.145 R_{\text{star}}$, где R_{star} — радиус звезды, угол между осью диполя и осью вращения звезды $\beta = 80^\circ$, угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 50^\circ$, величина поля на полюсе $B_p = 28.4$ кГс. Магнитное поле на отрицательном полюсе сильнее. Однако данная модель плохо воспроизводит наблюдаемую переменность продольного компонента поля B_e . Найден период изменений B_e :

$$\text{JD} = 2435855^{\text{d}}62 + 8^{\text{d}}0269E.$$

Этот период очень близок к величине, используемой в настоящее время. Таким образом, в модели Нучра (1972) звезда обладает очень сильным полем, близким к дипольному, с существенным смещением диполя в сторону отрицательного полюса. Ось диполя почти перпендикулярна к оси вращения. В то время в литературе проводилась дискуссия о причинах ангармоничности кривых переменности фазовой кривой продольной компоненты поля B_e для звезды. В результате пришли к выводу, что главная причина — это неравномерное распределение элементов по поверхности. Измерения магнитного поля по линиям различных металлов в спектре звезды с пятнами, расположенными в разных местах на поверхности, могли давать отклонения от гармоничности.

В начале 1970-х годов появилась возможность использования фотоэлектрических поляриметров-магнитометров и измерения круговой и линейной поляризации в выделенных областях спек-

тра. Kemp and Wolstencroft (1973) нашли линейную поляризацию в линии $H\beta$ у 53 Cam, которую они интерпретировали как проявление поперечного эффекта Зеемана. Однако Borra (1973) сделал расчеты и показал, что наблюдаемая Kemp and Wolstencroft (1973) линейная поляризация в линии $H\beta$ на два порядка выше, чем расчетная, исходя из поперечного эффекта Зеемана. Возможно, это межзвездная линейная поляризация. Измерения по линиям водорода, который равномерно распределен по поверхности звезды, позволили бы объяснить причины наличия пятен с аномалиями химического состава.

Borra and Landstreet (1977) провели 21 наблюдение магнитного поля 53 Cam на бальмеровском магнитографе в крыльях линии $H\beta$ с фазой периода вращения. Характер изменений продольного компонента поля соответствует фотографической кривой Babcock (1958b), но новая фотоэлектрическая фазовая кривая имеет почти синусоидальную форму (Borra and Landstreet 1977, рис. 1) и отличается от ангармоничных кривых, полученных фотографическим способом по линиям металлов. Результаты измерений можно представить в виде модели нецентрального диполя со следующими параметрами: $i = 65^\circ$, $\beta = 100^\circ$, $B_p = 28000$ Гс, $a = -0.15$. Она близка к фотографической модели Нучра (1972), хотя кривая B_e существенно менее ангармонична. Построенная в работе модель хорошо согласуется с наблюдаемой кривой (Borra and Landstreet 1977, рис. 3).

Borra and Landstreet (1977) детально проанализировали возможные причины ангармоничности кривой, полученной Бэбкоком. В частности, они высказали предположение о том, что ее вид является следствием измерений в основном по ядрам линий из-за нелинейности характеристической кривой фотоэмульсии. Мы не вполне разделяем вывод Borra and Landstreet (1977) о связи ангармоничности кривой B_e с использованием фотографического метода наблюдений. Новейшие наблюдения с ПЗС-матрицами подтверждают результаты Babcock (см. раздел 2).

Faraggiana (1973) установил, что линии Ca II в спектре звезды меняются в противофазе с элементами железного пика и Eu II. Объяснить наблюдаемые вариации лучевой скорости, по мнению автора, можно двойственностью объекта и его высокоэксцентричной орбитой. Scholz (1978) показал, что 53 Cam — действительно двойная звезда с орбитальным периодом $P = 2380^{\text{d}}$. Он предположил взаимодействие компонентов вблизи периастра, когда расстояние от спутника до главной звезды составляет около 1 а.е. В результате

наблюдений, проведенных на 2-м телескопе в Таунсбурге, Scholz and Lehmann (1988) нашли орбитальные элементы спектрально-двойной системы 53 Cam по 136 измерениям лучевой скорости.

Musielok et al. (1980) выполнили десятицветную фотометрию звезды. Наибольшая амплитуда переменности была зафиксирована ими в фильтре U с максимумом в фазе $\phi \sim 0.0$. В других фильтрах переменность значительно меньше либо отсутствует.

Puper and Adelman (1983) с коллегами в начале 1980-х гг. провели большую серию фотоэлектрических спектрофотометрических наблюдений пекулярных звезд в области депрессий на 4200 Å и 5200 Å. Среди них и 53 Cam. Ранее Hardorp (1976) нашел у исследуемого объекта широкую депрессию на 5200 Å, в крыльях которой имеются вторичные минимумы около 5000 Å и 5556 Å. В то же время авторы не обнаружили переменности в депрессии, которая коррелировала бы с переменностью магнитного поля.

Наблюдения на 6-м телескопе с зеemanовским анализатором начались в 1977 г. (Glagolevskii et al. 1977). На начальном этапе работы в качестве детекторов использовались фотопластинки: регистрировались только относительные сдвиги лево- и право-циркулярно-поляризованных компонент спектральных линий. Были проведены магнитные наблюдения нескольких десятков химически пекулярных звезд. В 1980-е годы Романюк выполнил серию работ по поиску радиального градиента магнитного поля нескольких звезд, в том числе и 53 Cam (Romanyuk 1980). Автор подтвердил вывод Preston (1969) о том, что существует зависимость величины измеренного поля от интенсивности линий: слабые линии дают значительно большие сдвиги — примерно в два раза больше, чем самые яркие.

Это может быть указанием на существование большого радиального градиента поля и его усиления в глубину атмосферы. Это увеличение на два порядка превышает величину градиента при дипольном поле. Мы также нашли, что поле, измеренное по ионам, имеет бóльшую величину, чем измеренное по нейтральным атомам, что трудно объяснить неравномерным распределением химических элементов по поверхности. Для того чтобы максимальным образом исключить влияние неравномерного распределения по поверхности, в работе Romanyuk (1987) было предложено выполнять измерения магнитного поля и химического состава по линиям одного и того же мультиплета в области бальмеровского скачка. При этом в мультиплете должны находиться одновременно линии по разные стороны от скачка, так как они образуются с одинакового нижнего уровня. Romanyuk (1987) нашел необходимые для поиска радиального градиента

Таблица 1. Мультиплеты разных химических элементов в области бальмеровского скачка 3550–3800 Å. Длины волн для каждого мультиплета можно найти в таблицах Мооге (1945a; b)

Элемент	Мультиплет
Sc II	2
Ti II	116
Ti I	19, 118
Cr I	47, 48
Cr II	12
Fe I	46, 130, 133, 135, 180, 295, 322, 323, 324, 389, 390, 393, 437, 440, 490, 568, 569
Fe II	111
Co I	4, 21, 64
Sm II	19
Gd II	2

мультиплеты линий разных химических элементов (см. таблицу 1).

Ранее специалисты по спектроскопии звезд при построении кривых роста широко пользовались таблицами Мооге (1945a; b). В настоящее время при расчетах моделей атмосфер учитывается тот факт, что линии одного и того же мультиплета с большей интенсивностью, полученной в лаборатории, должны быть более интенсивным и в звездном спектре. Особый интерес вызывают линии второго мультиплета Gd II. Они занимают область спектра 3422–3855 Å, причем относительная интенсивность линий в области короче бальмеровского скачка, больше. Изучая линии в таких мультиплетах, мы можем видеть, оказывает ли бальмеровский скачок влияние на относительную интенсивность наблюдаемых линий в спектрах.

Но развить эти исследования нам не удалось. К середине 1980-х гг. эпоха фотографических измерений завершилась. Были получены очень важные данные о звездном магнетизме, однако относительно низкая точность полученного материала не позволяла выполнять тонкие работы по анализу спектральных линий. Тем не менее, опережая время, Khokhlova (1976) начала развивать методы доплер-зеemanовского картирования по анализу деталей профилей спектральных линий. Но качество даже самых лучших фотографических спектров было недостаточно высоким для того, чтобы в деталях сравнивать наблюдаемые профили линий

с вычисленными, что не позволяло выполнять надежное моделирование.

Это стало возможным после внедрения цифровых многоканальных детекторов. Кроме прогресса в наблюдениях значительно выросли возможности для различных вычислений. Поэтому далее мы приводим результаты наблюдений 53 Cam, проведенные на современных цифровых приемниках, и результаты новых теоретических расчетов.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЗС-ДЕТЕКТОРОВ

Впервые цифровой материал хорошей точности для 53 Cam был получен Landstreet (1988) с использованием одномерной линейки Ретикон. Были получены спектры с высоким отношением S/N и разрешением в различных фазах периода вращения. Анализ выполнялся методом решения прямой задачи с учетом полного зеемановского расщепления линий и неоднородного (секторно-кольцевого) распределения химических элементов. Сравнивались теоретические спектры 53 Cam с наблюдаемыми. Наилучшее согласие результатов наблюдений с расчетами синтетического спектра было достигнуто для модели магнитного поля, состоящего из совмещенных по оси диполя, квадруполь и октуполя, с напряженностью на полюсах H_p : $-16\,300$, -7300 , $+4900$ Гс соответственно и с углами наклона оси вращения $i = 64^\circ$, оси магнитного поля $\beta = 82^\circ$.

Landstreet (1988) построил также карты распределения химических элементов по поверхности звезды. Он нашел, что элементы Cr и Fe распределены примерно однородно по всей поверхности звезды с небольшим дефицитом вокруг магнитного экватора. На магнитных полюсах содержание Cr больше примерно в 40 раз по сравнению с солнечным и в 15 раз — на магнитном экваторе, содержание Fe больше в десять раз на магнитных полюсах и в четыре раза на — магнитном экваторе. Совершенно другое распределение Ti: его в 20 раз больше вокруг отрицательного магнитного полюса, в десять раз меньше на магнитном и в 100 раз меньше вокруг положительного полюса. Содержание Ca повышенное в области вокруг положительного полюса, содержание Sr большее в 2000 раз в основном вокруг отрицательного полюса, а на остальной поверхности больше в 500 раз. Landstreet (1988) делает вывод о том, что химический состав на двух магнитных полюсах звезды кардинально различается.

Альтернативой модели из совмещенных по оси диполя, квадруполь и октуполя может быть сильно смещенный диполь, однако смещение должно быть большим: $0.67 R_{\text{star}}$. Более приемлема

прежняя модель Borra and Landstreet (1977) со значениями поля $+11$ кГс на положительном и -28 кГс на отрицательном полюсах и со смещением диполя на $0.15 R_{\text{star}}$ в сторону отрицательного поля. Но автор предпочитает мультиполярную модель как более подходящую. Из точного значения $v_e \sin i = 13 \text{ км с}^{-1}$ и угла наклона оси вращения i , полученного из геометрии магнитного поля, определен радиус $R = 1.4 \pm 0.14 R_\odot$ и масса $M = 2.0 \pm 0.3 M_\odot$. Моделирование показало, что полюса диполя неравноценны ни в магнитном, ни в химическом отношении. Работа Landstreet (1988) оказала большое влияние на развитие исследований магнитных CP-звезд.

Заметной оказалась работа Babel and Lanz (1992), в которой методом моделей атмосфер изучались спектры звезды в ультрафиолетовой области, полученные на спутнике IUE (International Ultraviolet Explorer)¹ в области длин волн $2500\text{--}3200 \text{ \AA}$ с высоким спектральным разрешением. Линии в далекой UV-области образуются в атмосфере гораздо выше. Для расчетов использовались ЛТР-модели Kurucz (1979) при $T_{\text{eff}} = 8500 \text{ К}$, $\log g = 4.0$ и при металличности либо солнечной, либо в 10 раз превышающей солнечную. Синтетические спектры рассчитывались в программе ZEEMAN (Landstreet 1988) как при однородном, так и при стратифицированном распределении содержания химических элементов (Babel 1992).

Проведено сравнение полученного поверхностного содержания химических элементов в UV-области с предыдущим определением содержания в видимой части спектра. Оказалось, что по UV-линиям содержания элементов Cr и Fe падают с высотой. Спектры, рассчитанные при стратифицированном распределении содержания, которое предсказывается с учетом диффузии и потери массы, особенно хорошо согласуются с данными IUE в линиях Cr. Что касается содержания элементов Ca, Ti, Mn, то Babel (1992) не удалось сделать определенных выводов: вариации UV-линий ионов Ti II, Cr II, Fe II подтверждают их поверхностное распределение, найденное по оптическим линиям. Babel and Michaud (1991) провели расчеты радиационного ускорения по линиям Ca, Sc, Ti, Mn, Cr, Sr. Они показали, что объяснить спектр 53 Cam можно лишь с учетом потери массы в пределах $10^{-12}\text{--}10^{-14} M_\odot$ в год. Leger (1990) продемонстрировал, что может возникнуть широкополосная линейная поляризация в спектрах магнитных звезд из-за различного насыщения зеемановских компонент спектральных линий (эффект

¹http://iuewww.gsfc.nasa.gov/iue/iue_homepage.html

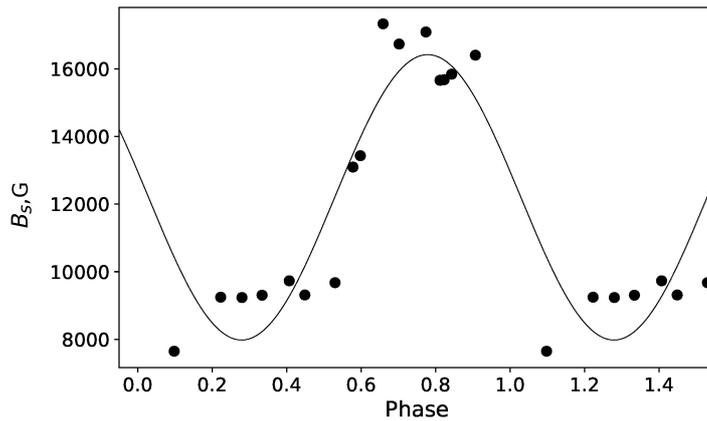


Рис. 1. Фазовая кривая измерений поверхностного магнитного поля B_s из работы Mathys et al. (1997).

«кривой роста»). Был построен высокоточный широкополосный спектрополяриметр и показано, что эффект действительно наблюдается (Leroу et al. 1993). Далее Leroу (1995) выполнил наблюдения широкополосной линейной поляризации для 53 Cam. Кривые Q - и U -параметров показывают тройную волну с большим рассеянием, а в плоскости Q/I и U/I видна непонятная картина. В фазе $\phi = 0.0$ (положительный экстремум) Q -параметр имеет знак «+». Наилучший период вращения, найденный в этой работе:

$$JD(\max) = 2435857.^d66 + 8.^d0269 E.$$

Для объяснения своих наблюдений Leroу et al. (1996) предложили модель магнитного поля 53 Cam в виде модифицированной дипольной модели, в которой силовые линии поля не замкнуты и распространяются от звезды. Такое объяснение было критически воспринято и не получило поддержки. Большое рассеяние может указывать на наличие структур магнитного поля малого масштаба.

По какой-то причине линейная поляризация этой звезды небольшая по сравнению с сильным магнитным полем. Однако переменность параметров Стокса со временем хорошо изучена благодаря большому количеству наблюдений. Магнитное поле на поверхности обладает рядом особенностей: Landstreet (1988) показал, что поле на разных полюсах диполя имеет разную напряженность, поэтому в качестве изначальной он принял модель поля, представляющую собой сумму диполя и квадруполья. Leroу (1990) предположил, что, возможно, звезда на поверхности имеет магнитные пятна малых размеров. Здесь уместно напомнить, что, исследуя другую звезду с сильным магнитным полем — HD 37776 — на 6-м телескопе, мы также не обнаружили в ее спектре признаков значительной линейной поляризации (Yakunin et al. 2011).

По-видимому, топология магнитного поля обеих звезд не описывается простыми моделями.

Mathys et al. (1997) провели 16 измерений модуля среднего поверхностного магнитного поля B_s по расщепленным зеемановским компонентам (рис. 1). Для определения фазы периода использовались эфемериды из работы Landstreet (1988). Было получено среднее значение поля $\langle B_s \rangle = 12840 \pm 3550$ Гс. Максимум, $B_s(\max)$, совпадает с отрицательным экстремумом продольного компонента магнитного поля B_e . Это согласуется с предыдущими исследованиями (Nuchra 1972, Landstreet 1988), в которых показано, что у 53 Cam поле на отрицательном магнитном полюсе сильнее, чем на положительном.

С целью уточнения периода вращения 53 Cam Hill et al. (1998) выполнили серию новых наблюдений на бальмеровском магнитометре. В указанной работе приведена новая фазовая кривая измерений магнитного поля звезды по линии водорода $H\beta$ (см. рис. 2). Был уточнен период вращения, который актуален и в настоящее время: $P = 8.^d02681 \pm 0.^d00004$.

Кривая имеет синусоидальную форму, значения продольного компонента изменяются от -4500 Гс до $+4000$ Гс. Параметры кривой следующие: $B_0 = -53$ Гс, $B_1 = 4572$ Гс. Это свидетельствует о том, что поле практически дипольное и симметричное по отношению к центру звезды, и говорит о явном противоречии с предыдущими результатами, указывающими на большую ангармоничность фазовой кривой продольного магнитного поля. Если пользоваться только данными, полученными на бальмеровском магнитометре, то нет никаких оснований предполагать сложную структуру магнитного поля звезды.

Для разрешения вопроса требовалось получить новые наблюдательные данные. Развитие техники

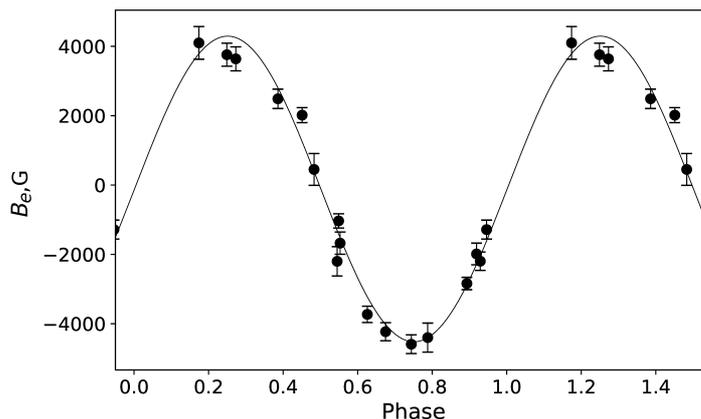


Рис. 2. Фазовая кривая измерений продольного компонента магнитного поля B_e из работы Hill et al. (1998).

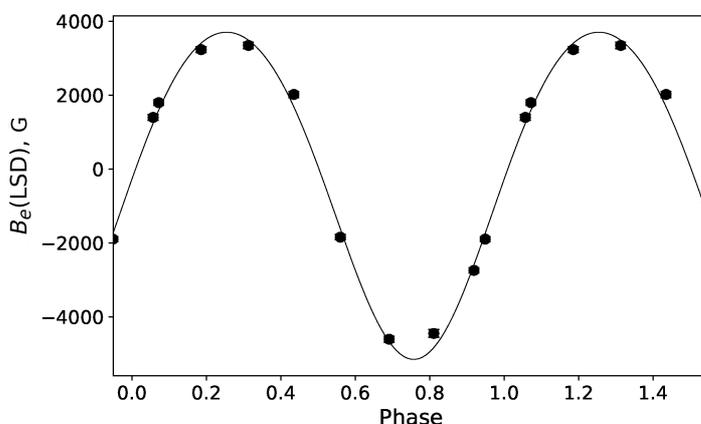


Рис. 3. Фазовая кривая измерений продольного компонента магнитного поля, полученных методом LSD (Wade et al. 2000a). При построении фазовой кривой использовался период вращения из работы Hill et al. (1998).

к концу XX века позволило измерять и анализировать все параметры Стокса в спектральных линиях. Wade et al. (2000b) опубликовали работу по анализу профилей этих параметров. Впервые была зарегистрирована линейная поляризация в линиях, проведено десять полных или частичных наблюдений четырех параметров Стокса, охватывающих весь период вращения звезды. Но линейная поляризация была зарегистрирована только в некоторых фазах и в отдельных магниточувствительных линиях. Было найдено, что распределение элементов Fe и Cr почти идентично и относительно равномерное по поверхности, но Ti распределен неоднородно: минимум содержания Ti в $\phi = 0.25$, когда положительный полюс проходит ближе всего к лучу зрения, и максимум содержания в $\phi = 0.75$, когда отрицательный полюс проходит ближе всего к лучу зрения. Подтверждается полное согласие распределения химических элементов с результатами предыдущей работы Landstreet (1988).

Модельные же расчеты предсказывают большую линейную поляризацию, регистрируемую во всех фазах периода. В работе Wade et al. (2000a) описывается новый подход к измерению продольного поля и линейной поляризации в спектрах магнитных звезд: метод LSD (Least Squares Deconvolution)². Этот метод позволил получать сигнал поляризации одновременно от многих линий и обеспечил высокую точность измерений. Метод пригоден как для узких, так и для широких линий. Получены данные для девяти фаз периода вращения 53 Cam (см. рис. 3). Прослеживается несинусоидальная переменность продольного поля с фазой периода, которая не видна в водородных линиях. Построены модели магнитного поля по разным элементам. Продольное поле по линиям элементов Fe и Cr меняется одинаково, от -5000

²Более подробно о методе см. работу Kochukhov et al. (2010)

до +4000 Гс, в то время как по линиям Ti видны очень большие различия: от -5000 до 0 Гс.

Сравнение с измерениями, выполненными на бальмеровском магнитометре, показало хорошее согласие. Однако имеется вклад несинусоидального компонента, которого не видно на фазовой кривой, полученной по измерению линии H β . Так как LSD-измерения выполняются по линиям металлов, это еще раз подтверждает влияние пятенной структуры распределения химического состава на фазовую кривую продольного компонента магнитного поля.

В работе Bagnulo et al. (2001) проведены сравнение и анализ наблюдаемых и вычисленных профилей четырех параметров Стокса для двух известных звезд: β CrV и 53 Cam. Авторы нашли, что построенные ими магнитные модели не полностью подходят для описания профилей Стокса. Это заметно для предсказанных и наблюдаемых Q- и U-профилей 53 Cam. Bagnulo et al. (2001) предполагают, что магнитная морфология сложнее, чем мультиполярное расширение второго порядка.

Для объяснения описанных выше различий, полученных по линиям водорода и металлов, выдвигались следующие предположения:

- наблюдения Вавсовск (1958a; b) фотографические, поэтому менее точные;
- линии металлов распределены неоднородно, поэтому кривая несимметрична;
- из-за нелинейности характеристической кривой фотоэмульсии измеряются не центры тяжести всех линий, а только ядро.

Однако новые ПЗС-наблюдения подтвердили правоту Вавсовск (1958a; b): кривая по линиям металлов ангармонична; водород распределен равномерно, хотя Musielok and Madej (1988) нашли переменность линии H β . На рис. 4 представлена фазовая кривая измерений продольного поля, полученная нами по линиям металлов в течение нескольких лет на 6-м телескопе БТА. На ней четко виден широкий положительный экстремум со значением поля $B_e(\max) \sim +4000$ Гс и резкий отрицательный минимум с величиной поля $B_e(\min) \sim -6000$ Гс.

Leone and Manfre (1997) показали, что обогащенные или обедненные металлами и/или гелием области могут изменять профили бальмеровских линий, что может вызвать переменность продольного поля вплоть до 10%. Разные ионы металлов не удается одновременно хорошо описать при одном и том же химическом содержании. Авторы предполагают, что существует сильная зависимость химического состава от оптической глубины: надо учитывать не только неоднородное распределение

элементов, но и стратификацию. Они не изучали вертикальную структуру поля и не исключили тот факт, что она тоже может быть сложной, хотя это маловероятно. Brillant et al. (1999), Mathys et al. (2000) доказывают, что получить достоверный результат измерения поля по линиям водорода можно только в случае слабого поля.

Bagnulo et al. (2002) провели статистический анализ магнитной структуры CP-звезд. Была промоделирована выборка из 34 звезд, у которых магнитная морфология представлена в виде суперпозиции дипольного и квадрупольного поля и подтверждены ранее полученные данные о том, что ось диполя имеет большой наклон у короткопериодических звезд и малый — у долгопериодических. Кроме того, у короткопериодических звезд плоскость, в которой размещены два вектора, характеризующие квадруполь, всегда совпадает с плоскостью, содержащей ось диполя и ось вращения, а у долгопериодических звезд ориентация квадруполя перпендикулярна этой плоскости. Stiff and Leone (2003) показали, что магнитное усиление линий играет важную роль при анализе неоднородности химического состава. Об этом ранее говорилось в работе Романюк (1984), где было показано, что линии редкоземельных элементов больше всего подвержены эффекту магнитного усиления линий, и при магнитном поле величиной 20–25 кГс увеличение эквивалентной ширины можно полностью объяснить за счет эффекта Зеемана. Это непосредственно касается 53 Cam, у которой во всех фазах периода наблюдается поверхностное магнитное поле B_s более 10 кГс.

Моделирование структуры магнитного поля 53 Cam было сделано в статье Kochukhov et al. (2004). В работе было представлено первое исследование структуры поверхностного магнитного поля звезды с использованием профиля линий во всех четырех параметрах Стокса. Спектры были получены в течение нескольких лет на спектрополяриметре MuSiCoS³. Использовался новый код Invers 10. Получена информация о геометрии магнитного поля и распределения химического состава у звезды в результате использования хорошо распределенных по периоду вращения поляризованных спектров высокого разрешения и нового кода для доплер-зеемановского картирования (ZDI). Комбинация уникальных данных по четырем параметрам Стокса и современная методика построения карт сделали возможным их исполнение, исходя непосредственно из переменности профиля параметров Стокса. Сложная магнитная структура 53 Cam определяется

³<https://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Spectroscopy/Espadons/www.ast.obs-mip.fr/projets/espadons/spectromus.html>

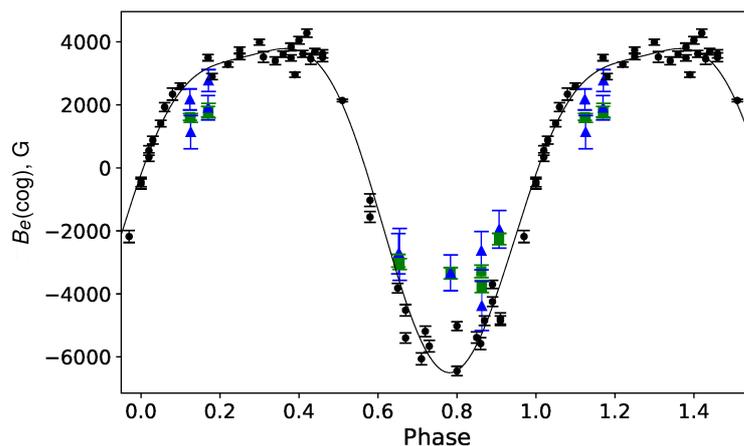


Рис. 4. Фазовая кривая измерений продольного компонента магнитного поля по линиям металлов: черные кружки — измерения из работ Romanyuk et al. (2020; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018), зеленые квадраты — измерения $B_e(V)$ из таблицы 2, синие треугольники — измерения $B_e(UV)$ из таблицы 2.

Таблица 2. Результаты измерений продольного магнитного поля B_e в области 3600–4300 Å

JD(245+)	Phase	$B_e(V) \pm \sigma$, Гс	$B_e(UV) \pm \sigma$, Гс	$B_e(h) \pm \sigma$, Гс
8918.352	0.170	1786 ± 170	1910 ± 385	1288 ± 131
8918.361	0.171	1817 ± 230	2772 ± 347	1662 ± 378
8947.360	0.784	-3348 ± 180	-3334 ± 566	-3443 ± 778
8948.354	0.907	-2262 ± 182	-1948 ± 597	-773 ± 925
9100.497	0.862	-3286 ± 200	-2631 ± 608	-1626 ± 1101
9100.505	0.863	-3765 ± 195	-4384 ± 781	-3648 ± 852
9275.399	0.652	-2951 ± 204	-2725 ± 640	-2409 ± 215
9275.428	0.655	-3057 ± 173	-2747 ± 820	-2408 ± 450
9303.269	0.124	1615 ± 107	2172 ± 334	1877 ± 531
9303.299	0.126	1585 ± 142	1137 ± 528	1119 ± 288

непосредственно по интенсивности круговой и линейной поляризаций профиля линии Fe II 4924 Å с сильной магнитной чувствительностью. Модель предсказывает наличие более сильного магнитного поля в фазе положительного экстремума. В результате топология магнитного поля 53 Cam существенно более сложная, чем описывается мультиполярной геометрией низкого порядка. Максимум наблюдается на мультиполях пятого и шестого порядков, что соответствует угловым размерам 30°–40°. Изменение продольного поля с фазой периода хорошо описывается моделью, но есть различия с результатами наблюдений Mathys et al. (1997) поверхностного поля B_s . Кроме

того были восстановлены карты распределения химических элементов Si, Ca, Ti, Fe и иона Nd II. Найдены резкие изменения в противофазе Ca и Ti. Результаты определения химического состава хорошо согласуются с результатами Landstreet (1988). Уточнены физические параметры звезды, в частности возраст $\log t = 8.8$.

Kudryavtsev and Romanyuk (2011) рассмотрели вертикальную структуру атмосферы и конфигурации магнитного поля и привели результаты измерений магнитного поля 23 химически пекулярных звезд по линиям металлов и по ядру линии водорода H β . В отличие от измерений, выполненных на бальмеровском магнитометре, здесь

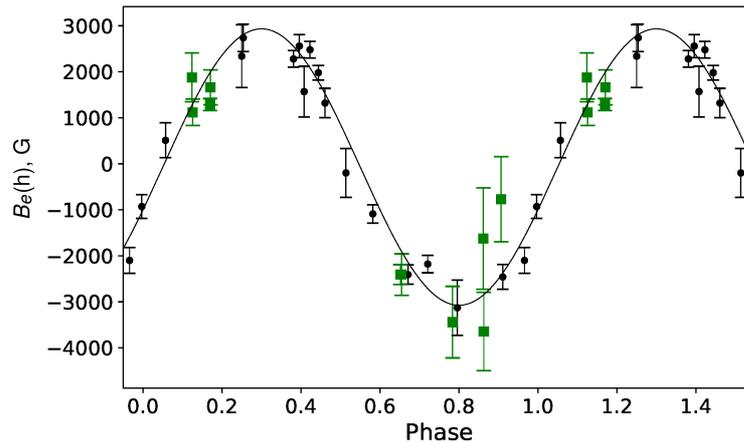


Рис. 5. Фазовая кривая измерений продольного компонента магнитного поля по линиям водорода: черные кружки — измерения из работы Kudryavtsev and Romanyuk (2011), зеленые квадраты — измерения $B_e(t)$, полученные в данной работе (см. таблицу 2).

определялась не круговая поляризация в крыльях водородной линии, а сдвиг ядра линии. Поскольку ядро водородной линии образуется в более высоких слоях атмосферы, чем ее крылья, то, сравнивая результаты, полученные в разных частях профиля, можно судить о вертикальной структуре химического состава и магнитного поля. Было найдено, что у 22 из 23 звезд величина магнитного поля, определенная по ядру линии, оказывается значительно меньше, чем по крыльям линии $H\beta$. Это указывает на общую причину — ослабление поля с глубиной атмосферы, — либо на существенные недостатки используемых моделей атмосфер. Отметим также, что в ядре линии $H\beta$ можно увидеть расщепленные зеемановские компоненты в некоторых фазах периода вращения, что может в конечном итоге повлиять на величину измеренного магнитного поля. Возможно, имеющиеся модели атмосфер не очень хорошо описывают поляризованные крылья и ядра водородной линии, что также может привести к различиям в величине измеренного поля.

Для 53 Сам было найдено существенное (на 40%) уменьшение амплитуды изменений магнитного поля по ядру линии водорода по сравнению с линиями металлов. На рис. 4 и 5 представлены результаты измерений продольной компоненты поля по линиям металлов методом центра тяжести (cog) и по ядру линии $H\beta$. Видно, что во всех фазах периода вращения продольный компонент магнитного поля B_e , измеренный по ядру линии $H\beta$, значительно меньше, чем по линиям металлов. Мы считаем это проявлением радиального градиента поля.

Уместно напомнить, что все расчеты проявления эффекта Зеемана выполнены при условии

слабого поля. Следует учесть, что Preston (1969) наблюдал расщепленные зеемановские компоненты в ядрах водородных линий, то есть условие слабого поля не выполнялось. Возможно, это также играет какую-то роль. Однако в других звездах с более слабым магнитным полем расщепление не наблюдается, но величина поля, измеренная по ядру, также меньше.

3. НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ИХ АНАЛИЗ

Точность измерений магнитного поля по ядру одной линии $H\beta$ оценивается примерно в 500 Гс, что редко бывает лучше 10–15% от измеряемой величины. Это не позволяет выявлять такие тонкие эффекты, как изменение поля с высотой в атмосфере. Для повышения точности измерений мы решили переформатировать вариант наблюдений, чтобы можно было использовать не одну линию водорода $H\beta$, а набор линий бальмеровской серии, начиная от бальмеровского скачка до $H\delta$. Качество материала позволило выполнить измерения зеемановских сдвигов от восьми до десяти линий водорода по их ядрам.

3.1. Методика наблюдений и анализа данных

Наблюдения выполнялись на Основном звездном спектрографе (ОЗСП)⁴ телескопа БТА (Panchuk et al. 2014) с анализатором круговой поляризации (Chountov 2016) в области длин волн 3500–4300 Å со средним разрешением

⁴<https://www.sao.ru/hq/lizm/mss/en/index.html>

$R = 10000$. Этапы обработки данных схожи с работой в визуальной области и проводились в среде MIDAS (Banse et al. 1983) с использованием контекста ZEEMAN (Kudryavtsev 2000). Для наблюдений применялась решетка с углом блеска 15.5° (рабочий порядок II, средняя обратная дисперсия 13.2 \AA mm^{-1}). На длинах волн короче 3800 \AA наблюдается резкое падение интенсивности получаемого спектра из-за потери чувствительности ПЗС-матрицы в UV-области.

В качестве первого этапа исследований мы решили выполнить измерения магнитного поля по самым глубоким частям профиля водородной линии — их ядрам. Так же, как и бальмеровский континуум, они образуются в самых верхних слоях атмосферы звезды. Поскольку в спектре мы можем одновременно получать около десяти линий бальмеровской серии, то, измеряя их, достигаем приемлемой точности величины магнитного поля.

3.2. Результаты измерений магнитного поля

Мы представляем наши результаты измерений для 53 Cam продольного компонента магнитного поля B_e в области $4450\text{--}4950 \text{ \AA}$ (см. рис. 4). Полученная кривая напоминает фазовую кривую из работ Вавска (1958a; b): положительный экстремум — широкий, отрицательный — узкий. При фазе отрицательного экстремума спектральные линии шире, что говорит о более сильном магнитном уширении линий вследствие эффекта Зеемана, это подтверждает наличие более сильного поля в отрицательном экстремуме.

Мы выполнили новые наблюдения в области спектра $3600\text{--}4300 \text{ \AA}$ в 2020 и 2021 гг. Результаты представлены в таблице 2, где JD — юлианская дата наблюдений, Phase — вычисленная фаза периода вращения из работы Hill et al. (1998), $B_e(V)$ — измерения магнитного поля по линиям металлов после бальмеровского скачка, $B_e(UV)$ — измерения магнитного поля по линиям металлов до бальмеровского скачка, $B_e(H)$ — измерения магнитного поля по линиям водорода. Сравнение полученных нами данных с более ранними результатами показано на рис. 4 для линий металлов, на рис. 5 — для линий водорода.

К сожалению, отношение S/N при $\lambda < 3800 \text{ \AA}$ резко падает, что сильно ухудшает точность измерений поля в области до бальмеровского скачка. Тем не менее мы видим, что почти во всех фазах периода вращения результаты измерений в UV-области дают меньшее значение магнитного поля. По результатам измерений в ядре линий водорода магнитное поле существенно меньше, чем по линиям металлов, что подтверждает результаты, опубликованные в работе Kudryavtsev and

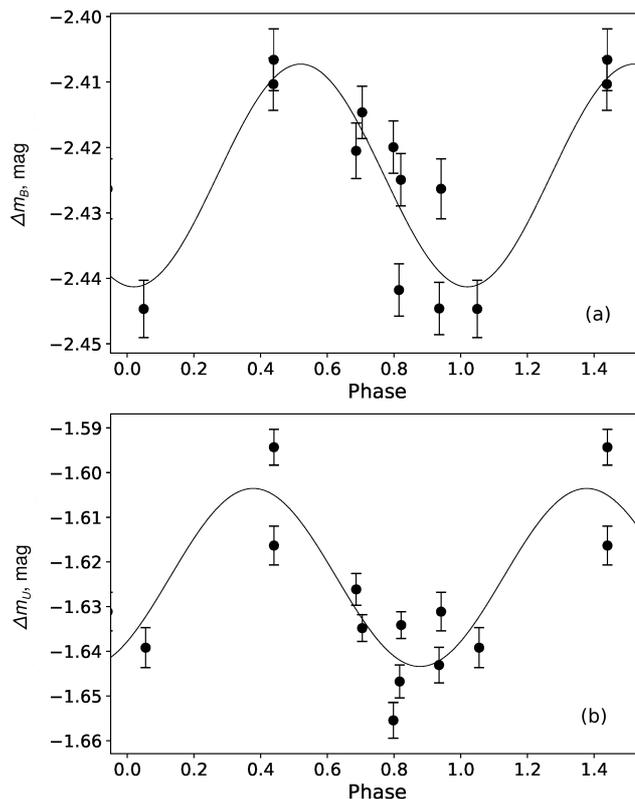


Рис. 6. Фазовая кривая фотометрических данных: (a) — фильтр B , (b) — фильтр U .

Romanuk (2011), где показано, что у 22 звезд из исследуемых 23 магнитное поле, измеренное по линии водорода $H\beta$, оказалось меньшим, в том числе и для 53 Cam. Сейчас по полученным новым данным для этой звезды мы наблюдаем аналогичный эффект.

3.3. Новые результаты фотометрии

В связи с тем, что в литературе мы не нашли новых фотометрических наблюдений звезды, а проведенные 40–50 лет назад дают противоречивые результаты, особенно в определении моментов максимумов блеска в разных фильтрах (см., например, Jarzembowski (1960), Musielok et al. (1980), Preston and Stepień (1968)), было решено провести новые фотометрические наблюдения.

Они были выполнены в Крымской астрофизической обсерватории на 38-см телескопе К-380 с использованием ПЗС-камеры Apogee Alta в полосах U , B , V , R и I . Всего было восемь наблюдательных ночей в период 18–31 октября 2021 г. В качестве стандарта использовалась звезда HD 65518 — самая яркая из попадающих в поле матрицы. Также в качестве контрольных звезд наблюдались BD +60 1104 и TYC 4126-1101-1. Обработка данных проводилась стандартными процедурами в пакете программ IRAF.

Таблица 3. Результаты фотометрии 53 Сам в полосе U относительно звезды сравнения HD 65518

HJD(245+)	N_{exp}	T_{exp} (in total), s	Phase	Δm_U
9506.473	108	432	0.44	-1.616
9508.452	208	832	0.69	-1.626
9508.596	—	—	0.70	-1.635
9509.535	96	384	0.82	-1.634
9510.495	202	808	0.94	-1.631
9514.498	126	504	0.44	-1.594
9517.374	204	816	0.80	-1.655
9517.526	—	—	0.82	-1.647
9518.474	220	880	0.93	-1.643
9519.440	187	748	0.06	-1.639

Таблица 4. Результаты фотометрии 53 Сам в полосе B относительно звезды сравнения HD 65518

HJD(245+)	N_{exp}	T_{exp} (in total), s	Phase	Δm_B
9506.460	108	1296	0.44	-2.410
9508.452	211	2532	0.69	-2.421
9508.597	—	—	0.70	-2.415
9509.529	94	1128	0.82	-2.425
9510.496	202	2424	0.94	-2.426
9514.497	127	1524	0.44	-2.407
9517.375	204	2448	0.80	-2.420
9517.510	—	—	0.81	-2.442
9518.479	220	2640	0.94	-2.445
9519.394	187	2244	0.05	-2.445

Мы построили фазовые кривые с эфемеридой из работы Hill et al. (1998). Переменность была зафиксирована только в фильтрах B и U (см. таблицу 3, таблицу 4 и рис. 6), в остальных фильтрах (V , R , I) значимая переменность не обнаружена. Видно, что амплитуда переменности совпадает, а фазы экстремумов смещены приблизительно на 0.2 фазы периода вращения звезды. Сравнение фотометрических кривых с магнитными измерениями показывает, что положения максимума и минимума в фильтре U совпадают с максимальным и минимальным значениями магнитного поля, как описано ранее, но результаты в фильтре B противоречат прежним. Таким образом, результаты фотометрии не поддаются простой интерпретации.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая вышеприведенные результаты разных авторов, можно с уверенностью сказать, что магнитное поле 53 Сам не описывается простой дипольной моделью поля с неоднородным распределением химического состава по поверхности. Представление о структуре магнитного поля звезды зависит от применяемого метода наблюдений.

Измерения по водородным линиям показывают, что фазовая кривая продольного поля с периодом из работы Hill et al. (1998) синусоидальная и симметричная. Можно было бы предположить, что поле звезды описывается простым симметричным центральным диполем. Однако такая модель противоречит многочисленным результатам измерений, выполненных по линиям металлов.

Очевидно, что поле в фазе отрицательного экстремума сильнее, чем в фазе положительного, что

иллюстрировалась ранее неоднократно. То, что в работах Kochukhov et al. (2004), Landstreet (1988) не было найдено линий Ti в области положительного полюса — удивительный факт: положительный и отрицательный магнитные полюса с физической точки зрения не должны различаться. Однако, как было показано выше, результаты исследований разных авторов, выполненных в разное время, подтверждают факт отсутствия титана в области положительного полюса.

Мы показали, что магнитное поле B_e , определенное по слабоинтенсивным спектральным линиям, которые образуются в более глубоких слоях атмосферы, примерно в два раза сильнее, чем для интенсивных линий, образующихся в верхних слоях атмосферы звезды. Измерения магнитного поля по ортогонально поляризованным ядрам линий водорода, которые образуются в высоких слоях атмосферы, также показали ослабление продольного магнитного поля. При этом при измерениях круговой поляризации в крыльях водородной линии $H\beta$ этот эффект не наблюдается: крылья образуются в более глубоких слоях атмосферы. Практически ненаблюдаема линейная поляризация в линиях от поперечного эффекта Зеемана, предсказанная теорией, также указывает на недостаточно точное описание атмосфер магнитных звезд с очень сильным полем. Возможно, поле 53 Сам наряду с дипольным компонентом имеет и другой, с более сложной, запутанной структурой.

На наш взгляд, необходимо отказаться от концепции однородности поверхности 53 Сам: различные по химическому составу области могут образовываться не только в разных местах на поверхности, но и на разной глубине. В работе Kochukhov

et al. (2004) показано, что магнитное поле лучше всего представляется мультиполем 5–6 порядка (то есть областями размером 30° – 40°), что указывает на двухкомпонентную структуру поля: дипольный компонент + мультипольный компонент. Нет оснований считать, что все мультиполи находятся в одной плоскости.

Нам представляется, что поле на отрицательном магнитном полюсе диполя значительно более сильное, потому что он наблюдается в более глубоких слоях атмосферы. Существует также вертикальная стратификация элементов: Ti опускается глубоко, поэтому в верхних слоях он не виден.

Таким образом, мы видим, что структура магнитного поля 53 Cam очень сложная и в настоящее время не совсем понятная. Для прояснения этого вопроса необходимо привлекать оптические интерферометры с базой порядка 10 км. Это поможет увидеть реальную структуру магнитного поля данного объекта, что в настоящее время является отдаленной перспективой. А в ближайшие десятилетия только спектрополяриметрия высокого разрешения может дать новые данные, позволяющие частично решить проблему.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Национальный комитет по тематике российских телескопов (НКРТ — <https://www.sao.ru/hq/Komitet/>) за выделение наблюдательного времени на 6-м телескопе. Авторы выражают благодарность К. Н. Гранкину за помощь в анализе полученных фотометрических данных. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No. 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016). Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. В работе активно использовались астрономические базы NASA's Astrophysics Data System и SIMBAD.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа частично финансировалась Российским фондом фундаментальных исследований (грант No. 20-02-00233а). ИАЯ выражает благодарность проекту РФФИ No. 19-32-60007, АВМ — благодарность гранту Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук МК-682.2021.6 за финансовую поддержку.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. W. Babcock, *Astrophys. J. Suppl.* **3**, 141 (1958a).
2. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **128**, 228 (1958b).
3. J. Babel, *Astron. and Astrophys.* **258**, 449 (1992).
4. J. Babel and T. Lanz, *Astron. and Astrophys.* **263**, 232 (1992).
5. J. Babel and G. Michaud, *Astrophys. J.* **366**, 560 (1991).
6. S. Bagnulo, M. Landi Degl'Innocenti, M. Landolfi, and G. Mathys, *Astron. and Astrophys.* **394**, 1023 (2002).
7. S. Bagnulo, G. A. Wade, J. F. Donati, et al., *Astron. and Astrophys.* **369**, 889 (2001).
8. K. Banse, P. Crane, P. Grosbol, et al., *Messenger* **31**, 26 (1983).
9. E. F. Borra, *Astrophys. J.* **186**, 959 (1973).
10. E. F. Borra and J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **212**, 141 (1977).
11. S. Brillant, G. Mathys, and C. Stehlé, *AIP Conf. Ser.* **467**, p. 256 (1999).
12. G. A. Chountonov, *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 489 (2016).
13. R. Faraggiana, *Astron. and Astrophys.* **22**, 265 (1973).
14. Gaia Collab., *VizieR Online Data Catalog I/345* (2018).
15. I. V. Glagolevskii, K. I. Kozlova, I. M. Kopylov, et al., *Sov. Astron. Lett.* **3**, 273 (1977).
16. J. Hardorp, *Proc. IAU Coll.*, No. 32, 627 (1976).
17. G. M. Hill, D. A. Bohlender, J. D. Landstreet, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **297** (1), 236 (1998).
18. E. Høg, C. Fabricius, V. V. Makarov, et al., *Astron. and Astrophys.* **355**, L27 (2000).
19. J. Huchra, *Astrophys. J.* **174**, 435 (1972).
20. T. Jarzembowski, *Acta Astronomica* **10**, 31 (1960).
21. J. C. Kemp and R. D. Wolstencroft, *Astrophys. J.* **179**, L33 (1973).
22. V. L. Khokhlova, *Astronomische Nachrichten* **297** (4), 203 (1976).
23. O. Kochukhov, S. Bagnulo, G. A. Wade, et al., *Astron. and Astrophys.* **414**, 613 (2004).
24. O. Kochukhov, V. Makaganiuk, and N. Piskunov, *Astron. and Astrophys.* **524**, A5 (2010).
25. D. O. Kudryavtsev, in *Proc. Int. Meeting on Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1999*, Ed. by Y. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (Spec. Astroph. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, 2000), p. 84.
26. D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, in *Proc. Int. Meeting on Magnetic Stars, Nizhnij Arkhyz, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Russia, 2010*, Ed. by I. I. Romanyuk and D. O. Kudryavtsev (Spec. Astroph. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, 2011), p. 104.
27. R. L. Kurucz, *Astrophys. J. Suppl.* **40**, 1 (1979).
28. J. D. Landstreet, *Astrophys. J.* **326**, 967 (1988).

29. F. Leone and M. Manfre, *Astron. and Astrophys.* **320**, 257 (1997).
30. J. L. Leroy, *Astron. and Astrophys.* **237**, 237 (1990).
31. J. L. Leroy, M. Landolfi, and E. Landi Degl'Innocenti, *Astron. and Astrophys.* **270**, 335 (1993).
32. J. L. Leroy, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **114**, 79 (1995).
33. J. L. Leroy, M. Landolfi, and E. Landi Degl'Innocenti, *Astron. and Astrophys.* **311**, 513 (1996).
34. G. Mathys, S. Hubrig, J. D. Landstreet, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **123**, 353 (1997).
35. G. Mathys, C. Stehlé, S. Brillant, and T. Lanz, *Astron. and Astrophys.* **358**, 1151 (2000).
36. C. E. Moore, *Contrib. Princeton Univ. Obs.* **20**, 1 (1945a).
37. C. E. Moore, *Contrib. Princeton Univ. Obs.* **21**, 87 (1945b).
38. B. Musielok, D. Lange, W. Schöneich, et al., *Astronomische Nachrichten* **301** (2), 71 (1980).
39. B. Musielok and J. Madej, *Astron. and Astrophys.* **202**, 143 (1988).
40. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014).
41. G. W. Preston, *Astrophys. J.* **157**, 247 (1969).
42. G. W. Preston and K. Stepien, *Astrophys. J.* **151**, 583 (1968).
43. D. M. Pypers and S. J. Adelman, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **51**, 365 (1983).
44. I. I. Romanyuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **12**, 3 (1980).
45. I. I. Romanyuk, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **18**, 37 (1984).
46. I. I. Romanyuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **22**, 22 (1987).
47. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, E. A. Semenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (3), 294 (2020).
48. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **69** (4), 427 (2014).
49. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **70** (4), 444 (2015).
50. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, and A. V. Moiseeva, *Astrophysical Bulletin* **71** (3), 302 (2016).
51. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (4), 391 (2017).
52. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (2), 178 (2018).
53. G. Scholz, *Astronomische Nachrichten* **299** (1), 305, (1978).
54. G. Scholz and H. Lehmann, *Astronomische Nachrichten* **309** (1), 33 (1988).
55. M. J. Stiff and F. Leone, *Astron. and Astrophys.* **398**, 411 (2003).
56. G. A. Wade, J. F. Donati, J. D. Landstreet, and S. L. S. Shorlin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **313** (4), 851 (2000a).
57. G. A. Wade, J. F. Donati, J. D. Landstreet, and S. L. S. Shorlin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **313** (4), 823 (2000b).
58. I. A. Yakunin, G. A. Chuntunov, E. A. Semenko, and I. I. Romanyuk, in *Proc. Int. Meeting on Magnetic Stars, Nizhnij Arkhyz, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Russia, 2010*, Ed. by I. I. Romanyuk and D. O. Kudryavtsev (*Spec. Astroph. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz*, 2011), p. 137.

On the Magnetic Field Structure of Chemically Peculiar Star 53 Cam

I. I. Romanyuk¹, A. V. Moiseeva¹, D. O. Kudryavtsev¹, I. A. Yakunin^{1,2}, V. N. Aitov¹ and D. N. Baklanova³

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

²St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia

³Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

Based on our previous and recent magnetic field observations of a chemically peculiar star 53 Cam with the 6-m telescope and literary sources, we can make a conclusion that its field structure differs from a simple dipole. At the same time the results of measurements from hydrogen lines are described by a simple dipole model. However, data obtained from metallic lines (including magnetic mapping methods) point to a more complex field structure. We performed new observations of the magnetic field in the Balmer series hydrogen lines in the near UV-range. These peculiarities may show that the field strength increases with depth in the atmosphere of 53 Cam.

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