

## СЛОЖНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ HD 21699

Ю.В. ГЛАГОЛЕВСКИЙ, Г.А. ЧУНТОНОВ

Поступила 13 апреля 2007

Принята к печати 6 июня 2007

Построена модель магнитного поля He-weak CP- звезды HD21699. Звезда имеет структуру поля диполя, смещенного на 0.4 радиуса из центра поперек его оси. Магнитные полюса на поверхности оказываются близко друг другу, между ними не  $180^\circ$ , как в случае центрального диполя, а  $55^\circ$ . Фазовые зависимости эквивалентных ширин линий He и Si имеют экстремумы в фазах, соответствующих прохождению через видимый меридиан нулевого значения магнитного поля между магнитными полюсами. На магнитных полюсах интенсивность линий гелия максимальна, а кремния минимальна. Содержание кремния максимально в областях, где магнитные силовые линии преимущественно горизонтальны к поверхности звезды. В результате усреднения по видимой полусфере и вследствие близкого расположения полюсов магнитного поля наблюдается только одна волна изменения интенсивности спектральных линий указанных химических элементов, одна волна фотометрической переменности и среднего поверхностного магнитного поля  $B_s$ .

Ключевые слова: *звезды: магнитное поле: химическое содержание*

1. *Введение.* Звезда HD 21699 интересна тем, что характерный химический элемент He сильнее на одной половине полушария звезды и слабее на другой, причем первая область, как следует из работы [1], совпадает с положением положительного магнитного полюса. Магнитный полюс так же, как и "пятно" с увеличенным содержанием гелия находится близко к экватору звезды. Противоположная область звезды, которая имеет более слабое содержание He, совпадает с магнитным полюсом отрицательного знака. Проблема заключается в том, что содержание гелия с точки зрения теории диффузии должно быть вокруг обоих магнитных полюсов одинаковым. Обычно это и наблюдается за исключением HD 21699, 28823, 175362 и некоторых других объектов. В упомянутой работе отмечается также, что кремний ведет себя противоположным образом, т.е. его содержание меньше вблизи положительного магнитного полюса.

В работах [2,3] приводятся данные о том, что звезда HD 21699 имеет сильные кремниевые линии (SiII  $\lambda$ 4128, 4130), переменные по интенсивности и по радиальным скоростям. Линии гелия крайне слабы, содержание гелия в 5 раз меньше, чем на Солнце. Звезда имеет характеристики подгруппы He-weak-Si CP2 звезд. Линии гелия весьма широкие и диффузные, похожие на профили чрезвычайно быстрых ротаторов. Наоборот, линии водорода и CII показывают резкие ядра,

похожие на самые медленные ротаторы среди He-weak звезд. Авторы предполагают, что диффузный гелиевый спектр принадлежит к основной фотосфере, а резкий компонент других линий принадлежит к окружающей оболочке.

В работах [2,3] найдено также, что на звезде наблюдается один джет, исходящий только из одного положительного магнитного полюса. Отмечается, что такая асимметрия совершенно неизвестна в космических объектах. Мы не имеем дело с магнитосферой: отсутствие эмиссии в профилях линии в любой фазе, кажется, устраняет существование любой протяженной области, пойманной в ловушку плазмы над магнитным экватором. Вещество выбрасывается только из одного положительного полюса. В работе [4] отмечается также, что фотометрическая кривая имеет всего одну волну, хотя звезды с дипольными магнитными полями всегда имеют две волны. Во всех цветах  $U$ ,  $B$  и  $V$  яркость меняется в фазе, причем она максимальна, когда эффективное поле положительной полярности достигает максимума.

Все эти проблемы были причиной пересмотра основных свойств этой необычной звезды.

**2. Параметры звезды.** Экстремально уменьшенное содержание гелия приводит к неправильной спектральной классификации. МК классификация дает  $Sp = B8$ , в работе [5] дается спектральный класс  $B8IIIpMn$ , что соответствует  $Te \approx 12000$  K.

Эффективная температура, оцениваемая по показателям цвета,  $Te = 16100$  K [6]. В работе [7] приводится значение  $Te = 16000$  K. Это значение температуры и  $\log g = 4.15$  найдены методом моделей атмосфер по профилям линий водорода по спектрам, полученным на 6-м телескопе с разрешением 15000 и отношением сигнал/шум равным 300 на Основном звездном спектрографе с ПЗС матрицей. В этой же работе была сделана оценка  $v \sin i = 35$  км/с. Близкие нашим данным величины скорости вращения даны в работе [8]  $v \sin i = 40$  км/с и в работе [4]  $v \sin i = 35$  км/с. Примем параметры, полученные нами в работе [7].

На основании абсолютной величины  $M_v = -1.0$  и болометрической поправки из работы [9] получаем абсолютную болометрическую звездную величину звезды  $M_b = -2.4$ . Отсюда радиус звезды  $R = 3.5 R_\odot$ , что соответствует V классу светимости звезды.

Период вращения звезды  $P = 2.4765$  [2]. Отсюда по формуле  $v = 50.613 \cdot R/P$  и  $v \sin i = 35$  км/с находим угол наклона звезды к лучу зрения  $i = 32^\circ$ . Это значение хорошо совпадает с оценкой  $i = 33^\circ$  в работе [2].

В работе [10] показано, что эквивалентные ширины линий гелия, а также Ca, C, Mg изменяются одинаковым образом, линии Si меняются слабо.

3. *Структура магнитного поля.* При построении модели магнитного поля звезды мы воспользовались нашим испытанным методом магнитных зарядов, подробно описанным в ряде публикаций [11-13]. Меняя положение магнитных зарядов внутри звезды и вычисляя распределение магнитного поля на поверхности, можно получить в разных фазах вращения звезды среднее эффективное магнитное поле  $B_e$ , т.е. получить вычисленную фазовую зависимость  $B_e(\Phi)$ . Положение зарядов меняется до тех пор, пока вычисленная и наблюдаемая фазовые зависимости не совпадут наилучшим образом.

Для построения модели магнитного поля звезды HD21699 были использованы измерения в работе [2] с помощью Н $\beta$  - зеемановского поляриметра. Измерение поля по линиям водорода имеет преимущество в том, что они не подвержены влиянию неравномерного распределения химических элементов по поверхности. В работе [2] приводится начальная

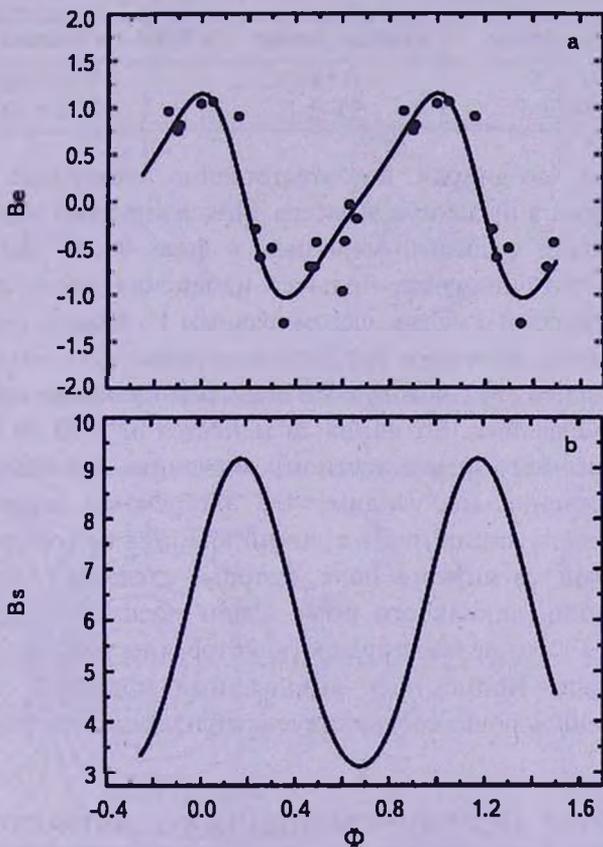


Рис.1. Зависимость величины эффективного магнитного поля  $B_e$  от фазы периода вращения  $\Phi$ . Точки - наблюдаемые значения, линия - модельная зависимость.

фаза изменения поля  $B_e$ , совпадающая с его максимальным положительным значением JD 2445595.778. Однако в работе [4] дано более точное значение периода вращения  $P = 2^d.49246 \pm 0.00035$ , при использовании которого максимальное значение поля не совпадает с нулевой фазой на величину 0.1 периода, т.е. на  $0^d.249$ . Введя эту поправку, мы получили следующую эфемериду начальной фазы: JD 2445595.529 +  $2^d.49246$ .

Фазовая зависимость  $B_e(\Phi)$  показана на рис. 1а точками. Магнитная кривая практически симметрична относительно нулевого значения.

*Модель центрального диполя.* Вначале мы построили модель магнитного поля, предполагая расположение диполя в центре звезды. Наилучшее соответствие вычисленной и наблюдаемой фазовых зависимостей получается при следующих параметрах:

Таблица 1

## ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ДИПОЛЯ

Знак заряда	Долгота заряда, $\lambda$	Широта заряда, $\delta$	Поле на полюсе $B_p$ , Гс
+	$0^\circ \pm 5^\circ$	$-1^\circ \pm 1^\circ$	$+7750 \pm 300$
-	$180^\circ \pm 5^\circ$	$+1^\circ \pm 1^\circ$	$-7750 \pm 300$

Из табл. 1 видно, что диполи, и соответственно, магнитные полюса находятся практически в плоскости экватора. Положительный магнитный полюс проходит через видимый меридиан в фазе  $\Phi = 0$  магнитной кривой. Модель достаточно чувствительна к изменению долготы заряда  $\delta$ , поэтому расчет делался с малым шагом, равным  $1^\circ$ . Модель позволяет вычислить зависимость величины среднего поверхностного магнитного поля  $B_s$  от фазы периода  $\Phi$ , которую по спектрам практически нельзя измерить из-за его слабости. Величина  $B_s$  меняется от 4750 до 4360 Гс, что приводит к среднему поверхностному значению  $B_s = 4550$  Гс. Из дальнейшего обсуждения мы увидим, что экстремумы зависимости эквивалентной ширины линии гелия и линий кремния не совпадают по фазе с экстремумами магнитного поля, которые следовало ожидать в случае предположения дипольного поля. Сдвиг по фазе между ними достигает  $\Delta\Phi \approx +0.2$ . Это первая трудность, которая испытывает модель центрального диполя. Кроме того, вычисленная модельная фазовая зависимость не очень хорошо соответствует наблюдаемой зависимости,

Таблица 2

## ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ СМЕЩЕННОГО ДИПОЛЯ

Знак заряда	$\lambda$	$\delta$	$B_p$ , Гаусс
+	$55^\circ \pm 5^\circ$	$+0^\circ.2 \pm 0^\circ.1$	$+21800 \pm 200$
-	$65^\circ \pm 5^\circ$	$+0^\circ.1 \pm 0^\circ.1$	$-21900 \pm 200$

величина  $\chi^2/n$  существенно больше, чем в следующем варианте.

*Модель смещенного диполя.* Более точное согласие между наблюдаемой и вычисленной зависимостями получается в модели, в которой диполь смещен из центра звезды на величину  $a = 0.4 \pm 0.1$  радиуса звезды. Величина сдвига диполя  $a$  определяется не очень точно вследствие недостаточного количества измерений по фазам периода, и неопределенность составляет  $\pm 0.1$  радиуса. В нашем случае важен результат, который показывает, что конфигурация поля не соответствует центральному диполю. Координаты монополей и другие параметры приведены в табл.2.

Из полученных параметров видно, что диполь смещен из центра звезды перпендикулярно своей оси (см. рис.2), причем заряды находятся в плоскости экватора. Вычисленная (сплошная линия) зависимость  $Ve(\Phi)$

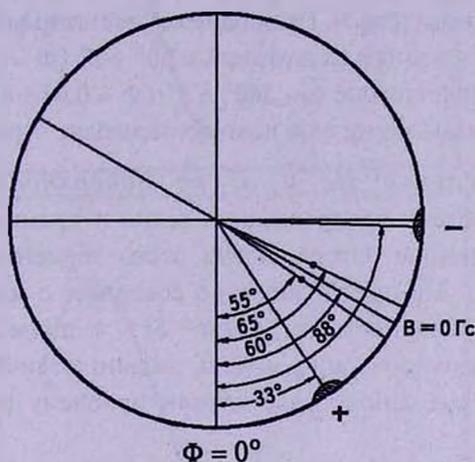


Рис.2. Схема расположения диполя внутри звезды (вид со стороны полюса вращения, вращение по часовой стрелке).

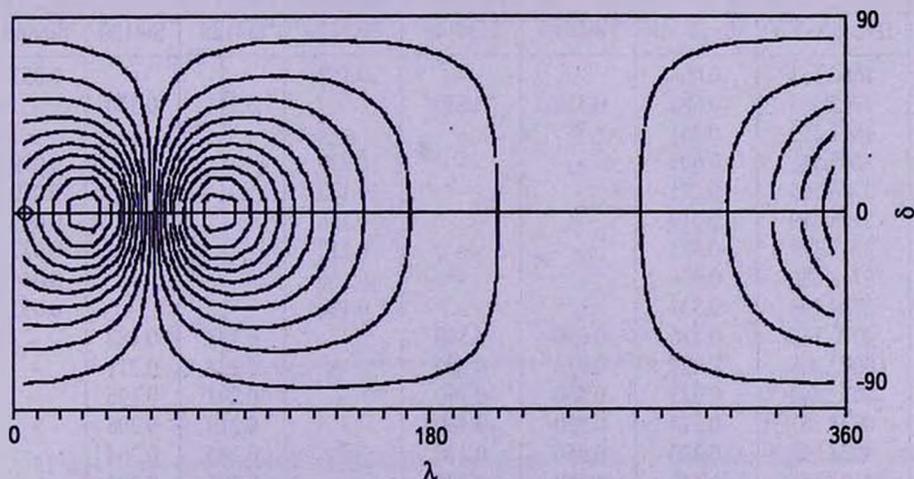


Рис.3. Распределение напряженности магнитного поля по поверхности звезды.

и наблюдаемая зависимость (точки) показаны на рис. 1а. Зависимость несимметрична: положительный максимум находится на фазе  $\Phi = 0$ , а отрицательный на  $\Phi = 0.4$ . Фазовая зависимость вычисленного среднего поверхностного магнитного поля  $B_s(\Phi)$  показана на рис. 1б, оно меняется от 3100 до 9200 Гс, имея среднее значение  $B_s = 6150$  Гс. Поле на полюсах практически одинаково и равно  $B_p = 21850$  Гс. Характерно, что максимумы  $B_s$  не совпадают с максимумами  $B_e$  (но они совпадают с экстремумами интенсивности He и Si, как будет видно далее). В случае модели центрального диполя они всегда совпадают.

Смещенный из центра звезды диполь создает на поверхности звезды две области с максимальной напряженностью с координатами  $\lambda = 33^\circ \pm 5^\circ$ ,  $\delta = 0^\circ \pm 0^\circ.1$  и  $\lambda = 88^\circ \pm 5^\circ$ ,  $\delta = 0^\circ \pm 0^\circ.1$  соответственно для положительного и отрицательного знака (рис. 3). Граница между магнитными пятнами с нулевым полем находится на экваторе на долготе  $\lambda = 60^\circ \pm 5^\circ$  ( $\Phi = 0.17 \pm 0.01$ ), граница на противоположной стороне  $\lambda = 240^\circ \pm 5^\circ$  ( $\Phi = 0.67 \pm 0.01$ ); в эти моменты при вращении звезды магнитное поле  $B_e$  переходит через ноль, меняя знак.

4. *Распределение He и Si по поверхности.* В работе [1] обсуждалась проблема распределения гелия и кремния по поверхности HD21699. По мнению автора линии этого элемента изменяются так, как будто "пятно" He приблизительно совпадает с магнитным полюсом положительной полярности, а "пятно" Si - с полюсом отрицательной полярности. Поскольку наша модель сильно отличается от принятой в работе [1], то мы заново рассмотрели проблему распределения этих

Таблица 3

### ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ $W_\lambda$ ДЛЯ ЛИНИЙ ГЕЛИЯ И КРЕМНИЯ

JD2450000+	Фаза $\Phi$	He4026	He4143	He5876	Si4128	Si4130	Si5868
1560.131	0.058	-	-	0.158	-	-	0.057
1773.545	0.682	0.310	0.230	-	0.341	0.330	-
1892.232	0.301	-	-	-	-	-	-
3605.546	0.699	-	-	0.120	-	-	0.099
3746.165	0.171	-	-	0.172	-	-	0.039
3746.419	0.219	-	-	0.156	-	-	0.047
3747.178	0.523	-	-	0.112	-	-	0.077
3748.356	0.996	-	-	0.156	-	-	0.044
3749.196	0.333	-	-	0.156	-	-	0.053
4070.182	0.116	0.690	0.540	-	0.193	0.182	-
4072.208	0.929	0.470	0.300	-	0.222	0.211	-
4072.444	0.023	0.460	0.360	-	0.203	0.195	-
4073.167	0.314	0.550	0.480	-	0.219	0.208	-
4073.558	0.470	0.450	0.230	-	0.285	0.264	-
4101.155	0.543	0.340	0.270	-	0.295	0.290	-
4102.40	0.042	0.478	-	-	0.161	0.150	-

элементов по поверхности. Для этой цели были получены спектры на 6-м телескопе со звездным спектрографом, снабженным ПЗС матрицей 2К x 2К, имеющем спектральное разрешение 15000. Отношение сигнал/шум равно 300. Измерены эквивалентные ширины линий  $W_\lambda$  для He  $\lambda\lambda$  4026, 4143 и 5876 Å. Результаты измерения приведены в табл.3 и на рис.4а-с, которые обозначены точками. Данные для линий Si  $\lambda\lambda$  4128, 4130 и

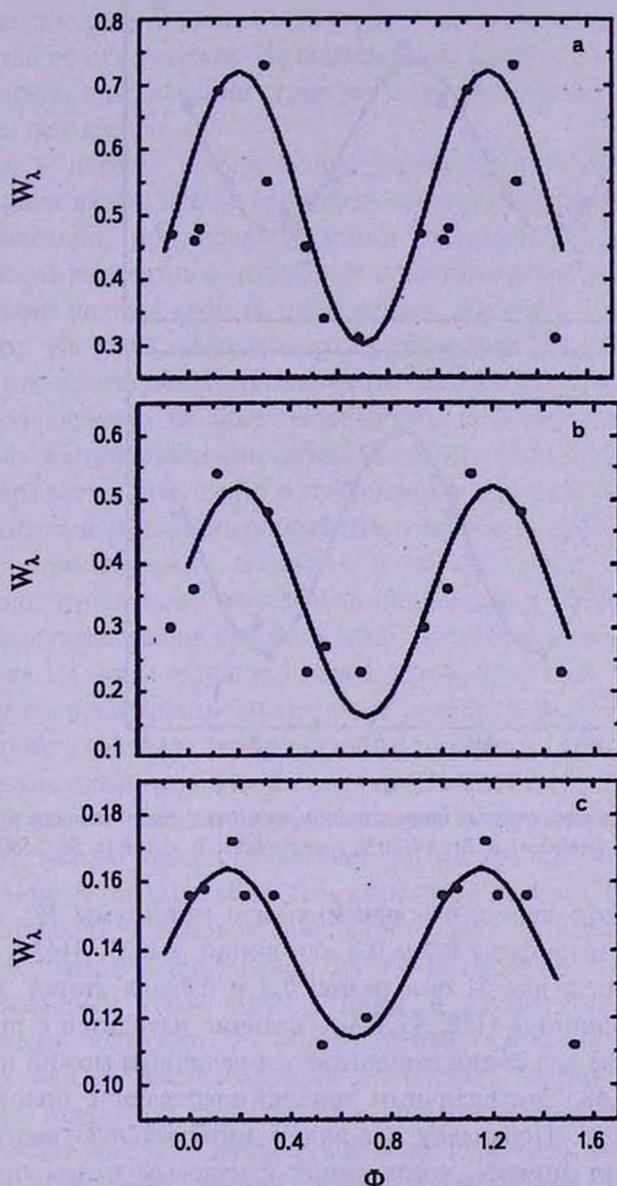


Рис.4. Изменение эквивалентных ширин линий гелия с фазой периода вращения. а - линия  $\lambda 4026\text{\AA}$ ; б - линия  $\lambda 4143\text{\AA}$ ; в - линия  $\lambda 5876\text{\AA}$ .

5868 Å приведены также в табл.3 и на рис.5а, б.

При той конфигурации поля, которую мы нашли, фазовые зависимости  $W_\lambda$  должны быть симметричными для полусфер положительной и отрицательной полярности вследствие симметрии полушарий, поэтому все измеренные зависимости мы аппроксимировали

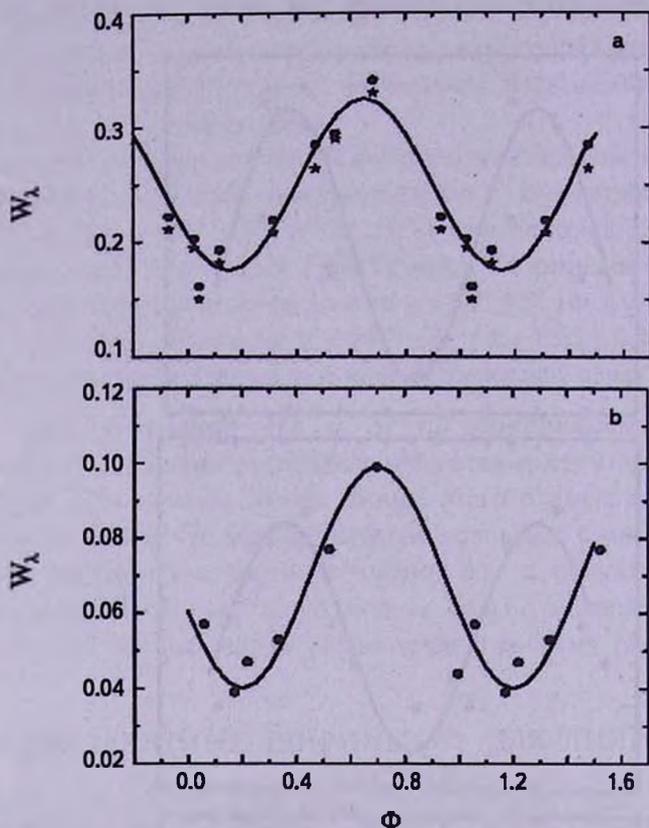


Рис.5. Изменение эквивалентных ширин линий кремния с фазой периода вращения. а - линии Si  $\lambda 4128\text{\AA}$  (кружки) и Si  $\lambda 4130\text{\AA}$  (звездочки); б - линия Si  $\lambda 5869\text{\AA}$ .

синусоидой. Из рис.5 видно, что максимумы и минимумы  $W_\lambda$  для He попадают в среднем на фазы 0.2 и 0.7 для линий  $\lambda 4025, 4143\text{\AA}$  и 0.15 и 0.65 для  $\lambda 5876\text{\AA}$ , а для Si они равны 0.2 и 0.7 для линии  $\lambda 5868\text{\AA}$  и 0.15 и 0.65 для линий  $\lambda 4128, 4130\text{\AA}$ . Различие находится в пределах ошибок и в среднем для обоих элементов эти величины можно принять равными 0.18 и 0.68. Эти величины хорошо совпадают с положением магнитного экватора. Поскольку мы видим интегральную картину по полусфере, то в тот момент, когда линия с нулевым полем проходит через видимый меридиан, интегральное значение  $V_s$  имеет в одном случае максимальное, а в другом минимальное значение. Значение  $V_e$

равно нулю в тот же самый момент. Таким образом, полученные данные показывают, что модель центрального диполя совершенно не соответствует наблюдениям.

**5. Заключение.** Мы получили достаточно надежные данные относительно основных свойств магнитного поля и распределения двух характерных химических элементов. Необходимы дополнительные наблюдения для уточнения структуры поля и распределения химических элементов по поверхности. Из приведенного анализа мы можем утверждать, что в первом приближении структура поля соответствует полю смещенного поперек оси диполя.

Зная в первом приближении распределение магнитного поля по поверхности звезды, можно посмотреть как интерпретировать другие свойства. Действительно, при предположении дипольного поля распределение химических элементов и положение источника ветра вокруг только одного магнитного полюса кажется непонятным. В нашей модели эти проблемы исчезают. На рис.2 приведена схема расположения магнитных зарядов в звезде (на схеме звезда вращается по часовой стрелке). Заряды лежат в плоскости экватора. Положение магнитных полюсов на поверхности звезды показано заштрихованными сегментами. В отличие от вывода в работе [1], где утверждается, что пятно с увеличенным содержанием гелия совпадает с положительным магнитным полюсом, а пятно с уменьшенным содержанием He - с отрицательным полюсом, в нашем случае не подтверждается. Очевидно, что "сильное" гелиевое пятно совпадает со средним положением магнитных полюсов (см. рис.3). "Слабое" пятно совпадает с противоположной областью. На ионы гелия эффективно действуют сила лучевого давления, регулируемая магнитным полем, сила тяжести и ветер [14-17]. Магнитное поле также подавляет турбулентцию в атмосфере, способствуя диффузии химических элементов. На магнитных полюсах ветер имеет достаточную силу для выноса гелия к поверхности, как в случае звезд He-г. В качестве примера можно привести данные по звезде CU Vir [18], у которой содержание гелия больше на том магнитном полюсе, на котором больше напряженность вследствие смещенного диполя вдоль его оси. У HD 21699, вероятно, ветер исходит из обоих полюсов в двух направлениях под некоторым углом друг к другу в соответствии с углом между магнитными полюсами, а "сильное" гелиевое пятно на самом деле состоит из двух близко расположенных магнитных "пятен", не разрешаемых отдельно вследствие усреднения по видимой полусфере.

Относительно поведения Si сделаем следующие замечания. В работах [19-21] обсуждается причина неравномерного распределения кремния по поверхности магнитных звезд. Он скапливается там, где силовые линии расположены горизонтально к поверхности звезды. У звезд с

центральным диполем он концентрируется в области магнитного экватора, где силовые линии преимущественно горизонтальны. В случае смещения диполя, как у HD 21699, противоположная от магнитных полюсов сторона имеет большие площади с горизонтально расположенными силовыми линиями. По этой причине кремний концентрируется в этой области и ослаблен вокруг магнитных полюсов.

Фотометрия в системе *UBV*, как говорилось выше, дает одну волну с фазой периода вращения. На магнитных полюсах из-за увеличения содержания многих химических элементов и увеличения покровного и других эффектов, нарушается распределение энергии в непрерывном спектре, приводя к фотометрической переменности при вращении звезды. То же самое происходит и у HD 21699, но вследствие близости полюсов интегрирование света по полусфере приводит к тому, что две волны сливаются в одну.

Наш опыт моделирования магнитных полей многих *CP*-звезд показывает, что смещение диполя может быть в любом направлении: как вдоль оси диполя, так и поперек. Механизм образования конфигураций со смещенным диполем представляет собой проблему. Возможно, искажение поля происходит на ранних стадиях эволюции в период интенсивного процесса аккреции, например, диполь может быть смещен вследствие выпадения больших масс аккрецирующего вещества.

Рассмотрение полученных данных показывает, что величина периода вращения звезды достаточно точна.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
Россия, e-mail: glagol@sao.ran

## THE COMPOSITE MODEL OF A MAGNETIC FIELD. HD21699

Yu.V.GLAGOLEVSKIY, G.A.CHUNTONOV

The model of magnetic field of the He-weak star HD21699 is constructed. The field has a structure of a dipole 0.4 radiuses aberration from the center of this star and across its axis. The magnetic poles on the surface of this star appear near each other: the angle between them is  $55^\circ$ , not  $180^\circ$  as in case of a central dipole. The phase dependences of equivalent width of He and Si lines have extrema in the phases corresponding passage through a zero

meridian between the magnetic poles. The intensity of helium lines is maximal on the magnetic poles, and silicon is minimal. The abundance of silicon is maximal in the areas where magnetic lines are mainly horizontal to the star surface. As a result of averaging on a visible hemisphere and owing to a close arrangement of magnetic poles one wave of the lines intensity changes of the specified chemical elements, one wave of photometric variability and an average surface magnetic field  $B_s$  is observed only.

Key words: *stars: magnetic field: chemical abundance*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *I.K.Stateva*, *Astrophys. Sp. Sci.*, **226**, 329, 1995.
2. *D.N.Brown*, *S.N.Shore*, *G.Sonneborn*, *Astrophys. J.*, **90**, 1354, 1985.
3. *S.N.Shore*, *D.N.Brown*, *G.Sonneborn*, *Astron. J.*, **94**, 737, 1987.
4. *J.R.Perchy*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **97**, 856, 1985.
5. *H.A.Abt*, *H.Levato*, *M.Grosso*, *Astrophys. J.*, **573**, 359, 2002.
6. *Ю.В.Глаголевский*, *Бюлл. спец. астрофиз. обс.*, **53**, 33, 2002.
7. *Ю.В.Глаголевский*, *В.В.Леушин*, *Г.А.Чунтонов*, *Д.Шуляк*, *Письма в Астрон. ж.*, **31**, 1, 2005.
8. *M.R.Molnar*, *T.C.Stephens*, *A.D.Mallama*, *Astrophys. J.*, **223**, 185, 1978.
9. *V.Straižis*, *G.Kuriliene*, *Astrophys. Sp. Sci.*, **80**, 353, 1981.
10. *I.Stateva*, in *Chemically Peculiar and Magnetic Stars*, Eds. *J.Zverko*, *J.Ziznovsky*, *Tatraska Lomnica*, 1994, p.171.
11. *E.Gerth*, *Yu.V.Glagolevskij*, in *Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, Eds. *Yu.V.Glagolevskij*, *I.I.Romanyuk*, *M.*, 2000, p.151.
12. *E.Gerth*, *Yu.V.Glagolevskij*, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, **56**, 25, 2004.
13. *E.Gerth*, *Yu.V.Glagolevskij*, in *Magnetic stars*, Eds. *Yu.V.Glagolevskij*, *I.I.Romanyuk*, *Nizhnij Arkhyz*, 2004, p.152.
14. *S.Vauclair*, *Astron. Astrophys.*, **45**, 233, 1975.
15. *G.Michaud*, *J.Dupuis*, *G.Fontaine*, *T.Montmerle*, *Astrophys. J.*, **322**, 302, 1987.
16. *S.Vauclair*, *N.Dolez*, *D.O.Gough*, *Astron. Astrophys.*, **252**, 618, 1991.
17. *S.Vauclair*, *Astron. Astrophys.*, **45**, 233, 1975.
18. *Yu.V.Glagolevskij*, *E.Gerth*, *Astron. Astrophys.*, **382**, 935, 2002.
19. *S.Vauclair*, *J.Hardorp*, *D.M.Pederson*, *Astrophys. J.*, **227**, 526, 1979.
20. *C.Alecian*, *S.Vauclair*, *Astron. Astrophys.*, **101**, 16, 1981.
21. *C.Meggessier*, *Astron. Astrophys.*, **138**, 267, 1984.