ОКОЛОЗВЕЗДНАЯ ОБОЛОЧКА ПОЛУПРАВИЛЬНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЗВЕЗДЫ V CVn

© 2019 г. Б. С. Сафонов^{1*}, А. В. Додин¹, С. А. Ламзин¹, А. С. Расторгуев^{2,1}

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

Поступила в редакцию 22.04.2019 г.; после доработки 06.05.2019 г.; принята к публикации 28.05.2019 г.

V CVn — красная полуправильная переменная звезда с амплитудой вариаций блеска в полосе $V \approx 2^m$. От других полуправильных переменных эту звезду отличает необычно большая амплитуда переменности степени поляризации — до 6%, заметная антикорреляция между степенью поляризации и полным потоком и относительное постоянство угла поляризации. Для выяснения природы этих особенностей мы наблюдали объект на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории Государ-ственного астрономичсекого института им. П.К. Штернберга МГУ, используя метод дифференциальной спекл-поляриметрии на длинах волн 550, 625 и 880 нм. Наблюдения были выполнены в 20 дат, распределенных по трем периодам пульсаций. Мы обнаружили вокруг звезды на расстоянии ≈35 мсд асимметричную отражательную туманность. В туманности выделяются три области, которые меняют свою яркость с тем же характерным временем, что и звезда, но с различными сдвигами по фазе. Рассмотрены несколько гипотез, которые могли бы объяснить такое поведение.

Ключевые слова: околозвездные оболочки, звезды: пульсации, методы: высокое угловое разрешение.

DOI: 10.1134/S0320010819070064

ВВЕДЕНИЕ

Излучение красных долгопериодических переменных звезд часто бывает поляризованным вследствие рассеяния на пыли, формирующейся в их холодных атмосферах. При этом степень и угол поляризации показывают нерегулярную переменность, обусловленную постоянными хаотическими изменениями в оболочках таких звезд. Доля поляризации обычно варьируется от 0 до 2%, а времена этих изменений — от месяца до нескольких лет (Кларк, 2010). Полуправильная переменная звезда V CVn с периодом 194^d и амплитудой вариаций блеска в полосе $V \approx 2^m$ (Самусь и др., 2017) выделяется на этом фоне. Степень поляризации ее излучения может достигать 6%, но угол поляризации довольно стабилен и меняется от 99° до 122° (Серковски, Шоул, 2001). Кроме того, V CVn показывает наиболее выраженную антикорреляцию между потоком и долей поляризации среди всех долгопериодических переменных звезд.

Нейлсон и др. (2014) детально изучили характер поляризационной переменности V CVn и на качественном уровне рассмотрели несколько гипотез, В обоих случаях форма сформировавшейся пылевой оболочки значительно отклоняется от центрально-симметричной, что может дать существенную полную поляризацию, ориентация которой будет весьма стабильна. Нейлсон и др. (2014) показали, как взаимодействие волн плотности ветра, вызванных пульсациями звезды, с пылевым диском или запыленной ударной волной может качественно объяснить наблюдаемую антикорреляцию поток — степень поляризации.

До сих пор исследовались лишь интегральные поляризационные свойства V CVn, в ходе которых

которые могли бы объяснить уникальное поведение звезды. Они пришли к выводу, что модель с пылевым диском и модель с ударной волной являются наиболее вероятными. В первом случае собственная поляризация генерируется при рассеянии на толстом пылевом диске или торе. Наблюдатель при этом располагается вблизи плоскости экватора этой структуры. Вторая гипотеза предполагает, что звездный ветер V CVn при взаимодействии с межзвездной средой образует ударную волну, похожую на ту, что наблюдается у *о* Cet (Мартин и др., 2007). Пыль в ветре будет накапливаться в области ударной волны, рассеивать и поляризовать наблюдаемое излучение объекта.

^{*}Электронный адрес: safonov@sai.msu.ru

JDa	Полоса	mag ⁶	p,% ^B	$ heta,^{\circ}$ B	Поляризованный поток, 10^{-2} г			γ^2
					ССВ	ЮЮВ	ЮЮЗ	λr
2458090.6	550	7.1	0.90 ± 0.15	106 ± 10	$0.22^{+0.03}_{-0.01}$	$0.35\substack{+0.02 \\ -0.02}$	$0.66^{+0.02}_{-0.02}$	1.7
2458090.6	625	5.9	0.93 ± 0.15	107 ± 9	$0.26\substack{+0.03\\-0.01}$	$0.28\substack{+0.03\\-0.01}$	$0.62^{+0.02}_{-0.01}$	2.0
2458090.6	880	3.7	0.70 ± 0.15	104 ± 12	$0.27\substack{+0.10 \\ -0.01}$	$0.14_{-0.01}^{+0.05}$	$0.38\substack{+0.04 \\ -0.01}$	3.0

Таблица 1. Наблюдения V CVn и результаты их аппроксимации моделью трех дуг (рис. 2)

Примечание. Полная версия таблицы доступна в электронном виде.

^а Юлианская дата JD приведена для центра серии.

⁶ Звездная величина приведена в полосе наблюдения. Она была оценена по квазиодновременным наблюдениям непеременной звезды HIP65550, для которой мы приняли следующие звездные величины в полосах 550, 625 и 880 нм: 5.9, 5.1 и 4.9, что соответствует ее звездным величинам в полосах V, R, I).

^в Степень и угол поляризации оценены по сериям, использованным для обработки методом дифференциальной спеклполяриметрии.

^{$r} Поляризованные потоки от дуг — компонентов оболочки относительно полного потока от объекта; неопределенность приведена в смысле <math>1\sigma$.</sup>

было получено большое количество измерений на разных фазах пульсационного периода звезды. Однако при этом поляризация усреднялась по объекту, который может иметь сложную структуру, что затрудняет интерпретацию его поведения. В таких случаях ключом к пониманию объекта может стать пространственная локализация поляризованного излучения.

В данной работе мы представляем измерения пространственного распределения поляризованного излучения V CVn с высоким угловым разрешением в несколько эпох. Мы уверенно разрешили околозвездную оболочку, ответственную за высокую и переменную поляризацию звезды. Поведение этой оболочки объясняет необычные поляризационные свойства V CVn.

Вначале мы описываем метод и выполненные наблюдения, а затем представляем простую геометрическую модель, в рамках которой определяем параметры оболочки. После этого обсуждается, насколько различные физические модели оболочки соответствуют наблюдениям. Итоги исследований подведены в Заключении.

НАБЛЮДЕНИЯ

Мы наблюдали звезду V CVn с помощью спеклполяриметра (СПП) 2.5-м телескопа Кавказской горной обсерватории Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга. Спеклполяриметр представляет собой комбинацию двухлучевого поляриметра и спекл-интерферометра видимого диапазона (Сафонов и др., 2017). Прибор предназначен для исследования распределения поляризованного излучения астрофизических объектов с дифракционным разрешением, т.е. ≈50 мсд при работе на длине волны 500 нм. Угловой масштаб камеры спекл-поляриметра составляет 20.6 мсд/пкс.

Наблюдения были выполнены в 20 дат, распределенных по трем периодам пульсаций звезды между мартом 2017 г. и январем 2019 г. (см. табл. 1). Был применен режим быстрой поляриметрии, использовались три среднеполосных фильтра, центрированные на 550, 625 и 880 нм. Наблюдения в марте и мае 2017 г. проводились в фильтрах Vи I_c . Наблюдения обработаны методом дифференциальной спекл-поляриметрии, описанным Сафоновым и др. (2019). Этот метод дает оценку отношений видностей объекта в двух ортогональных поляризациях (Норрис и др., 2012):

$$\mathcal{R}_{Q}(\mathbf{f}) = \frac{\widetilde{I}(\mathbf{f}) + \widetilde{Q}(\mathbf{f})}{\widetilde{I}(\mathbf{f}) - \widetilde{Q}(\mathbf{f})},$$
(1)
$$\mathcal{R}_{U}(\mathbf{f}) = \frac{\widetilde{I}(\mathbf{f}) + \widetilde{U}(\mathbf{f})}{\widetilde{I}(\mathbf{f}) - \widetilde{U}(\mathbf{f})},$$

где \tilde{I}, \tilde{Q} и \tilde{U} — фурье-образы распределений параметров Стокса в объекте, **f** — вектор пространственной частоты. Видно, что можно определить два отношения: \mathcal{R}_Q и \mathcal{R}_U для параметров Стокса Q и U соответственно. Метод дифференциальной спекл-поляриметрии позволяет оценивать как амплитуду, так и фазу величины \mathcal{R} . Наблюдения выполнялись в фокусах Кассегрена и Нэсмита. В последнем случае измерения были скорректированы за эффекты инструментальной поляризации (Сафонов и др., 2019).

Измерения величины \mathcal{R} в двух фильтрах, выполненные в две даты, представлены на рис. 1. Видно, что \mathcal{R} значимо отклоняется от единицы, следовательно, поляризованный поток разрешается.

Сафонов и др. (2019) показали, как из измерений \mathcal{R} можно оценить распределения соответствующих параметров Стокса в объекте. Из параметров Стокса в свою очередь можно вычислить поляризованную интенсивность и угол поляризации, распределения которых представлены на рис. 1 в нижнем ряду.

На рис. 1 видно, что в оболочке преобладает так называемая азимутальная картина поляризации. Плоскость поляризации некоторой элементарной площадки оболочки перпендикулярна к направлению, соединяющему эту площадку и звезду. Следовательно, скорее всего, оболочка является отражательной туманностью, т.е. светит за счет рассеяния излучения звезды. Наблюдения, выполненные в одну ночь, но в разных фильтрах, показывают хорошее согласие. С другой стороны, различия в наблюдениях, выполненных в различные даты, весьма велико. Например, 5 марта 2018 г. в туманности доминировала область к северосеверо-востоку (ССВ) от звезды. Всего через 82 дня 27 мая 2018 г., область к юго-юго-востоку (ЮЮВ) стала ярче, чем северная. В некоторые другие даты область к юго-юго-западу (ЮЮЗ) становится наиболее яркой (изображения для всех фильтров и всех дат наблюдений приведены на http://lnfm1.sai.msu.ru/kgo/mfc VCVn en.php).

Обнаруженная нами туманность имеет характерный угловой размер, сравнимый с дифракционным разрешением телескопа. Поэтому изображения, представленные в нижнем ряду рис. 1, сильно размыты дифракционной функцией рассеяния точки оптической системы. Из-за этого и некоторых других проблем восстановления изображений последние могут быть интерпретированы лишь качественно. Количественная интерпретация наблюдений будет выполняться в терминах \mathcal{R} в следующем разделе.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Опираясь на вид объекта на изображениях в поляризованном свете, мы предположили, что он может быть описан моделью, состоящей из неполяризованной центральной звезды и трех рассеивающих дуг (рис. 2). Конфигурация этих дуг фиксирована, мы будем обозначать их в соответствии с их расположением относительно звезды: ССВ, ЮЮВ, ЮЮЗ. Элементарные участки дуг поляризованы перпендикулярно направлению на звезду. В рамках этой модели наблюдение объекта в одном фильтре и в одну дату описывается четырьмя параметрами: радиусом дуг r_e и отношением их поляризованных потоков к полному потоку от объекта: $F_{\rm NNE}$, $F_{\rm SSE}$, $F_{\rm SSW}$. Напомним, что поляризованный поток — это произведение степени поляризации и обычного потока. Данные параметры задают распределение параметров Стокса I, Q, U в объекте, из которых можно рассчитать ожидаемые \mathcal{R}_Q и \mathcal{R}_U по формулам (1). Отметим, что в рамках используемого нами метода невозможно независимо оценить долю поляризации излучения дуг и потоки от них — измерению доступно лишь произведение этих величин, т.е. поляризованный поток.

Сравнение модельных и наблюдаемых величин \mathcal{R} выполнялось нами путем вычисления невязки с весом $1/\sigma^2$, где σ — неопределенность оценки \mathcal{R} (пример приведен в работе Сафонова и др., 2019). Невязка суммировалась в области частот, где отношение сигнал—шум величины \mathcal{R} достаточно велико (рис. 1). Оптимальная модель отыскивалась путем минимизации полной невязки.

Мы приняли, что радиус дуг r_e не зависит от времени и длины волны, и определили его путем совместной аппроксимации наблюдений в трех фильтрах, выполненных в две даты: 6 марта 2018 г. и 27 мая 2018 г. Он оказался равен 35 ± 1 мсд. Поскольку r_e меньше, чем формальное дифракционное разрешение телескопа, мы не можем выполнить модельно-независимое восстановление изображения оболочки. Величина r_e является условной, она была бы другой, например, в модели секторов, а не дуг. Тем не менее отклонение поляризованных источников от звезды, и их протяженность зафиксированы вполне надежно, а r_e может быть рассмотрена как характерный размер оболочки.

Зафиксировав $r_e = 35$ мсд, мы аппроксимировали каждое наблюдение индивидуально, варьируя оставшиеся три параметра $F_{\rm NNE}$, $F_{\rm SSE}$, $F_{\rm SSW}$. Примеры модельных величин \mathcal{R} и соответствующих изображений даны на рис. 1 в четных колонках. Результаты аппроксимации всех наблюдений приведены в табл. 1. Для 39 наблюдений из 57 приведенное χ^2 оказывается меньше трех, следовательно, модель с разумной точностью описывает наблюдения. В этом можно также убедиться, глядя на рис. 1.

Полный поляризованный поток от оболочки составляет 0.01-0.03 от полного потока объекта. Другими словами, оболочка объясняет поляризацию объекта, но при этом подавляющий вклад в полный поток дает неполяризованное излучение звезды.

Поведение компонентов оболочки в полосе 550 нм проиллюстрировано на рис. 3. Для удобства сравнения на этом же графике мы приводим



ряду обозначает область частот, в которой выполнялось сравнение наблюдений и модели. В нижнем ряду приведены распределения поляризованной интенсивности

на пиксель (угловой размер пикселя 20.6 мсд), по отношению к полному потоку от объекта. Отрезки показывают ориентацию поляризации, их длина произвольна.

В нижнем ряду по осям угловые координаты. Белой стрелкой показано направление собственного движения звезды. Везде север вверху, восток слева. Такие же

изображения для всех фильтров и всех дат можно найти на http://Infm1.sai.msu.ru/kgo/mfc_VCVn_en.php.



Рис. 2. Модель околозвездной оболочки V CVn, которая была использована для аппроксимации наблюдений: три рассеивающие дуги с углом при вершине 45° на фиксированных позиционных углах. Элементарные участки дуг поляризованы перпендикулярно направлению на звезду.

кривую блеска V CVn, построенную по данным AAVSO (Кафка, 2018). Обратите внимание, что поляризованные потоки дуг на этом рисунке нормированы на средний поток объекта, а не на его текущее значение. Это позволяет рассматривать характер переменности дуг независимо от переменности звезды.

Из рис. З следует, что когда звезда находится в минимуме блеска, дуга ССВ становится самой яркой, а по мере увеличения яркости звезды дуга ССВ ослабевает. Это приводит к возрастанию полной поляризации объекта при минимальной яркости. При этом дуги ЮЮВ и ЮЮЗ меняют свою яркость синхронно со звездой.

Эти особенности в первом приближении повторяются на всех трех наблюдавшихся циклах пульсаций. Впрочем, точного воспроизведения ожидать трудно, поскольку пульсации звезды не совсем регулярны. Например, в период между JD = 2458260 и JD = 2458440 практически отсутствовал выраженный минимум блеска. Доля поляризации оставалась меньше 2%. Различие в яркостях дуг в этот период было менее выражено, чем в предыдущий период, но общий характер изменения яркости дуг остался прежним.

ОБСУЖДЕНИЕ

Расстояние до V CVn составляет 1.27 ± 0.24 кпк (Gaia, 2018), причем звезда располагается довольно высоко над плоскостью Галактики: 1.17 ± 0.23 кпк. Видимое собственное движение V CVn $\mu_{\alpha} \cos \delta = -38.99 \pm 0.20$ мсд/год и $\mu_{\delta} = -11.77 \pm 0.21$ мсд/год, что соответствует тангенциальной скорости 251 км/с относительно Солнца. Лучевая скорость звезды при этом 4.7 км/с (Фомай и др., 2009), т.е. звезда движется почти перпендикулярно лучу зрения.

Звезда имеет погрешность определения параллакса 0.14 мсд, что в 3 раза больше, чем медиана распределения этой величины для звезд $G \approx 8.5$ (Линдегрен и др., 2018). Погрешность собственного движения также велика. Дополнительный шум астрометрии может быть вызван как хроматическими инструментальными эффектами, присущими данным Gaia, так и описанным в предыдущем разделе поведением оболочки звезды.

По данным Шарма и др. (2016) спектральный класс V CVn — M6III, а эффективная температура — 3180 ± 99 К. Светимость, соответствующая расстоянию, определенному Gaia, $3.6 \pm 1.5 \times 10^4 L_{\odot}$ (Макдональд и др., 2012). Вычисленный по этим данным радиус звезды $R_{\star} = 590 \pm 110 R_{\odot}$, что соответствует угловому радиусу 2.2 мсд на расстоянии объекта.

Характерный линейный размер найденной туманности 44 ± 10 а.е., что примерно в 10 раз больше, чем R_{\star} . Таким образом, наблюдаемый поляризованный поток образуется в околозвездной оболочке на значительном расстоянии от фотосферы. Резонно предположить, что эта оболочка порождена запыленным звездным ветром. Избыток излучения в среднем ИК-диапазоне (Прайс и др., 2010) и силикатная деталь на длине волны 9.7 мкм (Ольнон, 1986; Симпсон, 1991) также говорят в пользу наличия пылевой оболочки. Вместе с тем звезда имеет довольно малый избыток цвета: E(B - V) = 0.04 (Монтез и др., 2017), следовательно, эта оболочка не может быть сферическисимметричной.

Орбитальное движение могло бы быть наиболее простым объяснением колебаний блеска различных частей оболочки. Однако перемещение по

17 may 01 18 may 01 18 sep 01 19 jan 01 17 sep 01 18 jan 01 2.0 1.5 $F_{*}(550)$ $F_{\rm NNE}(550)$ 0.5 0.01 0 0.01 -200-1000 100 200 300 -400500 JD-2458000

Рис. 3. В верхней части рисунка даны индивидуальные визуальные оценки звездной величины из базы данных AAVSO, конвертированные в поток и нормированные на средний уровень (серые кружки). Толстой черной линией обозначено скользящее среднее потоков AAVSO. В нижней части рисунка столбики обозначают поляризованный поток от компонентов оболочки. Столбики, закрашенные серым цветом, белым цветом и диагональными линиями, соответствуют дугам ССВ, ЮЮВ и ЮЮЗ. Высота столбиков соответствует поляризованный) поток звезды. Высота отсчитывается от нулевого уровня вверх для дуги ССВ, вниз для дуг ЮЮВ и ЮЮЗ.

полукругу радиусом 44 а.е. за половину периода пульсаций звезды, который составляет $P \approx 194^{\rm d}$ (Самусь и др., 2017), требует скорости ≈ 2500 км/с. Эта величина гораздо больше, чем соответствующая орбитальная скорость (при массе звезды $M < 10 \ M_{\odot}$), поэтому такое объяснение не подходит, и мы рассмотрим другие варианты интерпретации наблюдаемых свойств найденной нами оболочки.

Гипотеза ударной волны

Нейлсон и др. (2014) предположили, что асимметричная пылевая оболочка могла возникнуть за ударной волной, которая образовалась на границе между звездным ветром и набегающим потоком межзвездного вещества. Расстояние между звездой и вершиной такой ударной волны определяется равенством напорных давлений звездного ветра и потока вещества (ван Бурен, МакКрей, 1988). Оценим, при какой концентрации межзвездного газа ударная волна будет располагаться на расстоянии ~40 а.е. от звезды.

Для этого нам понадобится темп потери массы в звездном ветре. Эту величину можно оценить по величине периода пульсаций P с использованием соотношения, предложенного Де Бек и др. (2010). В случае V CVn ожидаемый темп потери массы оказывается $\sim 2 \times 10^{-7} M_{\odot}$ /год.

Для оценки скорости звезды относительно межзвездной среды V_* мы выполнили коррекцию за дифференциальное вращение галактики и движения Солнца к апексу, используя кривую вращения мазеров, которая наиболее близка к кинематике газа (Расторгуев и др., 2017). Оказалось, что скорость звезды относительно локального стандарта покоя $V_* \approx 237$ км/с, а позиционный угол ее проекции на картинную плоскость 255° — это направление указано стрелкой на левой нижней панели рис. 1.

Подставляя величину V_* в уравнение (1) из работы ван Бурена и МакКрея (1988), получим следующее выражение, связывающее требуемую концентрацию межзвездного газа и скорость звездного ветра V_w :

$$n_{\rm H} = 490 V_{\rm w},$$
 (2)

где $V_{\rm w}$ выражается в км/с, а концентрация — в см⁻³. При скорости звездного ветра порядка несколько км/с, обычной для этого типа звезд, концентрация $n_{\rm H}$ должна быть $\sim 10^3$ см⁻³.

Но величина $n_{\rm H}$ на высоте 1.2 кпк над плоскостью Галактики составляет $\sim 3 \times 10^{-3}$ см⁻³ — "наилучшая оценка" из рис. 10 в работе (Дикей, Локман, 1990). В соответствии с картой нейтрального водорода, полученной Бен Бехти и др. (2016),



Рис. 4. Диаграммы цвет—поток для компонентов оболочки и для всего объекта. По оси абсцисс отложен поток в фильтре 550 нм, нормированный на средний полный поток в этом фильтре. По оси *OY* отложено отношение нормированных потоков в фильтрах 550 нм и 880 нм. Пустые кружки, квадраты и треугольники соответствуют дугам ССВ, ЮЮВ и ЮЮЗ. Заполненные кружки соответствуют объекту в целом, но практически характеризуют поведение звезды, поскольку она вносит в неполяризованный поток основной вклад. Для компонентов оболочки приведены поляризованные потоки, для всего объекта приведены полные потоки.

в направлении на V CVn нет молекулярных облаков. Мы приходим к выводу, что концентрация межзвездного газа в окрестности V CVn примерно на пять порядков меньше, чем необходимо для формирования ударной волны на расстоянии ~40 а.е. от звезды. Иными словами, ударная волна должна возникать на расстояниях, намного превышающих размер обнаруженной нами оболочки. Но изначально сферически-симметричный ветер звезды должен сохранять эту симметрию до области, где возникает ударная волна, поэтому в нашем случае взаимодействие ветра с окружающей средой не должно приводить к асимметрии пылевой оболочки и, тем более, переменности ее поверхностной яркости. Вероятнее, что форма оболочки обусловлена анизотропией истечения вещества из звезды.

Гипотеза светового эха

Тот факт, что блеск дуги ССВ достигает максимума через $\Delta t \sim 95^{\rm d}$ после максимума блеска звезды, может быть объяснен эффектом светового эха, как, например, у RS Рир (Кервелла и др., 2008). В этом случае дуга ССВ должна быть как минимум на $c\Delta t/2 \sim 8000$ а.е. дальше от нас, чем звезда. Характерный линейный размер соответствующего облака при этом может быть оценен как длина дуги ССВ: ≈40 а.е. Такое околозвездное облако перехватывает не больше чем $\approx 1.4 \times 10^{-6}$ излучения звезды. Какая-то доля этого излучения будет поглощена, а оставшееся будет рассеянно, в основном, вперед. Для наблюдателя облако будет видно в свете, рассеянном назад, как источник поляризованного потока минимум в ${\sim}10^6$ раз более слабый, чем звезда, или в $10^2 - 10^3$ раз более слабый, чем реально наблюдается (рис. 3, табл. 1). Следовательно, гипотеза светового эха не согласуется с наблюдаемой яркостью оболочки.

Гипотеза переменного затенения

Периодические изменения морфологии околозвездной оболочки могут быть вызваны тем, что внешние части оболочки частично закрыты от звезды внутренними частями этой же оболочки. При изменении радиуса звезды в процессе пульсаций характер экранирования в разных направлениях может меняться по-разному, в результате чего различные части оболочки будут по-разному менять свою яркость. Такое объяснение было предложено Кервелла и др. (2014) для полуправильной переменной звезды L₂ Pup с целью объяснить наблюдаемую корреляцию между движением фотоцентра и изменением блеска.

Если эта гипотеза применима к V CVn, то во внутренней части оболочки должна быть структура, отбрасывающая тень на дугу CCB во время максимума блеска звезды. Предполагая, что звезда достигает максимального размера в районе минимума блеска, можно ожидать, что гипотетическое затенение дуги CCB будет уменьшаться, и она будет становиться ярче.

Но в процессе пульсаций меняется и цвет (температура) звезды. Поэтому в рамках такого объяснения на диаграммах цвет—поток треки дуг ССВ и ЮЮВ/ЮЮЗ должны различаться: дуга ССВ по мере поярчания должна становиться более красной (звезда в минимуме), а дуги ЮЮВ/ЮЮЗ, напротив, должны становиться более синими, когда ярчают (звезда в максимуме).



Рис. 5. Схема объекта в модели с нерадиальными пульсациями (не в масштабе) в моменты, соответствующие максимальному (слева) и минимальному (справа) блеску звезды.

Между тем из рис. 4 следует, что цветовое поведение всех компонентов оболочки очень похоже и практически совпадает с цветовым поведением звезды: поярчание характеризуется более синими цветами. Таким образом, эту гипотезу мы также отвергаем. свидетельств существования дипольных мод, с амплитудой $\Delta V \approx 1.5^m$, у полуправильных переменных звезд найдено не было. Также такие пульсации не предсказываются теоретически (см. Моссер и др., 2013, и приведенные там ссылки). В связи с этим мы не настаиваем на этой интерпретации.

Гипотеза нерадиальных пульсаций звезды

Характер переменности дуги ССВ может быть естественным образом объяснен, если предположить, что с ее точки зрения пульсации звезды сдвинуты на половину периода по сравнению с пульсациями с точки зрения наблюдателя. При этом с точки зрения дуг ЮЮВ/ЮЮЗ пульсации выглядят также, как для наблюдателя. Соответствующая модель проиллюстрирована на рис. 5 и предполагает значительное отклонение пульсаций звезды от чисто радиальных, а точнее — наличие существенной дипольной компоненты.

В этой модели в максимуме блеска часть звезды, обращенная к наблюдателю и дугам ЮЮВ/ЮЮЗ, находится в ярком состоянии. В то же время противоположная сторона звезды, обращенная к дуге ССВ, ослаблена. Через полпериода пульсаций ситуация меняется на противоположную. Теперь звезда выглядит для наблюдателя слабой, а для дуги ССВ — яркой, вследствие чего последняя достигает максимума блеска. При этом вклад поляризованного излучения в полный поток от объекта возрастает. Формируется антикорреляция потока и степени поляризации.

Ранее Пател и др. (2008) привлекали нерадиальные пульсации как одно из возможных качественных объяснений необычной поляризационной переменности звезды V1497 Aql. Эта полуправильная переменная звезда иногда показывает изменения степени поляризации до 5% при сравнительно малых вариациях блеска ≈0.2^m. Однако надежных

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами представлены результаты наблюдений полуправильной переменной звезды V CVn методом дифференциальной спекл-поляриметрии на длинах волн 550, 625 и 880 нм. Мы нашли отражательную туманность в поляризованном свете, окружающую звезду на характерном расстоянии 35 мсд, что соответствует 44 а.е. на расстоянии объекта. Форма туманности значительно отклоняется от центральной симметрии: в ней отчетливо выделяются три области, расположенные к северо-северовостоку, юго-юго-востоку и юго-юго-западу от звезды. Асимметрия туманности приводит к постоянству угла поляризации и сравнительно высокой степени поляризации излучения объекта в целом.

Наблюдения в 20 дат, распределенных по трем периодам пульсаций, показывают, что различные области туманности меняют свой блеск с таким же периодом, как и звезда, но с различными задержками по фазе. В частности, северо-северовосточная область достигает максимума блеска, когда весь объект находится в минимуме. В это время вклад рассеянного и, следовательно, поляризованного излучения в полный поток объекта возрастает. Именно это обстоятельство приводит к наблюдаемой у V CVn антикорреляции между блеском и степенью поляризации.

Наши оценки показывают, что наблюдаемая асимметрия оболочки не может быть обусловлена взаимодействием звездного ветра с межзвездной средой, а скорее всего, вызвана анизотропией потери массы. Мы приводим аргументы в пользу того, что наблюдаемые вариации поверхностной яркости оболочки не могут быть объяснены ни орбитальным движением, ни эффектом светового эха или переменным затенением. Мы отмечаем, что все наблюдаемые особенности поведения пылевой оболочки V CVn можно объяснить, предположив, что пульсации звезды имеют заметно нерадиальный характер, хотя вопрос о реалистичности такого объяснения оставляем открытым.

Для построения убедительной модели объекта требуются новые наблюдения с угловым разрешением, меньшим чем его характерный размер: 35 мсд. Эти наблюдения могут быть выполнены на крупном телескопе, либо на длиннобазовом интерферометре. Например, может быть применена спекл-интерферометрия на 6-м телескопе БТА (Максимов и др., 2009), поляризационная интерферометрия на Subaru (Норрис и др., 2015), апертурный синтез на CHARA (тен Брюммелаар и др., 2009), LBTI (Скруцки и др., 2010). Ценность представляют как одиночные наблюдения, так и мониторинг с периодичностью ≈1 мес. Спектроскопический мониторинг также позволил бы приблизиться к пониманию физических условий в атмосфере этой звезды, например, проверить гипотезу о ее температурной неоднородности.

Мы благодарны сотрудникам КГО ГАИШ за помощь в проведении наблюдений, использованных в данной работе, а также рецензенту за замечания, которые позволили улучшить качество представления материала. В работе были использованы наблюдения из международной базы данных AAVSO. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 16-32-60065 (Б.С. Сафонов — наблюдения и обработка), 19-02-00611 (А.С. Расторгуев — интерпретация) и гранта Программы развития МГУ Ведущая научная школа "Физика звезд, релятивистских объектов и галактик" (А.В. Додин — интерпретация). Спекл-поляриметр 2.5-м телескопа создан при финансовой поддержке Программы развития МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бен Бехти и др. (N. Ben Bekhti, L. Floer, R. Keller, J. Kerp, D. Lenz, B. Winkel, J. Bailin, M.R. Calabretta, et al.), Astron. Astrophys. **594**, A116 (2016).
- 2. ван Бурен и МакКрей (D. van Buren and R. McCray), Astrophys. J. **329**, L93 (1988).
- 3. Де Бек и др. (E. De Beck, L. Decin, A. de Koter, K. Justtanont, T. Verhoelst, F. Kemper, and K.M. Menten), Astron. Astrophys. **523**, A18 (2010).
- 4. Дикей, Локман (J.M. Dickey and F.J. Lockman), Am. Rev. Astron. Astrophys. **28**, 215 (1990).
- 5. Кафка (S. Kafka), Наблюдения из международной базы данных AAVSO (2018).

- 6. Кервелла и др. (P. Kervella, A. Merand, L. Szabados, P. Fouqué, D. Bersier, E. Pompei, and D. Perrin), Astron. Astrophys. **480**, 167 (2008).
- 7. Кервелла и др. (Р. Kervella, M. Montarges, S.T. Ridgway, G. Perrin, O. Chesneau, S. Lacour, A. Chiavassa, X. Haubois, and A. Gallenne), Astron. Astrophys. **564**, A88 (2014).
- 8. Кларк (D. Clarke), *Stellar Polarimetry* (Вайнхайм: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010).
- 9. Коллаборация Gaia (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, et al.), Astron. Astrophys. **616**, A1 (2018).
- 10. Линдегрен и др. (L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, S. Klioner, U. Bastian, M. Ramos-Lerate, A. de Torres, H. Steidelm'uller, et al.), Astron. Astrophys. **616**, A2 (2018).
- 11. Макдональд и др. (I. McDonald, A.A. Zijlstra, and M.L. Boyer), MNRAS **427**, 343 (2012).
- 12. Максимов и др., Астрофиз. Бюлл. 64, 308 (2009).
- 13. Мартин и др. (D.C. Martin, M. Seibert, J.D. Neill, D. Schiminovich, K. Forster, R.M. Rich, B.Y. Welsh, B.F. Madore, et al.), Nature **448**, 780 (2007).
- 14. Монтез и др. (R. Montez Jr., S. Ramstedt, J.H. Kastner, W. Vlemmings, and E. Sanchez), Astrophys. J. **841**, 33 (2017).
- 15. Моссер и др. (B. Mosser, W.A. Dziembowski, K. Belkacem, M.J. Goupil, E. Michel, R. Samadi, I. Soszyński, M. Vrard, et al.), Astron. Astrophys. **559**, A137 (2013).
- 16. Неилсон и др. (H.R. Neilson, R. Ignace, B.J. Smith, G. Henson, and A.M. Adams), Astron. Astrophys. **568**, A88 (2014).
- 17. Норрис и др. (B.R.M. Norris, P.G. Tuthill, M.J. Ireland, S. Lacour, A.A. Zijlstra, F. Lykou, Th.M. Evans, P. Stewart, and T.R. Bedding), Nature **484**, 220 (2012).
- 18. Норрис и др. (B. Norris, G. Schworer, P. Tuthill, N. Jovanovic, O. Guyon, P. Stewart, and F. Martinache), MNRAS **447**, 2894 (2015).
- 19. Ольнон и др. (F.M. Olnon, E. Raimond, G. Neugebauer, R.J. van Duinen, H.J. Habing, H.H. Aumann, D.A. Beintema, N. Boggess, et al.), Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **65**, 607 (1986).
- 20. Пател и др. (M. Patel, R.D. Oudmaijer, J.S. Vink, J.E. Bjorkman, B. Davies, M.A.T. Groenewegen, A.S. Miroshnichenko, and J.C. Mottram), MNRAS **385**, 967 (2008).
- 21. Прайс и др. (S.D. Price, B.J. Smith, T.A. Kuchar, D.R. Mizuno, and K.E. Kraemer), Astrophys. J. Suppl. Ser. **190**, 203 (2010).
- 22. Расторгуев А.С., Уткин Н.Д., Заболотских М.В. и др., Астрофиз. Бюлл. **72**, 134 (2017).
- 23. Самусь Н.Н., Казаровец Е.В., Дурлевич О.В. и др., Астрон. журн. **94**, 87 (2017).
- 24. Сафонов Б.С., Лысенко П.А., Додин А.В., Письма в Астрон. журн. 43, 383 (2017) [В.S. Safonov, P.A. Lysenko, A.V. Dodin, Astron. Lett. 43, 344 (2017)].

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 45 № 7 2019

- 25. Сафонов и др. (B. Safonov, P. Lysenko, M. Goliguzova, and D. Cheryasov), MNRAS 484, 5129 (2019).
- 26. Серковски, Шоул (K. Serkowski and S.J. Shawl), Astron. J. **122**, 2017 (2001).
- 27. Симпсон (J.P. Simpson), Astrophys. J. **368**, 570 (1991).
- 28. Скруцки и др. (M.F. Skrutskie, T. Jones, P. Hinz, P. Garnavich, J. Wilson, M. Nelson, E. Solheid, O. Durney, et al.), Proc. SPIE 77353H (2010).
- 29. Татхилл и др. (P.G. Tuthill, C.A. Haniff, and J.E. Baldwin), MNRAS **306**, 353 (1999).
- 30. тен Брюммелаар и др. (Т.А. ten Brummelaar, H.A. McAlister, S.T. Ridgway, W.G. Bagnuolo, Jr., N.H. Turner, L. Sturmann, J. Sturmann, D.H. Berger, et al.), Astrophys. J. **628**, 453 (2005).
- Фомай и др. (В. Famaey, D. Pourbaix, A. Frankowski, S. van Eck, M. Mayor, S. Udry, and A. Jorissen), Astron. Astrophys. 498, 627 (2009).
- 32. Шарма и др. (K. Sharma, P. Prugniel, and H.P. Singh), Astron. Astrophys. **585**, A64 (2016).