

УДК 524.35-337

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ He-r-ЗВЕЗДЫ HD 37479 σ Ori E

© 2025 Ю. В. Глаголевский^{1*}, А. Ф. Назаренко¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 РоссияПоступила в редакцию 11 сентября 2023 года; после доработки 10 августа 2024 года;
принята к публикации 25 августа 2024 года

Структура магнитного поля HD 37479 соответствует структуре диполя, смещенного на значительную величину, $\Delta a = 0.2R_*$, вдоль оси и на величину $\Delta a = 0.05R_*$ поперек оси. В результате магнитное поле распределено по поверхности звезды крайне неравномерно. Максимальные величины среднего поверхностного магнитного поля оказываются равными $B_s = +2591$ и -7486 Гс. Именно в этих областях возникает максимальный ветер, а также примерно в этих же областях наблюдается максимальное содержание гелия. Вдоль магнитного экватора простирается облако разреженного газа, в котором формируются эмиссионные линии H α .

Ключевые слова: звезды: магнитное поле — звезды: химически пекулярные

1. ВВЕДЕНИЕ

По мере получения новых, более точных данных для магнитных звезд возникает возможность пересмотреть или уточнить их параметры и свойства. Иногда новые данные приводят к результатам, совершенно противоположным тем, которые были получены раньше. Наша задача в данном случае состоит в пересмотре структуры магнитного поля HD 37479 (σ Ori E) в связи с появлением новых, более точных измерений величин продольного магнитного поля B_e в разных фазах периода вращения Φ , выполненных в работе Oksala et al. (2012).

2. СВОЙСТВА HD 37479 И МОДЕЛИ ЕЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

2.1. Ранние исследования HD 37479

Звезда (He-r B2Vpe) изучалась многими авторами, основные результаты их исследований следующие.

1. В работе Walborn (1974) обнаружена переменность H α -эмиссии в спектре звезды HD 37479. Эта особенность представляет собой полосу типа Вольфа–Райе с максимальной шириной около 1800 км с^{-1} , которая заполняет глубокую абсорбцию H α и достигает максимальной интенсивности почти на 30% выше континуума.

2. В работе Walborn and Hesser (1976) исследована вариация интенсивности эмиссии H α

в звезде HD 37479, которая представляет собой двойную волну с двумя неравными максимумами, приходящимися на фазы $\Phi = 0.2$ и 0.7 . Слишком сильный разброс точек на графике в этой статье, к сожалению, не дает возможности точно описать это свойство. Положение этих максимумов по фазе совпадает с экстремумами магнитного поля $B_e = 0$ Гс (Landstreet and Borra, 1978) и с максимумами поля $B_e \approx -2$ и $+2.2$ кГс. Авторы делают вывод, что эмиссионные облака формируются на магнитном экваторе, хотя совершенно очевидно, что это происходит на полюсах. Когда случается максимум эмиссии H α , тогда возникает максимальная интенсивность линий гелия (это не так, см. раздел 3, п. 5). Лучевые скорости неинформативны, но переменность некоторых характеристик позволила предположить, что мы имеем дело с наклонным магнитным ротатором. Второй вывод состоит в том, что в $\Phi \approx 0$ и 0.4 плотность эмиссионного облака больше, поэтому блеск звезды в эти моменты минимальный, а номер последней наблюдаемой линии — максимальный, $n = 24$, что свидетельствует о низкой плотности (см. раздел 3, п. 3).

3. Landstreet and Borra (1978) впервые получили фазовую зависимость продольного магнитного поля $B_e(\Phi)$ для HD 37479, из которой видно, что B_e меняется примерно в пределах от -2300 до $+3100$ Гс с экстремумами на фазах $\Phi \approx 0.2$ и 0.8 . По мнению авторов работы, обнаружение переменного поля позволяет понять все явления HD 37479 на основе модели наклонного ротатора. Отмечается

*E-mail: glagol@sao.ru

уменьшение яркости поверхности звезды и признаки оболочки в фазе $\Phi = 0$ ($B_e = 0$ Гс), то есть на магнитном экваторе. Авторы предположили, что горячий газ может быть захвачен и «заперт» магнитосферой над магнитным экватором как в ловушке (в работе Walborn and Hesser (1976) предполагалось облако). По их утверждению гелий усилен в области магнитного экватора (однако это не так, см. раздел 3, п. 5). Максимум последнего номера наблюдаемой линии бальмеровской серии отмечается позднее, чем $B_e = 0$, то есть оболочка слегка смещена. Принимая модель наклонного ротатора, Landstreet and Borra (1978) отрицают предположение о бинарной модели с аккреционным диском или кольцом, предлагаемой другими авторами. Один момент, который они затрудняются объяснить, — это очень большие скорости, обнаруженные в эмиссии $H\alpha$. Наконец, отмечается, что обнаружение поля в HD 37479 подтверждает гипотезу Осмера и Петерсона (Osmer and Peterson, 1974) о том, что звезды, богатые гелием, являются более горячим продолжением звезд He-w. Эта модель также подробно обсуждалась в работах Groote and Hunger (1982), Nakajima (1985), Bolton et al. (1987). Таким образом, результаты, полученные в этой работе, в некоторых случаях совпадают с выводами Walborn and Hesser (1976).

4. Bohlender et al. (1987) получили несколько измерений магнитного поля, которые подтверждают измерения Landstreet and Borra (1978) и основные выводы этой работы. Действительно, звезда HD 37479 имеет переменный оболочечный спектр, наблюдаемый в высоких сериях бальмеровских линий, причем признаки оболочки появляются только в момент уменьшения блеска в фазе $\Phi = 0$. Авторы работы обращают внимание на то, что Kemp and Herman (1977) наблюдали в спектральных линиях C IV и Si IV сильную переменность и признаки присутствия ветра. Эмиссия в этих линиях не очевидна. Звезда также является нетепловым радиоисточником.

5. Short and Bolton (1994) для объяснения асимметрии наблюдаемой фазовой зависимости Ландстрита (Landstreet and Borra, 1978) предположили у HD 37479 структуру магнитного поля смещенного диполя. На кривой блеска тоже отмечаются две фазы уменьшения блеска, вызванные предположительно влиянием плотного облака околозвездного вещества (но в работе Landstreet and Borra (1978) предполагается пояс с малой плотностью, так как $n = 24$). Эти облака, наблюдаемые в фазах $\Phi = 0$ и 0.44, находятся на пересечении магнитного и вращательного экваторов. В этих фазах $B_e = 0$. Продолжительность предполагаемого затмения (это не так, см. раздел 3, п. 2) указывает на то, что одно облако простирается на 33° , другое на 47° . Облака должны быть очень тонкими (при предположении,

что они поглощают, а не вследствие изменения температуры и физических условий) в направлении, перпендикулярном экватору вращения (это не так, см. раздел 3, п. 1). Доплеровская ширина эмиссии $H\alpha$ почти постоянна в течение большей части периода вращения, поэтому газ должен присутствовать на максимальном радиальном расстоянии в широком диапазоне долгот. Авторы предполагают, что эмиссионное $H\alpha$ -вещество распределено в тонком диске.

6. В работе Townsend et al. (2005) анализируется модель жестко вращающейся магнитосферы¹ звезды HD 37479. Результат основывается на анализе фотометрии, спектроскопии и переменности магнитного поля в магнитоуправляемой околозвездной среде. Эта модель предсказывает накопление околозвездной плазмы в двух облаках (в области магнитного экватора, см. раздел 3, п. 2), находящихся на пересечениях магнитного и вращательного экваторов и вращающихся синхронно со звездой. Моделирование кривой блеска $u(\Phi)$, взятой из работы Hesser et al. (1977), выполнено в предположении, что фотометрическое изменение возникает вследствие разного поглощения в облаке в спектральных линиях в облаке и вокруг него. В облаке интенсивность спектральных линий сильнее. Модельная кривая хорошо соответствует наблюдениям. Хорошо объясняются зависимости падения блеска (поглощения) в моменты $\Phi = 0$ и 0.4. Одно очевидное несоответствие заключается в том, что модель RRM не может воспроизвести особенность излучения в $\Phi = 0.6$, во время которой звезда становится вдруг ярче. Однако, основываясь на том факте, что эта особенность явно отсутствует в вариациях цвета $u - b$ (Hesser et al., 1977), авторы полагают, что она может возникать из какой-то еще неизвестной фотосферной неоднородности, а не из околозвездного вещества.

7. Наша первая модель магнитного поля звезды HD 37479 также относится к ранним исследованиям. Она была построена в работе Glagolevskij (2012) с использованием «водородных» и «гелиевых» измерений магнитного поля, выполненных в работах Landstreet and Borra (1978) и Bohlender et al. (1987). Положительное свойство этих измерений заключается в том, что они не зависят от неравномерного распределения металлов по поверхности, в отличие от измерения линий металлов. Моделирование выполнено нашим стандартным способом в предположении, что структуры магнитного поля близки структуре теоретического магнитного диполя (Gerth and Glagolevskij, 2003). Большое количество результатов моделирования с помощью этой методики убедительно доказывают правильность данного предположения

¹RRM — rigidly rotating magnetosphere.

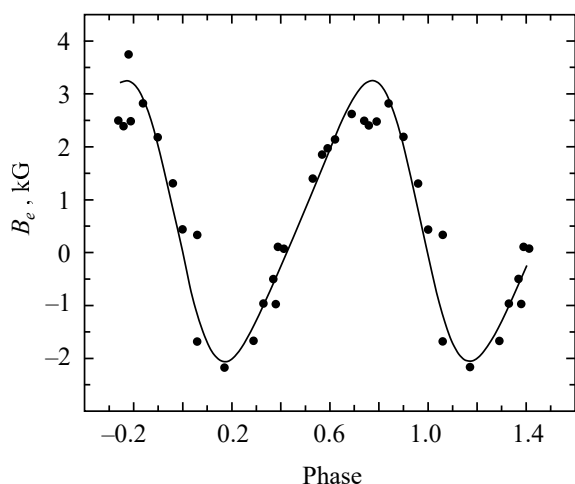


Рис. 1. Изменение магнитного поля B_e звезды HD 37479 с фазой периода вращения. Точки — наблюдения Landstreet and Borra (1978), сплошная кривая — модель DecD BL1 (Glagolevskij, 2012).

(Glagolevskij, 2013a; b). Такова природа магнитных полей химически пекулярных звезд. Как обычно, вначале была рассчитана модель, при которой диполь находится в центре звезды. Параметры этой модели приведены в таблице 1 в строке CD BL. Вычисленную фазовую зависимость не приводим, потому что она явно не синусоидальная и похожа на косозубую пилу. Далее методом последовательных приближений было найдено, что наблюдаемая фазовая зависимость лучше описывается с помощью модели смещенного поперек оси диполя. Параметры этой модели показаны в таблице 1 в строке DecD BL1. Модель строилась при угле наклона оси вращения $i = 84^\circ$, по оценке из работы Bohlender et al. (1987). Наблюдаемая фазовая зависимость (точки) и модельная (кривая) приведены на рис. 1. Одновременно вычисляется зависимость средней поверхностной величины магнитного поля $B_s(\Phi)$, по которой оценена средняя величина $B_s = 2679$ Гс и которая обычно используется при исследовании различных зависимостей. Максимальная и минимальная величины поля на поверхности, $B_p(\max) = -7486$ Гс и $B_p(\min) = +2591$ Гс, — важнейшие параметры при исследовании разного рода зависимостей. В таблице 1 даны также B_s , B_p и ΔA — смещение центра диполя поперек оси, Δa — смещение диполя вдоль оси, α — угол между осью диполя и плоскостью экватора вращения, i — угол наклона оси вращения звезды по отношению к наблюдателю. Диполь отстоит от центра звезды на величину $\Delta A \sim 0.20R_*$. Из рассмотрения таблицы видно, что различия параметров при предположении полученных двух вариантов значительны.

2.2. Моделирование по новым данным

Вторая модель построена нами в данной работе по результатам новых измерений из работы Oksala et al. (2012). Они сделаны со спектрополяриметром высокого разрешения с использованием мультилинейчатого анализа методом «of least-squares deconvolution» (LSD) (Donati et al., 1997), хотя были использованы только линии H β , He I λ 6678 и He I λ 5876. В итоге получили более точные величины продольного магнитного поля, чем это было возможно ранее. Тем не менее фазовые зависимости, построенные отдельно по измерениям линий H β , He I λ 6678 и He I λ 5876, показывают значительный разброс точек на зависимостях, поэтому мы использовали средние величины B_e по всем трем линиям. В отличие от «водородных» данных «гелиевые» измерения, как известно, могут быть искажены вследствие ветра на полюсах. Однако в рассматриваемом случае различие оказалось в пределах ошибок. Для вычисления модели необходимо знать угол наклона звезды к лучу зрения. Величина радиуса звезды $R = 4.41R_*$ взята из каталога Glagolevskij (2019), значение периода вращения $P = 1^d 19$ — из работы Townsend et al. (2005), в работе Glagolevskij (2017) приведено $v_e \sin i = 162$ км с $^{-1}$. На основании этих данных экваториальная скорость звезды $v = 50.6R/P = 187$ км с $^{-1}$, откуда $i = 60^\circ$.

На рис. 2а точками обозначена наблюдаемая зависимость $B_e(\Phi)$, линией проведена вычисленная модельная кривая. Форма новой фазовой зависимости имеет характерный вид, отличный от синусоиды и от кривой на рис. 1, что однозначно свидетельствует о структуре магнитного поля, отличающейся от структуры центрального диполя и структуры DecD BL1. В случае модели центрального диполя экстремумы отстояли бы на $\Delta\Phi = 0.5$, в нашем случае в начальных фазах $\Delta\Phi = 0.7$, а в последующих — $\Delta\Phi = 0.3$. В новой модели диполь оказался смещенным вдоль оси в сторону отрицательного монополя на значительную величину, $\Delta a = -0.25R_*$. Поэтому отрицательная полуволна $B_e(\Phi)$ острая, а положительная — тупая. Диполь оказался также слегка смещенным поперек оси на величину $\Delta A \approx 0.05R_*$. По этой причине положительная волна несимметрична и значительно деформирована. Рассмотрим рис. 6, взятый из работы Landstreet and Borra (1978). Здесь приведены зависимости $B_e(\Phi)$, полученные в этой работе (кривая 1) и в статье Oksala et al. (2012) (кривая 2). Хорошо видно различие зависимостей на фазе $\Phi = 0.3-0.4$, которое возникает вследствие того, что в этот момент через центр видимого диска проходит положительный магнитный полюс. В работе Short and Bolton (1994) тоже предполагалось, что

у HD 37479 структура магнитного поля соответствует смещенному диполю для объяснения асимметрии наблюдаемой фазовой зависимости Ландстрита (Landstreet and Vogga, 1978), что оказалось правильным. Параметры новой модели магнитного поля представлены в таблице 1 в строке DeCD O и таблице 2. На рис. 2b приведена вычисленная из модели зависимость среднего поверхностного магнитного поля $B_s(\Phi)$, из которой следует, что средняя величина $B_s = 2294$ Гс. Из-за несимметричной структуры магнитного поля положение экстремумов $B_s(\Phi)$ значительно отличается от положения экстремумов $B_e(\Phi)$, а расстояние между ними уже другое: в начальных фазах $\Delta\Phi = 0.35$, а в последующих $\Delta\Phi = 0.65$.

Подбор параметров при вычислениях проводился до тех пор, пока отличие наблюдаемых величин B_e от вычисленных оказывалось не более чем 3σ . Шаг моделирования для каждого параметра указан в таблице 2. На рис. 3 показана схема силовых линий внутри звезды в плоскости расположения диполя. Круг в центре — это область конвективного ядра, где полоидальное поле отсутствует. Вокруг круга, соответствующего краю звезды, указаны фазы, в которых центральный меридиан видимой полусферы проходит через центр диска. Вследствие сильного смещения диполя в сторону отрицательного монополя величина $B_{\max}(-)$ оказывается примерно в три раза сильнее $B_{\max}(+)$. Это важнейшее свойство звезды HD 37479, которое сильно влияет на ее физические свойства. Области, выделенные штриховой линией, соответствуют максимальной величине магнитного поля.

Сравним нашу модель с той, которая предложена Townsend et al. (2005). Эта модель тоже предсказывает смещение диполя как вдоль, так и поперек оси. Однако: 1) смещение центра диполя равно $0.3R_*$ поперек оси, 2) смещение центра диполя на величину $-0.05R_*$ происходит вдоль магнитной оси. Первое смещение вызывает различие плотности (блеска u) между двумя облаками, находящимися на пересечении экваторов. Второе смещение имеет небольшую величину, но его учет улучшает соответствие с магнитными измерениями (см. таблицу 1, модель RRM). В нашей модели DeCD O величины смещения значительно отличаются от тех, которые предсказываются этими авторами. Так, наиболее заметное влияние на физические свойства звезды оказывает сильное смещение диполя вдоль оси. В результате на поверхности возникает существенная неоднородность магнитного поля. Смещение поперек магнитной оси невелико, оно приводит в основном к асимметрии положительно-го максимума магнитного поля $B_e(\Phi)$ (рис. 2a).

2.3. Карта поверхности

Меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности приведена на рис. 4 (показаны линии равной напряженности магнитного поля). Жирной линией выделен магнитный экватор, в котором поле $B_{\text{equ}} = 0$ Гс. Как и предполагали ранние исследователи, он пересекает экватор вращения в двух фазах (Oksala et al., 2012; Short and Bolton, 1994; Townsend et al., 2005), в нашей модели это $\Phi = 0.07$ и 0.28 . Крайне неравномерное распределение магнитного поля по поверхности звезды вызывает затруднения при интерпретации ее физических свойств. Но важно иметь в виду, что фаза, в которой $B_e = 0$ Гс, оказывается несколько отличной от фазы $B_{\text{equ}} = 0$ Гс.

На рис. 5 приведены «глобусы» звезды с распределением магнитного поля HD 37479 в четырех интересующих нас фазах, а именно: в момент, когда $B_e = 0$ ($\Phi = 0.02$ и 0.4), в момент $B_e(-\text{max})$ ($\Phi = 0.2$), когда поле имеет максимальную отрицательную величину, и, соответственно, $B_e(+\text{max})$ в момент максимальной положительной величины ($\Phi = 0.8$). На схемах жирной линией показан магнитный экватор. Изображения представлены такими, какими звезда видна с экватора.

2.4. Магнитное поле на магнитном экваторе

Магнитное поле $B_e = 0$ проявляется в моменты $\Phi = 0$ и 0.4 (на магнитном экваторе). Это видно на рис. 6, взятом из работы Landstreet and Vogga (1978), из таблицы 3. Ослабление блеска в виде двойной волны с неравными максимумами происходит в этих же фазах (Walborn and Hesser, 1976). Делаем вывод, что эмиссионные облака формируются на магнитном экваторе.

В работе Short and Bolton (1994) обсуждается гипотеза, что ослабление блеска, наблюдаемое в фазах $\Phi = 0$ и 0.4 , вызывается экранированием плотного облака околосреднего вещества, находящегося на пересечении магнитного экватора и экватора вращения. Из рис. 4 видно, что это не отдельные облака, а разреженная плазма во всем магнитном поясе с $B_{\text{equ}} = 0$ Гс. Таким образом, звезда имеет переменный оболочечный спектр, формирующийся в этом поясе и наблюдаемый в бальмеровских линиях высоких порядков (здесь максимальный $n = 24$).

В работе Townsend et al. (2005) предполагается более реальный механизм, а именно сильное поглощение в спектральных линиях вследствие повышенного содержания химических элементов в магнитном экваторе.

В области пересечения с поверхностью силовые линии магнитного поля имеют вид колокола

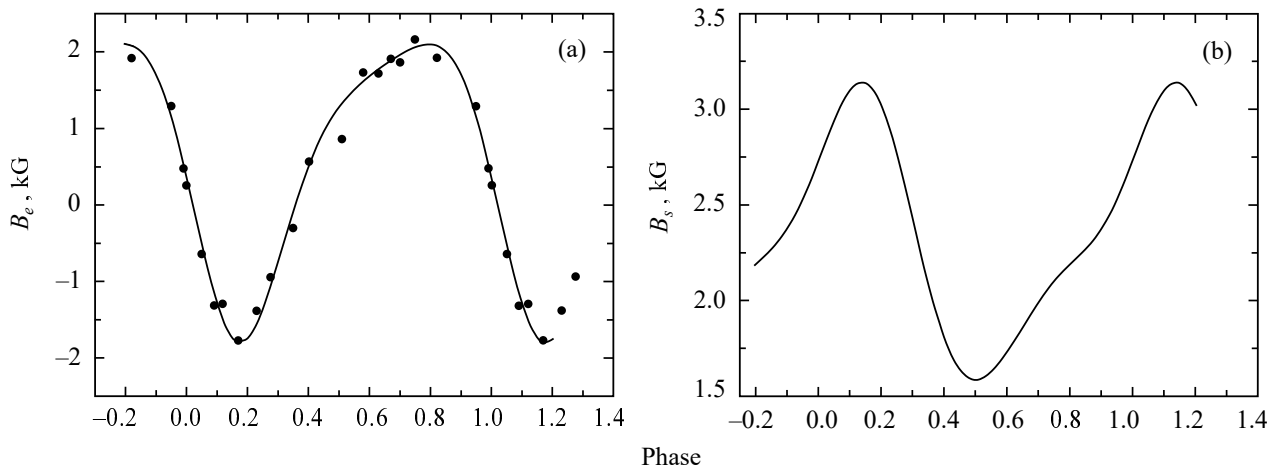


Рис. 2. Панель (a) — изменение магнитного поля B_e -звезды HD 37479 с фазой периода вращения. Точки — наблюдения Oksala et al. (2012), сплошная кривая — модель. Панель (b) — изменение магнитного поля B_s звезды HD 37479 с фазой периода вращения, зависимость получена из модели DecD O.

Таблица 1. Параметры рассмотренных моделей (подробнее см. в тексте)

Модель	B_s , Гс	B_p , Гс	ΔA относительно оси, R_*		α , град	i , град	Ссылка
			поперек	вдоль			
RRM	—	—	0.3	−0.05	55	75	[1]
CD BL ^a	2207	+3387; −3387	0	0	45	84	[2]
DecD BL1 ^a	4312	+7063; −7066	~0.20	0	55	84	[2]
DecD O ^b	2294	+2591; −7486	0.05	−0.2	28	60	[3]
DecD BL2 ^a	2737	+2927; −11 169	0.05	−0.25	55	—	[3]

[1] — Townsend et al. (2005), [2] — Glagolevskij (2012), [3] — эта работа, ^a — по данным Landstreet and Borra (1978) и Bohlender et al. (1987); ^b — по данным Oksala et al. (2012).

Таблица 2. Заданные модельные параметры монополя

Поле \pm шаг, кГс	+160 \pm 5	−160 \pm 5
Расстояние от центра звезды \pm шаг, R_*	−0.17 \pm 0.01	+0.29 \pm 0.01
Долгота \pm шаг, град.	200 \pm 1	43 \pm 1
Широта \pm шаг, град.	+28 \pm 1	−28 \pm 1

(рис. 3), силовые линии на небольшом участке проходят горизонтально относительно поверхности звезды, то есть поле здесь достаточно однородно. При таких условиях можно согласиться с Landstreet and Borra (1978), что магнитное поле способно создавать ловушку для ионов в полосе магнитного экватора, в результате чего содержание химических элементов здесь увеличивается.

Рассматривая рис. 5, мы видим, что картины распределения магнитного поля по поверхности в моменты $\Phi = 0$ и 0.4 (рис. 5b и 5c) примерно одинаковы, только с обратной симметрией относи-

тельно $\Phi = 0.2$ (рис. 5a). В этих фазах одинаковая величина продольного вектора магнитного поля — $B_e = 0$, но разная величина среднего поверхностного магнитного поля по видимой полусфере — $B_s = 2750$ Гс и 1750 Гс (рис. 2b). Такое поведение связано с сильной неравномерностью распределения магнитного поля по поверхности. Магнитное поле в точке поверхности может иметь одну величину, а интеграл по поверхности в той же фазе — другую. На рис. 5 показаны фазы, в которых точка с величиной магнитного поля $B_{\text{equ}} = 0$ Гс находится в центре диска звезды, — это примерно 0.05 и 0.25, в то время как в моменты $\Phi \sim 0.0$ и 0.4 поле имеет величину $B_e = 0$ Гс. Очевидно, и другие параметры, связанные с магнитным полем, будут вести себя сложным образом. Это различие возникает потому, что B_e определяется как интеграл по видимому диску при условии неравномерного распределения B_e , то есть истинное положение пояса несколько смещено относительно «измеряемого», оцениваемого из измерений B_e . Такая неравномерность влияет также на получаемые величины B_s , кото-

Таблица 3. Проявление свойств звезды HD 37479 в разных фазах периода вращения

№	Фаза											Свойства
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
1			×					×				B_{e1} (max)
2			×						×			B_{e2} (max)
3	×					×					×	$B_e = 0$
4	×				×						×	Блеск (min)
5			×					×				Блеск (max)
6			×					×				Эмиссия $H\alpha$
7	×					×					×	n (max)
8					×					×		He (max)
9				×					×			Ветер

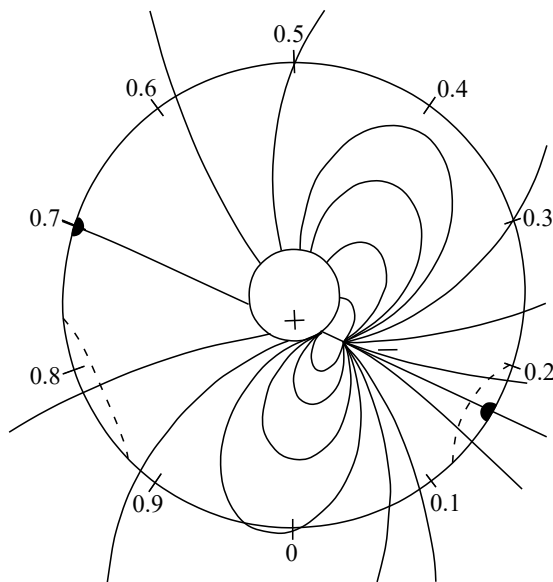


Рис. 3. Силовые линии магнитного поля в плоскости диполя. Числа по краю диска указывают фазу, в которой этот участок поверхности находится в центре видимого диска. Штриховыми линиями выделены области максимальных значений магнитного поля.

рые оцениваются в рассматриваемых фазах как $B_s \approx 3100$ Гс и 1600 Гс (рис. 2b). Не исключено, что по этой причине и возникают те несовпадения экстремумов величин u и n с фазами Φ нулевого поля B_e , которые наблюдаются на графиках рис. 6. При $\Phi = 0$ параметры u и n уверенно приходятся на магнитный экватор, а в момент $\Phi = 0.4$ такого четкого соответствия уже нет (рис. 6), потому что в этой фазе распределение магнитного поля становится размытым по поверхности и с меньшим градиентом по фазе (рис. 4).

2.5. Вариация интенсивности эмиссии

Вариация интенсивности эмиссии в $H\alpha$ у HD 37479 описывается двойной волной с двумя неравными максимумами, приходящими на фазы 0.2 и 0.7 (Walborn and Hesser, 1976), то есть эмиссия совпадает с положением максимальной величины магнитного поля. Здесь плотность больше ($n = \min = 16$), химический состав выше, блеск максимальный. Данная область находится близ магнитных полюсов (Walborn and Hesser, 1976). Авторы этой работы утверждают также, что когда случается максимум эмиссии $H\alpha$, тогда возникает максимальная величина W_λ He. Это неверно (см. рис. 6 и таблицу 3). Между этими явлениями существует сдвиг по фазе, который постоянен при вращении. Поэтому авторы предполагают, что происходит коротация эмиссионного пояса и гелиевого «пятна». Возможно, магнитное поле способствует этому. Поле было бы способно поддерживать такую жесткую конфигурацию. То, что магнитные звезды представляют собой жесткий ротатор, хорошо известно (Glagolevskij, 2020). На основании исследования звезд типа He-rich известно также, что He скапливается на магнитных полюсах, где сильнее ветер.

В работе Short and Bolton (1994) высказано предположение, что вещество, формирующее эмиссию $H\alpha$, распределено в тонком диске с большими ножевидными облаками (blade-shaped clouds). По их мнению, ветер из широкой области вокруг магнитного экватора направляется к нему под действием магнитного поля, где он сжимает газ в тонкий диск. Действительно, из рис. 3 видно, что силовые линии в области магнитного экватора выходят на поверхность звезды в виде колокола. Под действием ветра ионы могут двигаться вдоль силовых линий и скапливаться на поверхности.

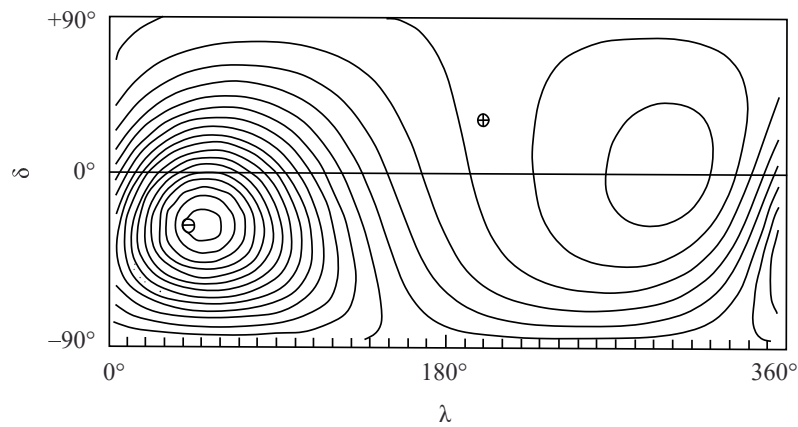


Рис. 4. Меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности HD 37479. Положение магнитного экватора $B_e = 0$ Гс отмечено жирной линией.

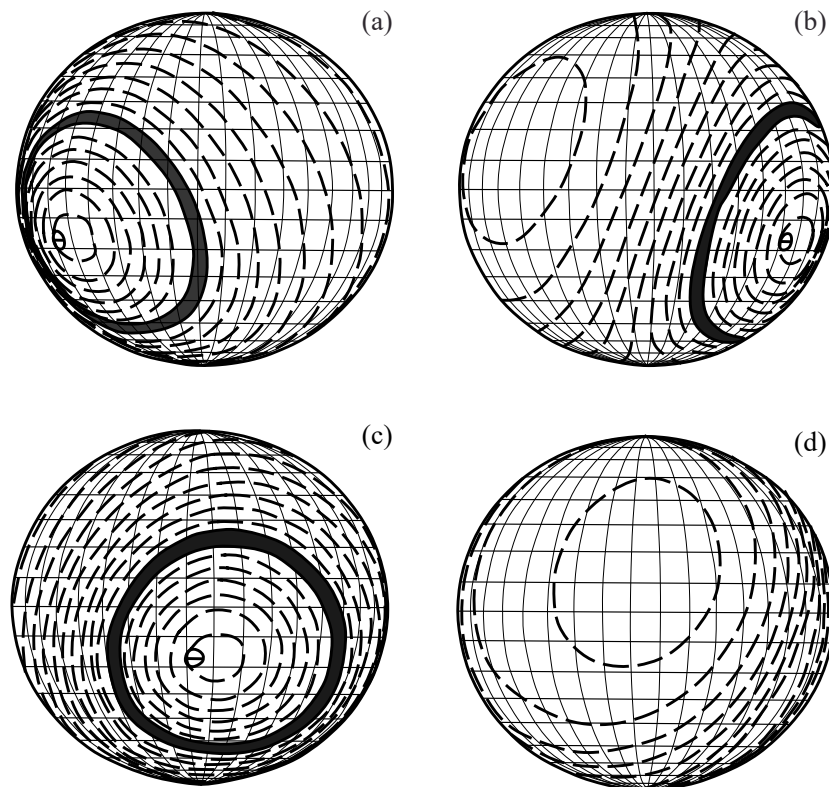


Рис. 5. Распределение магнитного поля по поверхности HD 37479 в разных фазах периода вращения: (a) — фаза 0.0, $B_e = 0$ Гс; (b) — фаза 0.35, $B_e = 0$ Гс; (c) — фаза 0.2, $B_e = (-\max)$; (d) — фаза 0.8, $B_e = (+\max)$. Положение магнитного экватора $B_e = 0$ Гс отмечено жирной линией.

Продолжительность уменьшения блеска указывает на то, что одно облако простирается на 33° , другое на 47° , то есть в широком поясе, а не в тонком слое. Фаза, в которой магнитное поле действительно равно 0, совсем не совпадает с фазой, когда $B_e = 0$, возникающего как интеграл по видимой полусфере с сильным градиентом магнитного поля по поверхности. Очевидно, что при построении моделей распределения физических свойств это надо учитывать.

В работе Bohlender et al. (1987) обсуждается поведение переменного shell-спектра HD 37479, наблюдаемого в высоких бальмеровских линиях, причем отмечается, что признаки оболочки появляются в момент уменьшения блеска в фазах $\Phi = 0$ и $\Phi = 0.4$. Авторы обращают также внимание на то, что Kemp and Herman (1977) наблюдали в спектральных линиях C IV и Si IV сильную переменность и признаки присутствия ветра, но эмиссия в этих линиях не очевидна. Обращаем внимание

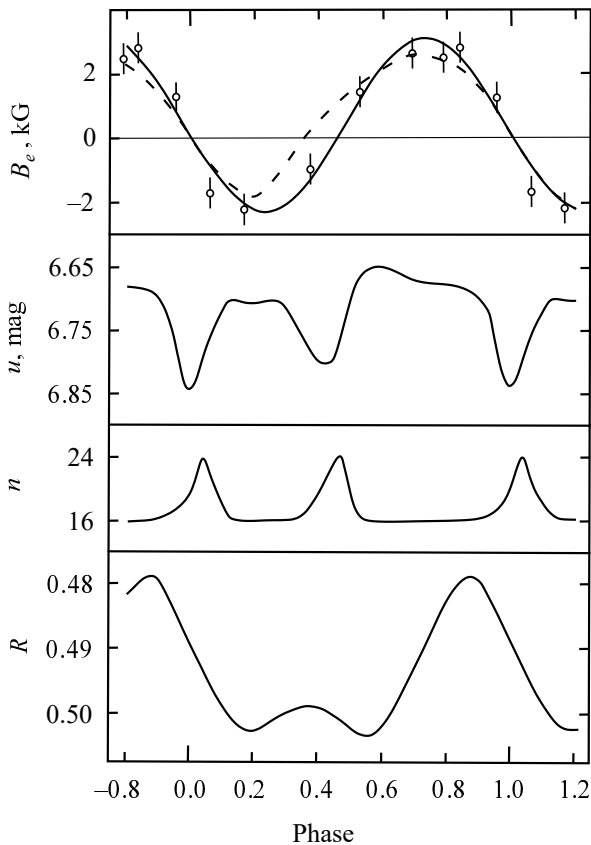


Рис. 6. Изменение параметров звезды HD 37479 с фазой периода вращения. Зависимости взяты из работы Landstreet and Borra (1978). Фазовая кривая $B_e(\Phi)$, проведенная штриховой линией, получена нами в данной работе.

на то, что они предполагают наличие ветра в районе магнитного экватора, а не на полюсах, как в магнитных He-r-звездах. Звезда также является нетепловым радиоисточником.

Посмотрим, как ведет себя эмиссионная магнитная O-звезда HD 37022 с $T_{\text{eff}} = 39\,350\text{ K}$ (Glagolevskij, 2024), то есть эта звезда много горячее. Структуры магнитного поля похожие — смещенный диполь. Эмиссия наблюдается в течение всего периода вращения, но в линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{He II } \lambda 4686$ она сильнее в $\Phi = 0$, в области магнитных полюсов, и слабее в экваториальной области. Ветер сильнее на магнитных полюсах. Эквивалентная ширина $\text{H}\alpha$ минимальна в $\Phi = 0$ и максимальна на магнитном экваторе. У HD 37022 плотность выше на экваторе. Таким образом, физические свойства около магнитного экватора и близ полюса у рассматриваемых звезд прямо противоположны. Основное различие между ними только в температуре и массе.

2.6. Переменность блеска

В работе Townsend et al. (2005) анализируется модель жестко вращающейся магнитосферы RRM звезды HD 37479. Авторы приняли модель, предложенную ранними авторами, в которой предсказывается накопление околозвездной плазмы в двух облаках, находящихся на пересечениях магнитного и вращательного экваторов и вращающихся синхронно со звездой. Таким образом, авторы снова возвращаются к модели облаков, хотя для этого нет оснований, как мы видели выше. На самом деле более реально предположение накопления околозвездной плазмы в магнитном поясе, где силовые линии расположены горизонтально поверхности и который пересекает экватор вращения в той же фазе, в которой предполагается облако (Landstreet and Borra, 1978). Тем не менее авторы выполнили моделирование кривой блеска $u(\Phi)$, взятой из работы Bohlender et al. (1987), в предположении, что фотометрическое изменение возникает вследствие разного общего поглощения в спектральных линиях в облаке (магнитном поясе $B_e = 0\text{ Гс}$) и вокруг него. В облаке (в $\Phi = 0$ и 0.4) интенсивность спектральных линий сильнее, яркость облака меньше по сравнению с окружающими областями. Естественно, в фазах $\Phi \sim 0.2$ и 0.7 блеск должен быть больше. Модельная кривая, полученная в этой работе, хорошо соответствует наблюдениям, то есть хорошо объясняются зависимости падения блеска звезды в момент $\Phi = 0$ и 0.4 . Только одно очевидное несоответствие заключается в том, что модель RRM не может воспроизвести особенность излучения при $\Phi = 0.6$, во время которой звезда становится вдруг ярче. Однако авторы обращают внимание на то, что она отсутствует в вариациях цвета $u - b$ (Hesser et al., 1977), то есть температура в этот момент не изменяется. В связи с этим делаем следующее важное замечание. На $\Phi = 0.7$ в центральном меридиане находится положительный магнитный полюс (см. рис. 3), и яркость, очевидно, вокруг него больше при той же температуре (Hesser et al., 1977), что и дает скачок блеска на зависимости $u(\Phi)$. Из результатов исследования He-r-звезд известно (Mestel, 1968), что ветер исходит преимущественно из магнитных полюсов, по всей видимости, это и связано с повышением яркости поверхности в этой области. На основании исследования профилей линий найдены две области сильного ветра, чьи центры находятся на $\Phi = 0.33$ и 0.85 (Groote and Hunger, 1982), что не вполне согласуется с положением магнитных полюсов.

2.7. Фотосферный ветер

Фотосферный ветер у HD 37479 исследовался в работе Groote and Hunger (1982), где приводится

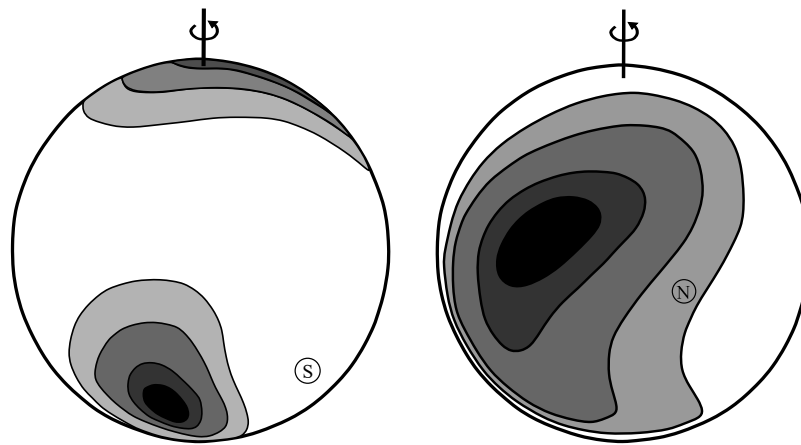


Рис. 7. Схема распределения источников ветра из работы Groote and Hunger (1997).

карта источников ветра, наблюдаемого на фазах 0.3 и 0.8. Эта карта показана на рис. 8. Левая схема очень похожа на наш рис. 5а, $\Phi = 0.35$. Ветер исходит из отрицательного магнитного полюса и области с максимальной напряженностью. Но положение магнитного полюса в работе Groote and Hunger (1982) совершенно не совпадает с нашей моделью. Правая схема тоже подобна рис. 5д, $\Phi = 0.8$, причем очевидно, что максимальный ветер исходит из обширной магнитной области со слабым, но максимальным в этом районе магнитным полем (рис. 6) и совершенно не связан с магнитным полюсом. Таким образом, магнитная структура звезды HD 37479 в работе Groote and Hunger (1982), очевидно, неверная.

2.8. Переменность интенсивности линии гелия

Соответствующие двухволновые вариации интенсивности излучения $\text{H}\alpha$ и поглощения $\text{He II } \lambda 4686$ в HD 37479 были изучены уже в работе Walborn and Hesser (1976). Они объясняются при предположении модели наклонного ротатора звезды. Замечание авторов состоит в том, что околозвездный газ, излучающий в линии $\text{H}\alpha$, должен находиться над пятнами, где усилен He. Это неверно, как следует из рис. 6 и таблицы 3. Эмиссия $\text{H}\alpha$ в звезде HD 37479 имеет максимум примерно на фазах $\Phi \sim 0$ и 0.4, то есть ее источник совпадает с положением «нулевого пояса», где плотность оболочки меньше ($n = \max = 24$), в то время как максимальная величина интенсивности линий He приходится на $\Phi = 0.35$ и 0.85 (рис. 6 и таблица 3). Совершенно определенно экстремумы гелиевой зависимости сдвинуты по фазе на величину $\Delta\Phi = +0.15$ и $+0.05$ относительно экстремумов магнитного поля B_e . Сильные линии гелия формируются в «положительном» полушарии со слабым полем, тогда как слабые линии тяготеют к сильному «отрицательному» полушарию, хотя

знак поля вряд ли играет какую-либо роль. Это непонятно, потому что содержание гелия пропорционально величине магнитного поля у He-г звезд (Glagolevskij, 2024). Следовало бы ожидать существования связи между величиной $W(\text{He})$ и n , но ее нет. Среди He-г звезд содержание гелия усиливается именно в магнитных полюсах вследствие усиления здесь ветра. Но у HD 37479 максимум интенсивности He не совпадает с положением магнитных полюсов, которые наблюдаются на $\Phi = 0.16$ и 0.7. Вероятно, ветер и увеличенное содержание гелия возникают в областях максимального магнитного поля. Эти области на рис. 3 обозначены штриховой линией. Очевидно, что следует уточнить зависимости $u(\Phi)$, $n(\Phi)$ и $R(\Phi)$ для получения более определенных выводов. На основании исследования профилей линий найдены две области сильного ветра (Groote and Hunger, 1982), центры которых находятся на $\Phi = 0.33$ и 0.85. Они примерно совпадают как с максимумами эквивалентных ширин He ($\Phi = 0.35$ и 0.85 (рис. 6)), так и с областями максимального поверхностного поля. В моделях работы Groote and Hunger (1982) положение магнитных полюсов на поверхности звезды не совпадает с нашими моделями.

2.9. Другие свойства

Посмотрим, каково место звезды HD 37479 среди объектов такого же типа пекулярности (He-г). Прежде всего это медленный ротатор, период вращения $P = 1^d 2$. На рис. 8 приведено распределение He-г звезд по величинам периодов вращения, где положение HD 37479 указано стрелкой. Скорость вращения несколько меньше предельной величины ($P = 1^d$), на которой He-г звезды исчезают. В результате медленного вращения в звезде возникает внутренняя динамическая стабильность, обеспечивающая сохранение

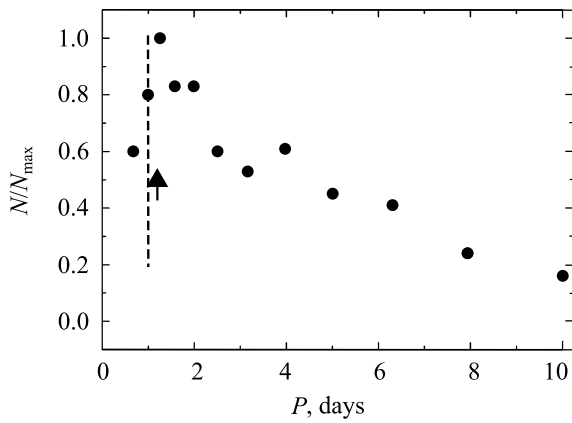


Рис. 8. Распределение He-г-звезд по периодам вращения. Стрелкой указано положение звезды HD 37479.

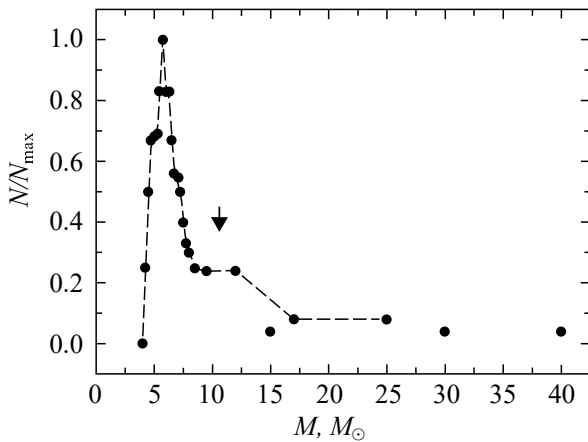


Рис. 9. Распределение He-г-звезд по массе. Стрелкой указано положение звезды HD 37479.

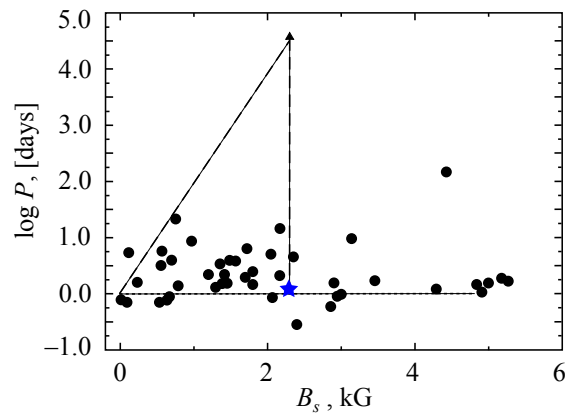


Рис. 10. Зависимость периодов вращения He-г-звезд от величины среднего поверхностного магнитного поля B_s . Звездочкой указано положение звезды HD 37479.

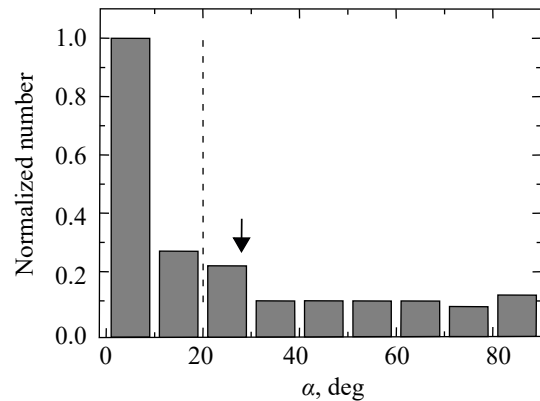


Рис. 11. Распределение He-г-звезд по углам наклона α . Стрелкой указано положение звезды HD 37479.

реликтового магнитного поля (Glagolevskij and Nazarenko, 2019).

На рис. 9 показано распределение He-г-звезд по массам (Glagolevskij, 2024), где положение HD 37479 указано стрелкой. Здесь тоже нет никаких особенностей. Величина среднего поверхностного магнитного поля B_s обычная для He-г-звезд (рис. 10).

Важнейший параметр магнитных звезд — угол наклона оси диполя к плоскости экватора вращения $\alpha = 28^\circ$ — оказывается несколько большей величиной, чем типичное значение $\alpha < 20^\circ$. Положение звезды указано стрелкой на рис. 11. Потеря момента вращения на ранних стадиях эволюции наиболее эффективна при $\alpha < 20^\circ$, но среди магнитных звезд часты случаи, когда малый момент вращения наблюдался уже на стадии магнитных протозвездных облаков. На зависимости «возраст — относительный радиус $\lg t(R/R_z)$ », где R/R_z — радиус звезды относительно ее радиуса на ZAMS (Glagolevskij, 2019)), звезда HD 37479

оказывается в области довольно старых объектов (рис. 12) (Glagolevskij, 2017; 2024). Таким образом, звезда HD 37479 является типичным объектом He-г-типа.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы сделаны на основании анализа полученных нами и другими авторами результатов, которые мы рассмотрели в этой работе.

1. Структура магнитного поля звезды HD 37479 отличается от структуры центрального диполя. Диполь оказывается смещенным вдоль оси в сторону отрицательного монополя на значительную величину: $\Delta a = -0.25 R_*$. Поэтому отрицательная полуволна $B_e(\Phi)$ острая, а положительная — тупая (рис. 2а). Диполь оказался также слегка смещенным поперек оси на величину $\Delta A \approx 0.05 R_*$. По этой причине положительная волна не симметричная, деформированная. Вследствие сильного смещения диполя в сторону отрицательного монополя

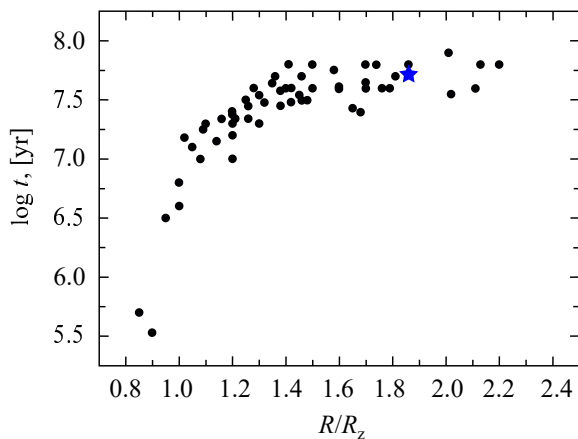


Рис. 12. Распределение He-г-звезд по возрастам. Звездочкой указано положение звезды HD 37479.

максимальные величины магнитного поля на поверхности $B_p(\text{max} -)$ оказываются почти в три раза сильнее $B_p(\text{max} +)$. Экстремумы B_e приходятся на $\Phi = 0.2$ и 0.7 (рис. 6 и таблица 3). В указанных фазах нет никаких совпадающих свойств на поверхности, кроме эмиссии. В таблице 3 показаны также другие свойства звезды, проявляющиеся в разных фазах, между которыми трудно найти связь. Сильное отклонение структуры от центрального диполя объясняется неравномерной плотностью родительского протозвездного облака.

2. Магнитное поле $B_e = 0$ наблюдается на магнитном экваторе и проявляется в фазах $\Phi = 0$ и 0.4 (Рис. 5а, b и Рис. 6), когда магнитный экватор оказывается в середине видимой полусферы. Распределение температуры по поверхности равномерное (Hesser et al., 1977), но в полосе экватора яркость поверхности меньше, потому что химический состав здесь богаче, поглощение в спектральных линиях сильнее. В результате при вращении звезды возникает фотометрическая переменность (рис. 6).

3. $\text{H}\alpha$ эмиссия наблюдается в фазах $\Phi \sim 0.2$ и 0.7 , то есть на магнитных полюсах (таблица 3). Это явление свидетельствует о наличии там разреженного облака, что подтверждает и уменьшенная величина последнего наблюдаемого номера линий водорода, $n = 16$, в соответствии с формулой Инглиса–Теллера: $\lg n_e = 23.26 - 7.5 \lg n_m$, где n_m — номер последней наблюдаемой бальмеровской линии, а n_e — электронная плотность атмосферы. Вариации интенсивности эмиссии в $\text{H}\alpha$ происходят с двойной волной (Walborn and Hesser, 1976) и двумя неравными максимумами, приходящимися на $\Phi = 0.2$ и 0.7 (большой максимум приходится на $\Phi = 0.2$). Очевидно, что положение эмиссионных областей совпадает с магнитными полюсами, где ветер должен быть сильнее (но ветер смещен по фазе).

4. Отсутствие вариации цвета $u - b$ с фазой периода вращения свидетельствует о равномерном распределении температуры по поверхности (Hesser et al., 1977).

5. Совершенно определенно экстремумы гелиевой зависимости сдвинуты по фазе относительно моментов $B_e(\text{max})$, они попадают на $\Phi = 0.35$ и 0.9 . Это значит, что гелий концентрируется не на магнитных полюсах, а в магнитном поясе.

6. Из таблицы 3 видно, что свойства 4–9 проявляются в момент максимального магнитного поля, то есть на магнитных полюсах. Свойства 2, 3, 5 и 6 происходят в области магнитного экватора.

7. В $\Phi = 0.3$ и 0.8 через центр видимого диска проходит источник ветра (Glagolevskij and Bychkov, 2023), но странно, что он не совпадает с магнитным полюсом. В $\Phi = 0.4$ через центр видимого диска проходит слабое пятно He. Поскольку содержание He пропорционально величине магнитного поля, непонятно, почему его концентрация не совпадает с магнитным полюсом. Так как диполь сильно смещен из центра звезды, то область с максимальным магнитным полем $B_p = -7486$ Гс проходит через центральный меридиан видимого диска в $\Phi = 0.2$. Другая такая же область на обратной стороне звезды имеет $B_p = +2591$ Гс в фазе $\Phi = 0.7$ (таблица 3). Точка с максимальной величиной $B_p(-)$ хорошо видна на рис. 4 и 5с, тогда как максимум $B_p(+)$ определяется неуверенно на рис. 4 и 5d. Содержание гелия не коррелирует с величиной магнитного поля, как у He-г-звезд (Glagolevskij and Bychkov, 2023).

8. На рис. 3 видно, что в районе магнитного экватора силовые линии направлены вблизи поверхности так, что ионы могут двигаться под действием радиации к поверхности и накапливаться там как в ловушке в слое, параллельном поверхности. Естественно, это приводит к обогащению химического состава.

9. В результате неравномерного распределения магнитного поля по поверхности величина среднего поверхностного магнитного поля B_s изменяется с фазой периода вращения сложным образом. Максимальные величины B_s приходятся на $\Phi = 0.1$, но с этим моментом никакие физические особенности не связаны.

10. Несмотря на сложное поведение свойств, рассмотренный в данной статье наблюдательный материал показывает, что изучаемые особенности возникают (происходят) не в двух одинаковых плотных облаках, как предполагали некоторые авторы, а в экваториальном магнитном поясе и близ магнитного полюса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет бюджета обсерватории.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. A. Bohlender, D. N. Brown, J. D. Landstreet, and I. B. Thompson, *Astrophys. J.* **323**, 325 (1987). DOI:10.1086/165830
2. C. T. Bolton, A. W. Fullerton, D. Bohlender, et al., *Proc. IAU Colloq.* No. 92, Ed. by A. Slettebak and T. P. Snow (Cambridge and New York, Cambridge University Press, 1987), p. 82.
3. J. F. Donati, M. Semel, B. D. Carter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **291** (4), 658 (1997). DOI:10.1093/mnras/291.4.658
4. E. Gerth and Y. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **56**, 25 (2003).
5. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **55** (2), 169 (2012). DOI:10.1007/s10511-012-9225-x
6. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **68** (1), 78 (2013a). DOI:10.1134/S1990341313010070
7. Y. V. Glagolevskij, *Astronomy Reports* **57** (1), 56 (2013b). DOI:10.1134/S1063772913010046
8. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **72** (4), 418 (2017). DOI:10.1134/S199034131704006X
9. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 66 (2019). DOI:10.1134/S1990341319010073
10. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **63** (3), 376 (2020). DOI:10.1007/s10511-020-09641-4
11. Y. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **79** (2), 260 (2024). DOI:10.1134/S1990341324600595
12. Y. V. Glagolevskij and V. D. Bychkov, *Astrophysical Bulletin* **78** (2), 165 (2023). DOI:10.1134/S1990341323020025
13. Y. V. Glagolevskij and A. F. Nazarenko, *Astrophysics* **62** (4), 491 (2019). DOI:10.1007/s10511-019-09598-z
14. D. Groote and K. Hunger, *Astron. and Astrophys.* **116**, 64 (1982).
15. J. E. Hesser, P. P. Ugarte, and H. Moreno, *Astrophys. J.* **216**, L31 (1977). DOI:10.1086/182503
16. J. C. Kemp and L. C. Herman, *Astrophys. J.* **218**, 770 (1977). DOI:10.1086/155733
17. J. D. Landstreet and E. F. Borra, *Astrophys. J.* **224**, L5 (1978). DOI:10.1086/182746
18. L. Mestel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **138**, 359 (1968). DOI:10.1093/mnras/138.3.359
19. R. Nakajima, *Astrophys. and Space Sci.* **116** (2), 285 (1985). DOI:10.1007/BF00653783
20. M. E. Oksala, G. A. Wade, R. H. D. Townsend, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **419** (2), 959 (2012). DOI:10.5281/zenodo.5563009
21. P. S. Osmer and D. M. Peterson, *Astrophys. J.* **187**, 117 (1974). DOI:10.1086/152597
22. C. I. Short and C. T. Bolton, *Proc. IAU Symp.* No. 162, Ed. by L. A. Balona, H. F. Henrichs, and J. M. Le Contel (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994), p. 171.
23. R. H. D. Townsend, S. P. Owocki, and D. Groote, *Astrophys. J.* **630** (1), L81 (2005). DOI:10.1086/462413
24. N. R. Walborn, *Astrophys. J.* **191**, L95 (1974). DOI:10.1086/181558
25. N. R. Walborn and J. E. Hesser, *Astrophys. J.* **205**, L87 (1976). DOI:10.1086/182096

Special Features of the Magnetic Field Structure of the He-r Star HD 37479 σ Ori E

Yu. V. Glagolevskij¹ and A. F. Nazarenko¹

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

The structure of the magnetic field of HD 37479 corresponds to the structure of a dipole displaced along the axis by a significant value $\Delta a = 0.2R_*$ and across the axis by the value $\Delta a = 0.05R_*$. As a result, the magnetic field is distributed extremely unevenly over the stellar surface. The maximum values of the average surface magnetic field are equal to $B_s = +2591$ and -7486 G. It is in these areas that the maximum wind occurs, and also in approximately these same areas the maximum helium abundance is observed. A cloud of rarefied gas extends along the magnetic equator, in which $H\alpha$ emission lines are formed.

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