

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ЗВЕЗДЫ HD 215441. I

Ю. В. Глаголевский, К. И. Козлова, Р. Н. Кумайгородская,
В. С. Лебедев, И. И. Романюк, Н. М. Чунакова

Изучены 4 спектра магнитной звезды HD 215441, полученные с зеемановским анализатором круговой поляризации на 6-метровом телескопе (дисперсия $9 \text{ \AA}/\text{мм}$) в фазе 0.87. Вычислены угол наклона оси вращения к лучу зрения $i=20^\circ$ и угол между осью вращения и осью диполя $\beta=10^\circ$ с помощью измеренных профилей σ - и π -компонент. При вычислениях теоретических профилей линий использовался метод Унно. На основании известного периода вращения $P=9^d5$ и $v \sin i=4 \text{ км/с}$ определен $i=18^\circ$. Найдено, что магнитное поле хорошо представляется центральным диполем. Величина поверхностного магнитного поля $H_s=36.0 \text{ кГс}$. По измеренным [профилям H_γ с помощью теоретических профилей Михаласа [10] определена эффективная температура $T_e=15\,000 \text{ К}$ и $\lg g=4.0$. По кривой роста, построенной по линиям Ti II, Fe II и Cr II, оценена $T_e=17\,600 \text{ К}$. Средняя величина T_e , выведенная из наших оценок и литературных данных, равна $T_e=14\,600 \text{ К}$. Сделан вывод о необходимости дальнейшего детального исследования этой звезды.

Four spectra (dispersion $9 \text{ \AA}/\text{mm}$) of the magnetic star HD 215441 obtained on the 6-meter telescope with the Zeeman analyzer is studied in phase 0.87. The inclination angle between the rotational axis and the line of sight $i=20^\circ$, and the angle between the rotational axis and the dipole axis of magnetic field $\beta=10^\circ$ are calculated with the help of the measured intensities of σ - and π -components. The theoretical intensities are calculated with the Unno method. On the basis of the known rotational period $P=9^d5$ and $v \sin i=4 \text{ km/s}$ we have determined $i=18^\circ$. It has been found, that the magnetic field is well represented by the central dipole. The surface field value is $H_s=36.0 \text{ kGs}$. With the help of the measured profiles of H_γ and the theoretical profiles from [10] $T_e=15\,000 \text{ K}$ and $\lg g=4.0$ have been determined. From the curve of growth constructed using Fe, Ti, Cr lines $T_e=17\,600 \text{ K}$ is found. The average effective temperature deduced from our calculations and from the literature data is $T_e=14\,600 \text{ K}$. An inference has been made on the necessity of further more careful investigation of this star.

Звезда HD 215441 имеет самое большое магнитное поле из всех известных Ар-звезд [1], равное 34 кГс . Вследствие сильного поля большинство линий расщепляется на зеемановские компоненты, причем уверенно выделяются как σ , так и π -компоненты. Это указывает на то, что поле не является чисто продольным.

Престон [2] обнаружил переменность поверхностного поля H_s , которая происходит синхронно с переменностью блеска. Изменения H_s заключаются в пределах $32\text{--}34.5 \text{ кГс}$. Расчеты показали, что поле не является чисто дипольным.

Борра и Ландстрит [3] изучили переменность продольной составляющей магнитного поля (H_e) по измерениям на фотоэлектрическом H_e -поляриметре. Оказалось, что H_e изменяется почти синусоидально от 20.6 до 10.9 кГс . Расчеты показали, что поле нельзя представить центральным диполем, а используемая модель смещенного диполя недостаточно хорошо описывает переменность H_e . Применение авторами [3] симметричного ротатора, предложенного Краузе [4] и Эткен [5], также не дало им возможности объяснить изменения магнитного поля у HD 215441.

Таким образом, модель магнитного поля звезды HD 215441 до сих пор не определена, а вследствие уникального большого значения магнитного поля детальное изучение звезды совершенно необходимо. В ее атмосфере с большой вероятностью можно обнаружить явления, зависящие от магнитного поля.

Звезда HD 215441 для спектроскопии высокого разрешения довольно слаба (8^m7), поэтому даже на 6-метровом телескопе зеемановские спектры можно получать преимущественно с обратной дисперсией не лучше $9 \text{ \AA}/\text{мм}$. С целью подробного изучения магнитного поля этой звезды нами начаты систематические наблюдения ее на Основном звездном спектрографе 6-метрового телескопа. В данной работе приводятся только первые полученные нами результаты, основанные на изучении 4 спектров в фазе 0.87.

Важнейшими параметрами, необходимыми для дальнейших исследований, являются эффективная температура T_e , ускорение силы тяжести $\lg g$, угол наклона оси вращения к лучу зрения i и угол между осью диполя и осью вращения β .

Температура звезды HD 215441.

Сведения о температуре звезды (или спектральном классе Sp) весьма противоречивы. Осава [6] оценивает Sp по

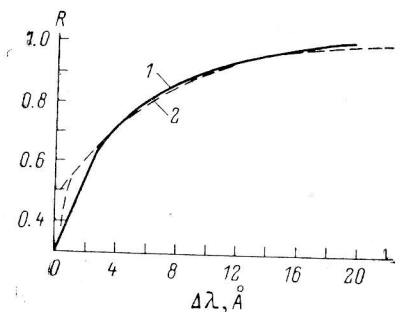


Рис. 1. Сравнение наблюдаемого (1) и теоретического (2) профилей линии H_γ для звезды HD 215441.

линиям гелия как B8, по линиям водорода — B7, по линиям KCa II — B9. Известно, что спектральный класс, полученный по линиям водорода для пекулярных звезд, является наиболее близким к истинному [7], тогда Sp-B7 соответствует $T_e=14\ 000 \text{ K}$. Престон [2] оценивает приближенно Sp-B4 ($T_e=16\ 000 \text{ K}$) по отношению интенсивностей линий Si II $\lambda\ 4130$ /Si III $\lambda\ 4552$. Камерон [8] нашел по C_1 -индексу близкое к этому значению Sp-B3 ($T_e=17\ 000 \text{ K}$). И, наконец, Лекрон [9] определил с помощью ультрафиолетовой фотометрии $T_e=14\ 500 \text{ K}$.

Мы определили T_e по профилям водородной линии H_γ . Для этого измерялись три спектрограммы с дисперсией $9 \text{ \AA}/\text{мм}$ и десять спектрограмм с дисперсией $28 \text{ \AA}/\text{мм}$, полученные 12.11.76 и 22.01.78 соответственно. Контуры H_γ , измеренные по спектрам с разной дисперсией, немного различаются, главным образом в средних частях, несмотря на близость фаз (0.87 и 0.68 соответственно). Это различие происходит, по-видимому, из-за неуверенности проведения непрерывного спектра при использовании низкой дисперсии и фотометрических ошибок. Для определения T_e использовались теоретические контуры, вычисленные Михаласом [10]. Оказалось, что контур H_γ , измеренный по спектрам с большой дисперсией, лучше всего соответствует теоретическому при $T_e=15\ 000 \text{ K}$ и $\lg g=4.0$ (рис. 1), а применение профилей, измеренных по спектрам с дисперсией $28 \text{ \AA}/\text{мм}$, дает $T_e=17\ 000 \text{ K}$ и $\lg g=4.0$. Можно считать более надежным первое определение T_e , полученное с использованием большой дисперсии. Кроме того, наблюдаемые профили в первом случае согласуются с теоретическими лучше, чем во втором.

С помощью метода кривых роста нами определены температуры возбуждения и ионизации (T_v и T_n). Трудность использования этого метода связана с тем, что большинство спектральных линий расщеплены на зеемановские компоненты, следовательно, механизм поглощения в атмосфере может быть другим. Для частичного уменьшения этого эффекта кривая роста строилась только по более интенсивным σ -компонентам.

Сводка оценок T_e звезды HD 215441

Способ	T_e , 10^3 К	Автор
Линии гелия	12	Осава [6]
Линия KCa II	11	»
Линии водорода	14	»
Si II/Si III	16	Престон [2]
Индекс C_1	17	Камерон [8]
Ультрафиолет	14.5	Лекрон [9]
Профиль H_γ	15	Наме определение
Кривая роста	17.6	»
Среднее	14.6	

Вторая трудность состоит в том, что в поле ~ 34 кГс линии расширяются до ~ 1 Å, вследствие чего наблюдается значительное блендирование. Поэтому приведенные ниже температуры будут весьма приближенными.

Температура возбуждения T_n , полученная по разным элементам, оказалась следующей, К: 13 300 (Fe II, 54 линии), 13 700 (Ti II, 75 линий), 7200 (Sr II, 41 линия). Температура ионизации $T_n = 20\,000$ К (Fe II/Fe III). На основании известного эмпирического соотношения [7] $T_n/T_e = 0.95$ мы определили средневзвешенное значение $T_e = 13\,700$ К, а на основании соотношения $T_n/T_e = 0.95$ получили $T_e = 21\,400$ К. Среднее значение этих двух величин $T_e = 17\,600$ К, его следует считать завышенным вследствие слишком большого T_n , вероятно, из-за сильного блендирования более слабых линий Fe III (по сравнению с линиями Fe II). Таким образом, мы имеем ряд оценок T_e , дающих значительный разброс. Сводка приведена в таблице, из которой видно, что формальная средняя величина близка к значениям, полученным нами по профилям линий H_γ .

Определение углов i и β . На основании полученной оценки эффективной температуры можно определить угол наклона оси вращения к лучу зрения i . Для звезд главной последовательности, имеющих такую же T_e , радиус равен $R = 3.0 R_\odot$ [11]. Следовательно, скорость вращения на экваторе $v_e = 50.6R/P = 16.0$ км/с; тогда, имея период вращения $P = 9^d.5$ и $v \sin i = 5$ км/с [2], получаем $i = 18^\circ$.

Мы провели также оценку угла i и угла β между осью вращения и осью диполя другим способом. Для этого использовались интенсивности линий, расщепленных в магнитном поле. Теоретические значения параметров Стокса находились при разных искомым углах i и β , а затем полученные профили линий сравнивались с наблюдаемыми. Расчет параметров Стокса проводился при трех следующих предположениях: 1) звезда вращается как твердое тело вокруг оси, наклоненной к лучу зрения на угол i ; 2) магнитное поле является дипольным с произвольным положением и ориентацией; 3) интенсивность выходящего излучения и остальные параметры Стокса вычислялись методом Унно [12]. Подробно алгоритм и дополнительные возможности даются в [13].

Наблюдаемые профили линий измерялись по трем зеемановским спектрограммам, полученным с дисперсией 9 Å/мм в фазе 0.87. По линиям, принадлежащим железу и титану, найдено среднее расщепление $\Delta\lambda = 0.685$ Å, что соответствует $H_s = 35$ кГс.

Интенсивности компонент, полученные по всем линиям, для право- и лево-циркулярно поляризованных спектров, равны соответственно

$$I_1 : I_2 : I_3 = 1.00 : 0.76 : 0.51;$$

$$I'_1 : I'_2 : I'_3 = 0.49 : 0.82 : 1.00.$$

По данным Престона [2], Борра и Ландстрита [3] и нашим оценкам углов i и β оказалось, что расчеты необходимо вести в пределах $i = 0 \div 30^\circ$

и $\beta=0\div 30^\circ$. Наилучшее согласие вычисленных и наблюдаемых линий достигнуто для центрального диполя при $i=20^\circ$ и $\beta=10^\circ$. На рис. 2 приведены наблюдаемые и вычисленные изменения магнитного поля с фазой периода при использовании наших значений i и β . Как видно из рисунка, совпадение между ними можно считать удовлетворительным.

Борра и Ландстрит [3] на основании измерений магнитного поля по водородным линиям нашли другие значения углов, а именно: $i=30\div 35^\circ$ и $\beta=30\div 35^\circ$. Кроме того, они вынуждены были для наилучшего согласования своих измерений с данными, полученными Престоном [2], предположить смещение диполя из центра на величину $|a|=0.2\div 0.3$ радиуса звезды. Наши вычисления, как уже говорилось, показывают, что диполь у звезды HD 215441 является несмещенным. Если же принять параметры i и β , полученные Борра и Ландстритом, то тогда амплитуда изменения магнитного поля получается слишком большой (~ 20 кГс). Наши вычисле-

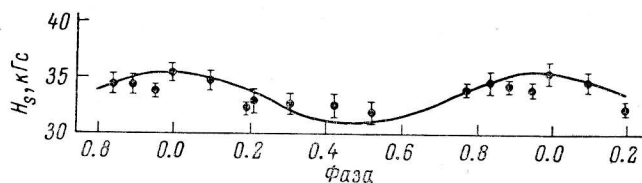


Рис. 2. Сравнение вычисленного (кривая) изменения поверхностного магнитного поля H_s у звезды HD 215441 с наблюдаемым (точки) [2].

ния не подтверждают предположения о необыкновенно высоком поле на невидимом полюсе, равном $-120-213$ кГс, полученном в [3].

Различие в найденных нами углах $i=20^\circ$ (полученного по расчетам интенсивностей линий) и $i=18^\circ$ (вычисленного на основании P и $v \sin i$) невелико. Если провести обратный пересчет, то угол $i=20^\circ$ приводит к радиусу звезды, соответствующему звездам главной последовательности с $T_e=11\ 500$ К. Эта величина намного меньше полученной нами, следовательно, угол $i=20^\circ$ следует принять как верхний предел. Угол i , полученный Борра и Ландстритом, является неприемлемо высоким. Если исходить из их значения i , то радиус звезды будет соответствовать звезде главной последовательности с $T_e=8000\div 9000$ К. Спектр звезды совершенно не соответствует этой температуре, иначе пришлось бы предполагать, что радиус звезды HD 215441 меньше, чем у звезд главной последовательности, или что значение $v \sin i$ равно не 5, а $10-11$ км/с, что явно завышено. Это обстоятельство еще раз показывает, что модель [3] не соответствует наблюдениям.

Заключение. Наблюдательные данные свидетельствуют о том, что проблема структуры магнитного поля HD 215441 еще не решена. По-видимому, основными являются вопросы о том, почему поле, измеренное по водородным линиям, не удается объяснить простым центральным диполем и какое именно поле дают измерения водородных линий.

Борра и Ландстрит [3] считают, что причинами расхождения наблюдаемых и модельных данных являются, во-первых, приближенность представлений Унно [12] о влиянии магнитного поля на спектральные линии и, во-вторых, фотографическая методика измерения магнитного поля H_s . В наших измерениях и вычислениях применялась та же методика, однако нам не пришлось использовать нецентральный диполь.

Все перечисленные данные показывают, что необходимы дальнейшие тщательные исследования магнитного поля HD 215441.

Список литературы

1. В а б с о с к Н. W. The 34 kg magnetic field of HD 215441. — *Astrophys. J.*, 1960, 132, N 3, p. 521—531.
2. P r e s t o n G. W. The magnetic field of HD 215441. — *Astrophys. J.*, 1969, 156, p. 967—982.
3. В о р г а Е. F., L a n d s t r e e t I. D. The magnetic field geometry of HD 215441. — *Astrophys. J.*, 1978, 222, N 1, p. 226—233.
4. К р а у з е F. Zur Dynamotheorie magnetischer Sterne. Der «symmetrische Rotator» als Alternative zum «schiefen Rotator». — *Astron. Nachr.*, 1971, 293, H. 4—5, p. 187—194.
5. O e t e k e n L. An equatorially symmetric rotator model for magnetic stars. — *Astron. Nachr.*, 1977, 298, N 4, p. 197—201.
6. O s a w a K. Spectral classification and three-color photometry of A-Type peculiar stars. — *Ann. Tokyo. Astr. Obs.*, 1965, 9, Ser. 2, N 3, p. 123—144.
7. Г л а г о л е в с к и й Ю. В., К о з л о в а К. И., Ч у н а к о в а Н. М. Об эффективных температурах пекулярных и металлических звезд. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1973, 5, с. 52—69.
8. S a m e r o n R. C. Narrow-band photoelectric photometry of the magnetic and related stars. — *Magnetic and Related Stars*, 4, Mono Book Corp., Baltimore, 1967, p. 471—480.
9. L e c k r o n e D. S. Ultraviolet photometry from the orbiting astronomical observatory. XV. The strongly magnetic variable HD 215441. — *Astrophys. J.*, 1974, 190, N 2, p. 319—326.
10. M i h a l e s D. Non-LTE Model Atmospheric for B and O Stars. *Nat. Cent. Atmosph. Res.*, 1972.
11. К о п ы л о в И. М. Физические характеристики горячих звезд. — *Изв. КрАО*, 1967, 36, с. 134—154.
12. U n n o W. Line formation of normal Zeeman triplet. — *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1956, 8, N 3—4, p. 108—125.
13. Л е б е д е в В. С. Расчет параметров Стокса для излучения в линиях магнитных звезд. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1980, 12, с. 25—34.