

УДК 524.35-337

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗВЕЗДЫ HD 35298

© 2013 И. А. Якунин*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 19 марта 2013 года; принята в печать 27 марта 2013 года

По спектрополяриметрическим данным, полученным на 6-м телескопе, было выполнено исследование магнитного поля и физических параметров магнитной He-weak звезды HD 35298. Проведено сравнение результатов измерения магнитного поля различными методами. Магнитное поле звезды меняется в интервале от -3 до $+3$ кГс. В рамках модели наклонного ротатора объяснена геометрия поля. Полученная кривая изменения магнитного поля может быть описана центральным диполем с углом наклона оси диполя к оси вращения звезды $\beta = 60^\circ$ и индукцией поля на полюсе $B_p = 11.5$ кГс. Приведены данные о переменности спектральных линий некоторых металлов, позволяющие сделать предположение о том, что поверхность звезды является сильно запятненной.

Ключевые слова: *звёзды: химически пекулярные—звёзды: магнитное поле—звёзды: индивиду-альные: HD 35298*

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний момент Ar- и Vr-звёзды продолжают оставаться практически единственным надежным источником сведений, необходимых для понимания механизмов возникновения звездных магнитных полей и построения теории того, как магнитное поле эволюционирует во время жизни звезды на Главной последовательности.

Магнитные поля звезд спектральных классов OB (более $3 M_\odot$) качественно отличаются от полей холодных маломассивных (например, M-карлики) звезд. Структурно поля первых намного проще, а их величина зачастую намного выше. Большинство авторов, занимающихся данной проблемой, предполагают, что подобные характеристики свидетельствуют о том, что наблюдаемые поля не генерируются механизмом динамо внутри звезды, но, скорее всего, являются реликтовыми — медленно затухающими остатками поля, сжатого или возникшего на стадии формирования звезды (см., например, [1]). Реликтовая природа дает нам потенциальную возможность изучить то, каким образом магнитные поля влияют на эволюцию звезды и, в свою очередь, изменяются сами на протяжении всех стадий жизни звезды.

Для изучения механизмов генерации и эволюции звездных магнитных полей целесообразно в первую очередь рассматривать быстро эволюционирующие объекты — массивные звезды, обладающие сильными (более 1 кГс) магнитными полями. Сильные поля можно измерить относительно точнее

слабых, поэтому у объектов с сильными полями более реально выявлять систематические особенности, связанные с эволюцией. Поля могут быть разной структуры, что существенно затрудняет их обнаружение и правильное измерение величины у конкретных объектов.

Анализ имеющихся данных ([1]) приводит нас к выводу, что наиболее подходящими объектами для исследования эволюции звездных магнитных полей являются магнитные Vr-звезды. Выборка этих объектов уже достаточно большая, что позволяет проводить статистический анализ, а их сильные поля можно измерить относительно точно. Возраста Vr-звезд находятся в широких пределах: от нескольких миллионов до нескольких сотен миллионов лет. Периоды вращения различаются слабо, поэтому эффекты эволюции можно отличить от эффектов, связанных с вращением [1].

Измерение магнитных полей Vr-звезд представляет собой сложную методическую задачу. Их спектры, как правило, содержат малое количество линий, что существенно влияет на ошибку измерения поля традиционным способом — по сдвигу между противоположно поляризованными компонентами спектральной линии, величина которого зависит от величины магнитного поля звезды. Кроме того, часто линии имеют сложную форму, что затрудняет определение величины сдвига компонент.

Подобные трудности привели к тому, что кривые переменности продольного магнитного поля B_e для молодых звезд редко встречаются в литературе. Изучение изменения магнитного поля подобных звезд представляется особенно интересным потому, что все шесть известных звёзд со сложной,

*E-mail: elias@sao.ru

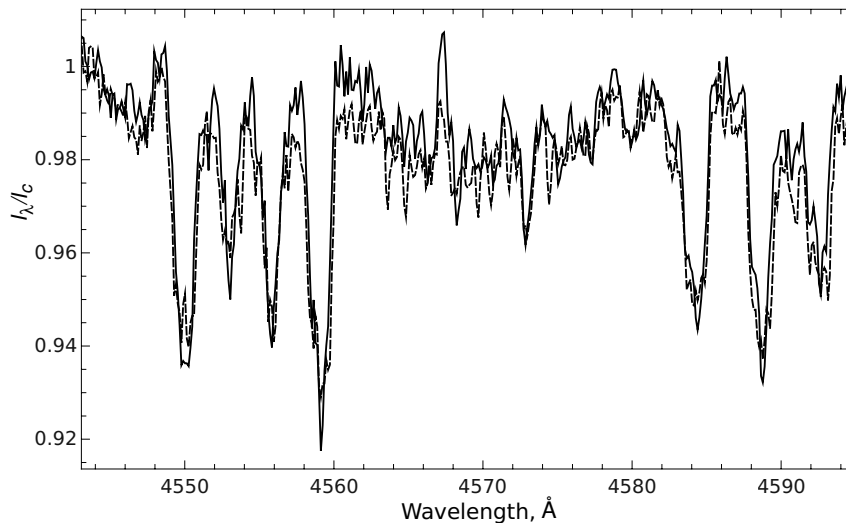


Рис. 1. Различные формы линий в ортогонально поляризованных спектрах.

отличной от синусоиды, магнитной кривой [1] являются молодыми объектами.

В звездной ассоциации Огi OB1 Борра [2] обнаружил более десяти магнитных звезд с сильными полями. Однако количество измерений магнитного поля каждой из них не позволяет построить кривые магнитного поля с фазой вращения. Нами был выбран один объект из списка [2] для подробного изучения — это звезда HD 35298.

2. HD 35298

Шарплессом [3] впервые было показано, что звезда HD 35298 является членом звездной ассоциации Огi OB1a ($\log t = 7.3$). Чиатти и Бернакка [4] впервые указали на то, что интенсивность линий гелия в звезде слаба даже по сравнению со спектральным классом B6. В то же время, присутствие линии углерода C II $\lambda 4267 \text{ \AA}$, исключает возможность принадлежности звезды к поздним B-классам. В результате, они определили ее спектральный класс, как B3 Vw. Норт [5] определил период звезды $P = 1^d 85336$. Им было показано, что фотометрическая кривая во всех полосах системы Стремгrena имеет характерную двойную волну. Адельман и Райс [6] пересмотрели период и нашли его новое значение $P = 1^d 85457$. Ключкова [7] по спектрам, полученным на БТА, определила параметры звезды: эффективная температура $T_{\text{eff}} = 18500 \text{ K}$, $\log g = 4.4$ и проекция скорости вращения на луч зрения $v \sin i = 57 \text{ км/с}$. В статье Глаголевского [8], посвященной определению эффективных температур химически пекулярных звезд, для HD 35298 приводится величина $T_{\text{eff}} = 15300 \text{ K}$.

Борра [2] впервые измерил магнитное поле, среднеквадратическое значение которого $\langle B_e \rangle = 2230 \pm 200 \text{ Гс}$. Среднее поверхностное поле, определенное Глаголевским [9] $B_s = 10.1 \text{ кГс}$. В каталоге магнитных звезд Романюка и Кудрявцева [10] значение экстремумов магнитного поля $B_e = -2810 / +2920 \text{ Гс}$.

В работе Ключковой [7] указано, что у HD 35298 наблюдается сильнейшее несоответствие непрерывного и линейчатого спектров, при этом она относится к подклассу Si II $\lambda 4200 \text{ \AA}$ с усиленными линиями металлов. Топильской [11] было оценено химическое содержание ряда элементов этой звезды, в Таблице 1 приведены результаты этой работы. Содержание указано в логарифмической шкале, причем для гелия указано абсолютное отношение $\log \left(\frac{N(\text{He})}{\Sigma N} \right)$, а для остальных элементов содержание дается относительно Солнца: $\log \left(\frac{N(\text{el})}{\Sigma N} \right)_* - \log \left(\frac{N(\text{el})}{\Sigma N} \right)_\odot$.

Таблица 1. Содержание химических элементов в звезде HD 35298 из работы [11]

Элемент	Содержание	$\pm \sigma$
He	-1.68	0.07
Mg	-0.63	—
Si	0.37	0.11
Fe	-0.14	—
Ca	-0.87	—

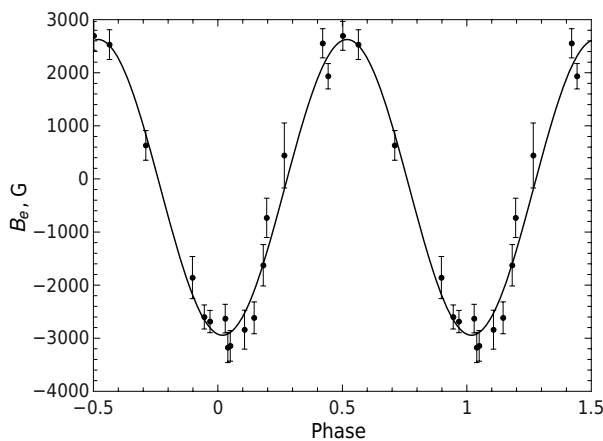


Рис. 2. Магнитное поле HD 35298, измеренное по сдвигам центров тяжести линий в разные фазы вращения. Сплошная кривая — результат аппроксимации данных гармонической функцией методом наименьших квадратов.

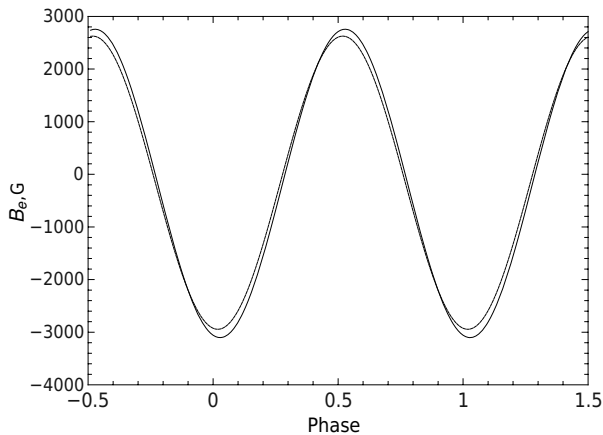


Рис. 4. Сравнение двух кривых. Сплошная кривая получена методом линейной регрессии, пунктирная — на основе сдвигов поляризованных компонент.

Используя фотометрические калибровки для химически пекулярных звезд Муна и Дворецкого [12], Ландстрит и др. [13] определили $\log T_{\text{eff}} = 4.201 \pm 0.02$ и $\log L/L_{\odot} = 2.36 \pm 0.1$.

Наблюдения звезды HD 35298 по программе “Магнитные поля массивных звезд” стартовали в САО в конце 2010 года.

3. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Наблюдения проводились с использованием Основного звездного спектрографа (ОЗСП) БТА [14], оснащенного анализатором круговой поляризации и резателем изображений [15]. В качестве детектора была использована ПЗС-камера

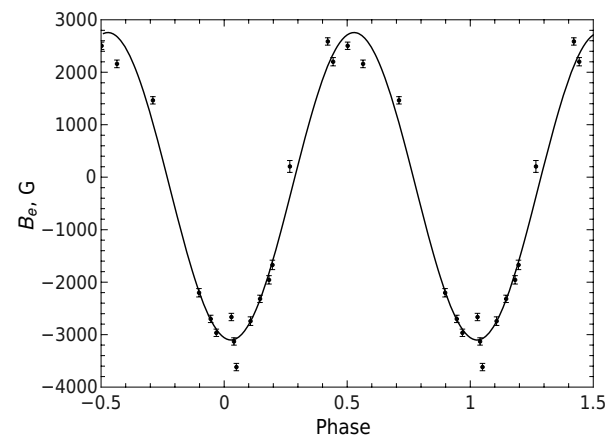


Рис. 3. Магнитная кривая, полученная на основе метода линейной регрессии.

2000×4600 px. Исследовался спектральный диапазон $\lambda\lambda 4385\text{--}4936 \text{ \AA}$. Выбор такого диапазона объясняется тем, что квантовая эффективность приемника максимальна в области $\lambda 4500 \text{ \AA}$, а также наличием линий нейтрального гелия и бальмеровской линии $H\beta$. Среднее спектральное разрешение составляет $R = 14\,000$. Для калибровки по длинам волн использовался спектр лампы ThAg. Первичная обработка данных проводилась при помощи контекста `zeeman` [16], написанного в среде ESO MIDAS.

Результаты измерения магнитного поля представлены в Таблице 2.

4. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Некоторые спектры этой звезды, полученные нами, обладают интересной особенностью: в некоторых фазах вращения одни и те же линии имеют различную форму в противоположно поляризованных спектрах (Рис. 1). Это может быть объяснено так называемым кроссовер-эффектом: если поле звезды дипольное, а угол наклона оси диполя к оси вращения звезды β близок к 90° , то в определенные фазы вращения наблюдатель будет видеть оба магнитных полюса одновременно, что искажает V и I параметры Стокса. Продольное магнитное поле в эту фазу должно быть близко к нулю.

Наличие подобного эффекта вкупе с малым количеством линий и их сложной формой существенно повышает ошибку измерения поля по зеемановским сдвигам, особенно если спектральная линия аппроксимируется функцией Гаусса. Для увеличения точности измерений сдвигов были найдены

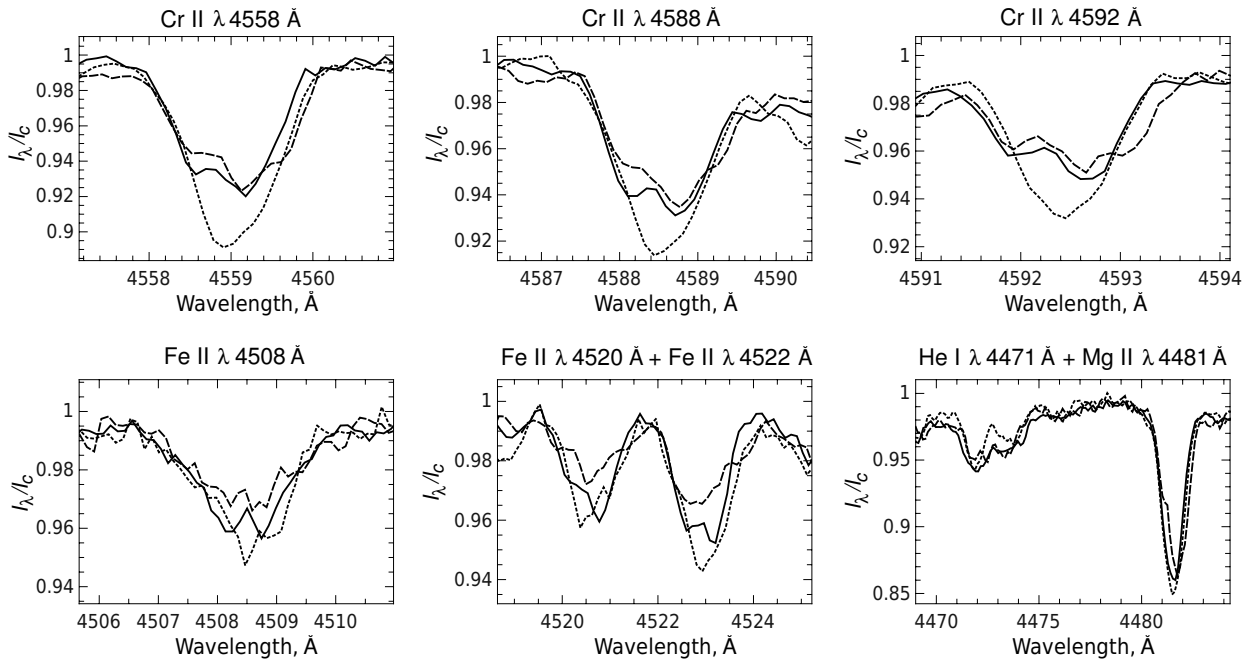


Рис. 5. Спектральная переменность линий металлов звезды HD 35298. Сплошная кривая — фаза положительного экстремума магнитного поля, пунктирная — нулевого, штрих-пунктирная — минимального экстремума.

центры тяжести каждой поляризованной компоненты линии. Поскольку определение центра тяжести линии менее чувствительно к ее форме, чем аппроксимация гауссианой, поля, измеренные таким образом, показывают большую стабильность. Рис. 2 показывает магнитную кривую, полученную по сдвигам центров тяжести спектральных линий.

Кроме этого, магнитное поле звезды было измерено методом линейной регрессии, подробно описанным в работе [17]. Суть метода заключается в том, что величина магнитного поля является коэффициентом пропорциональности в формуле

$$\frac{V}{I} = -g_{\text{eff}} C_z \lambda^2 \frac{1}{I} \frac{dI}{d\lambda} \langle B_z \rangle,$$

где g_{eff} — эффективный фактор Ланде, V — параметр Стокса, I — интенсивность спектра, λ — длина волны в ангстремах, $\langle B_z \rangle$ — среднее продольное магнитное поле в гауссах.

Магнитная кривая, полученная с помощью метода линейной регрессии, представлена на Рис. 3.

Обе кривые, полученные аппроксимацией функцией синуса, имеют хорошее соответствие (см. Рис. 4).

Если независимо определить угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения, то можно восстановить конфигурацию магнитного поля в рамках модели наклонного ротатора. Воспользовавшись

формулой

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \frac{P \times v \sin i}{50.6 \sin i}$$

и значениями температуры и светимости, взятыми из [13], мы получили значение $i = 65 \pm 5^{\circ}$. Учитывая наличие кроссовер-эффекта, угол β должен быть около 90° . При помощи программы FLDCURV, написанной Джоном Ландстриром, нами был рассчитана сетка кривых изменения продольной компоненты магнитного поля с фазой вращения для

Таблица 2. Данные о магнитном поле HD 35298

HJD	$B_e \pm \sigma$, Гс	HJD	$B_e \pm \sigma$, Гс
2450000+		2450000+	
5554.300	-3145 ± 288	5843.595	-3175 ± 284
5582.390	-733 ± 370	5873.532	-1626 ± 390
5583.344	632 ± 280	5962.268	-2631 ± 270
5584.376	442 ± 612	5963.260	2530 ± 280
5841.565	-2600 ± 227	5964.338	-2616 ± 300
5842.447	2555 ± 275	6177.542	-2839 ± 367
5842.597	2695 ± 272	6198.565	1934 ± 239
5843.462	-2686 ± 210	6223.518	-1858 ± 397

разных значений углов i и β в предположении центрального дипольного поля. Наилучшее соответствие наблюдаемой и расчетной кривых наблюдается при значении параметров $i = 60^\circ$ и $\beta = 95^\circ$. Магнитное поле представляет собой центральный диполь со значением магнитного поля на полюсе $B_p = 11\,500$ Гс. Поверхностное магнитное поле при этом меняется в пределах $B_s = 7380/8770$ Гс.

5. СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ

Несмотря на то, что модель наклонного ротора хорошо описывает изменение продольной компоненты магнитного поля, более детальное рассмотрение спектра ставит под вопрос правильность такого упрощения. Спектральные линии практически всех металлов чаще всего имеют сложный профиль, различную интенсивность, в некоторых фазах периода вращения ядра линий имеют два минимума. Мы считаем, что такая картина переменности спектральных линий может говорить о том, что поверхность звезды весьма неоднородна по распределению химических элементов, которые собираются в пятна. С другой стороны, подобное поведение невозможно описать только эффектами магнитного поля, так как расщепление линий слишком сильно даже для линий с малым фактором Ланде. Например, изменение линии железа $\lambda 4508 \text{ \AA}$, фактор Ланде которой равен $z = 0.5$, показано на Рис. 5, хотя, по формуле Бэбкока, расщепление для 10 кГс поверхностного поля должно быть равно всего 0.05 \AA .

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами было обнаружено, что звезда HD 35298 имеет сильное магнитное поле, продольный компонент B_e которого меняется от -3 до $+3$ кГс с периодом вращения $P = 1^d 85457$. В первом приближении магнитное поле имеет конфигурацию центрального диполя с индукцией поля на полюсе $B_p = 11.5$ кГс. Распределение химических элементов по поверхности крайне неоднородно.

Подобная запятненность позволяет предполагать, что топология магнитного поля звезды заметно отличается от дипольной. На сегодняшний день разработаны и широко используются техники, позволяющие восстанавливать распределение пятен и магнитного поля по поверхности звезды. HD 35298

кажется нам отличным кандидатом для подобного рода анализа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит И. И. Романюка за общее научное руководство работой, Д. О. Кудрявцева и Е. А. Семенко за получение части наблюдательного материала и консультации в использовании программ, Г. А. Чунтонова за помощь в наблюдениях и подготовке аппаратуры. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты 12-02-0009-а и 12-02-31246-мол-а). Наблюдения на 6-м телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. I. Romanyuk and I. A. Yakunin, *Astrophysical Bulletin* **67**, 177 (2012).
2. E. F. Borra, *Astrophys. J.* **249**, L39 (1981).
3. S. Sharpless, *Astrophys. J.* **116**, 251 (1952).
4. P. L. Bernacca and F. Ciatti, *Astronom. and Astrophys.* **19**, 482 (1972).
5. P. North, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **55**, 259 (1984).
6. S. J. Adelman and R. H. Rice, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **136**, 111 (1999).
7. В. Г. Ключкова, Письма в АЖ **11**, 502 (1975).
8. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **38**, 152 (1994).
9. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysical Bulletin* **62**, 244 (2007).
10. I. I. Romanyuk and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **63**, 139 (2008).
11. G. P. Topil'skaya, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 52 (1993).
12. T. T. Moon and M. M. Dworetzky, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **217**, 305 (1985).
13. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, V. Andretta, et al., *Astronom. and Astrophys.* **470**, 685 (2007).
14. V. E. Panchuk, SAO Technical Report, No. 258 (SAO RAS, Nizhniy Arkhyz, 1998).
15. G. A. Chountonov, in *Proc. Int. Conf. on Magnetic Stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij, D. O. Kudryavtsev, and I. I. Romanyuk (SAO RAS, Nizhniy Arkhyz, 2004).
16. D. O. Kudryavtsev, *Baltic Astronomy* **9**, 649 (2000).
17. S. Bagnulo, T. Szeifert, G. A. Wade, et al., *Astronom. and Astrophys.* **389**, 191 (2002).

Magnetic Field Measurement of Star HD 35298**I. A. Yakunin**

Based on the spectropolarimetric data obtained at the 6-m telescope, a study of the magnetic field and physical parameters of the magnetic He-weak star HD 35298 was performed. A comparison of the results of magnetic field measurements by various methods has been carried out. The star's magnetic field varies in the range from -3 to $+3$ kG. The field geometry is explained in the framework of the oblique rotator model. The obtained magnetic field variation curve can be described by a central dipole with the dipole axis inclined to the axis of rotation by $\beta = 60^\circ$, and the magnetic field strength at the pole of $B_p = 11.5$ kG. The data on the variability of spectral lines of some metals are presented, allowing to make an assumption that the stellar surface is heavily spotted.

Keywords: *stars: chemically peculiar—stars: magnetic field—stars: the individual: HD 35298*