

УДК: 524.35

МАГНИТНЫЕ МОДЕЛИ HD 115708 И HD 119419

Ю.В. ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 31 июля 2000

Принята к печати 3 октября 2000

Моделирование магнитных полей химически пекулярных звезд HD 115708 и HD 119419 проведено с использованием наблюдаемых кривых изменения магнитного поля с фазой периода вращения. Как оказалось, поле звезды HD 115708 в первом приближении описывается центральным диполем, а поле HD 119419 смещенным диполем. Получены основные параметры магнитного поля обеих звезд и карты распределения напряженности поля по поверхности. У первой из них ось диполя лежит в плоскости экватора, а у второй - почти параллельно оси вращения.

1. *Введение.* Продолжено моделирование магнитных полей химически пекулярных звезд методом, описанным в работах [1-3]. Магнитное поле задается путем введения внутрь звезды магнитных монополей с моментом M . Составляющая поля B_z , направленная на наблюдателя, а также поверхностное поле B_s (или среднее квадратическое поле $\langle B \rangle$, введенное Матиссом [4]) интегрируются по видимой полусфере с учетом потемнения к краю для имитации измерений по профилям спектральных линий с помощью магнитометров и по расщепленным спектральным линиям. Положение монополей задается расстоянием от центра в долях радиуса звезды и координатами по широте и долготе. Подбирая соответствующие параметры звезды и магнитный момент можно добиться совпадения вычисленных и наблюдаемых кривых изменения поля $B_z(P)$ и $B_s(P)$.

Если известны зависимости $B_z(P)$ и $B_s(P)$, то в большинстве случаев можно оценить угол наклона i звезды к лучу зрения и угол между осью диполя и осью вращения χ одновременно, в противном случае угол i оценивается из $v \sin i$.

2. *HD 115708.* Эффективное магнитное поле B_e звезды HD 115708 измерялось Бэбкоком [5] и другими авторами [6]. Поверхностное поле B_s неизвестно, поэтому угол i мы оценили из $v \sin i$. Ширина спектральных линий $w = 0.2 \text{ \AA}$ соответствует приблизительно $v \sin i = 14 \text{ км/с}$ [6]. В каталоге эффективных температур [7] приведены три значения эффективных температур для этой звезды, которые получены по параметру X женеvской фотометрии $T_e(X) = 10150 \text{ K}$, по параметру Q в UDV -фотометрии $T_e(Q) = 10600 \text{ K}$ и по (B2 - G) женеvской фотометрии $T_e(B2 - G) = 7500 \text{ K}$. Спектральный класс этой звезды в разных источниках приводится как A2 или A5, что соответствует в среднем $T_e = 9000 \text{ K}$.

Принимая во внимание тот факт, что у химически пекулярных звезд оценки спектрального класса получаются на 1-2 подкласса более поздние, чем это соответствует их температурам вследствие аномального химсостава, можно предположить, что реальная температура лежит в пределах 9000 - 11000 К.

Используя индекс $\beta = 2.788$ [8] и калибровку из [9], а также болометрические поправки из [10], получаем значения болометрических звездных величин этой звезды для всех этих значений температур и соответствующие им значения радиусов, приведенные в табл.1. Величины $M_b(G)$ получены для соответствующих значений T_e по $M_v = 1^m.8$ из работы [11]. В строках 3 и 5 значения M_b соответствуют положению звезды много выше полосы главной последовательности и не могут быть приняты. Данные 2 строки тоже маловероятны. Более вероятны параметры 1,4 и 6 строк. Они соответствуют положению звезды на главной последовательности. Радиусы звезды вычислялись по известной формуле $\log R/R_\odot = 8.46 - 2\log T_e - 0.2 M_b$. Если принять период вращения $P = 5^d.07622$, приведенный в работе [6], а также значения R из 1,4 и 6 строк табл.1, то получаем скорость вращения на экваторе звезды $V = 30.6 R/P = 36.17$ и 24 км/с соответственно для $R = 3.6, 1.7$ и 2.4 . Отсюда углы наклона $i = 22^\circ, 55^\circ$ и 36° . Второе значение достаточно близко к $i = 50^\circ$ (при $R/R_\odot = 1.8$ [6]).

Таблица 1

	T_e	M_b	R/R_\odot	Примечания
1	10375(XQ)	-0.59	3.6	III класс светимости
2		1.45(G)	1.4	Много ниже ZAMS
3	9000	-0.82	5.3	Много выше ГП
4		1.80(G)	1.7	На ZAMS
5	7500	+0.40	4.3	Много выше ZAMS
6		+1.60(G)	2.4	IV-III класс

В работе [6] со ссылкой на сообщение Матисса сказано, что при разрешении 60000 на спектрах не видно расщепленных компонентов. Это означает, что среднее поверхностное поле B_p не превышает 4-5 кГс. Это позволяет сделать ограничения на искомые параметры звезды. Из расчетов видно, что для получения $B_p < 5$ кГс надо взять $i > 45^\circ$. Это значение мало отличается от оценки [6] и нашей оценки 55° . Следовательно, наиболее правительны значения $T_e = 9000$ К и $M_v = 1^m.8$ [11].

Пользуясь методикой, описанной в вышеуказанных работах, мы промоделировали магнитное поле звезды HD 115708, предполагая дипольную структуру поля. На рис.1а приведены данные измерений поля H_p , сделанные в работах [5,6], и кривая изменений поля, вычисленная нами для $i = 55^\circ$. Полученные параметры приведены в табл.2

Таблица 2

i	χ	B_e	B_p	Примечания
50	77	-	-	Wade et al., 1986
55	87	6.1	3.85	Наша модель
50	78	5.1	3.4	Модель Стиббса-Престона
55	75	4.8	3.1	"-"

во второй строке, в первой строке - данные, полученные в [6].

Сравним полученные результаты с тем, что дает известный метод Стиббса-Престона [12], разработанный для центрального диполя. Угол χ вычисляется по формуле $\text{tg}\chi = (1-r)/(1+r)\text{ctg}i$, где параметр r равен отношению экстремумов изменения B_e . Величина магнитного поля на полюсах $B_p = B_e(\text{max})/0.32\cos(i-\chi)$.

Результаты вычисления параметров (при предположении двух углов

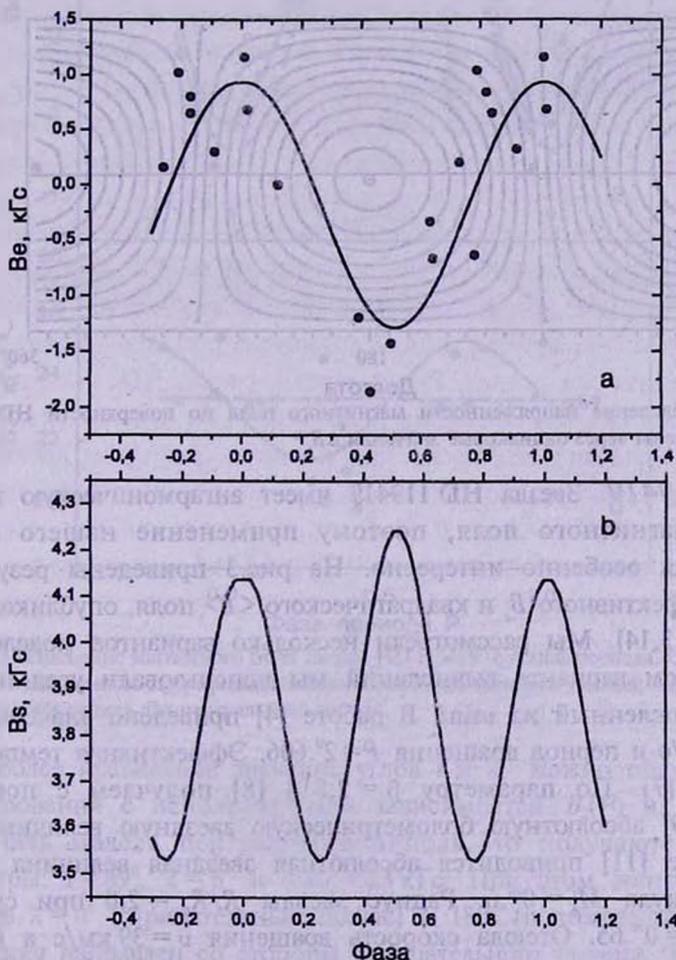


Рис.1 Изменение магнитного поля звезды HD 115708 с фазой периода. Линией проведена модельная зависимость. а - зависимость эффективного магнитного поля; б - зависимость среднего поверхностного поля.

из предыдущих примеров), полученных таким методом, приведены в табл.2 в последних двух строчках.

Из рассмотрения табл.2 можно сделать вывод, что все три метода в случае центрального диполя дают близкие результаты. Это следует учитывать при последующих исследованиях.

Величину поверхностного поля из-за его слабости по спектрам оценить пока не удастся, поэтому наша оценка среднего значения $B_s = 3.85$ кГс представляет интерес. Модельная кривая изменения $B_s(P)$ приведена на рис.1b, а меркаторская карта распределения напряженности поля по поверхности на рис.2.

Из данных табл.2 и рис.2 видно, что плоскость, в которой лежит диполь, практически совпадает с плоскостью экватора вращения. Широта магнитных полюсов $\delta = 3^\circ$.

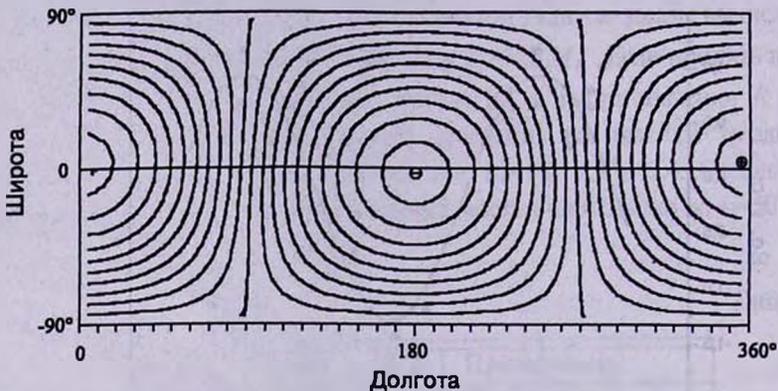


Рис.2 Распределение напряженности магнитного поля по поверхности HD 115708. Изолинии проведены через одинаковые значения ΔB .

3. *HD 119419*. Звезда HD 119419 имеет ангармоническую кривую изменения магнитного поля, поэтому применение нашего метода моделирования особенно интересно. На рис.3 приведены результаты измерения эффективного B_e и квадратического $\langle B \rangle$ поля, опубликованные в работах [4,13,14]. Мы рассмотрели несколько вариантов моделей.

1) В первом варианте вычислений мы использовали угол наклона i звезды, вычисленный из $v \sin i$. В работе [4] приведено значение $v \sin i = 34.8 \pm 6.9$ км/с и период вращения $P = 2^d.606$. Эффективная температура $T_e = 10200$ К [7]. По параметру $\beta = 2.814$ [8] получаем с помощью калибровки [9] абсолютную болометрическую звездную величину $M_b = 0^m.7$. В работе [11] приводится абсолютная звездная величина звезды $M_v = 0^m.9$, откуда $M_b = 0^m.6$. Радиус звезды $R/R_\odot = 2.0$ при среднем значении $M_b = 0^m.65$. Отсюда скорость вращения $v = 39$ км/с а $i = 63^\circ$.

Предполагая модель центрального диполя, был вычислен угол наклона оси диполя к оси вращения к $\chi = 79^\circ$, а также магнитное поле на полюсах $B_p = 10$ кГс. Отсюда среднее значение поверхностного поля приблизительно

будет равно $B_p \times 0.67 \cong 7 \text{ кГс}$. Это значение в несколько раз меньше наблюдаемого среднего значения B_p . В первую очередь ошибку следует искать в неправильном значении угла наклона звезды i . На этом примере хорошо видна ненадежность оценки величин углов наклона по $v \sin i$.

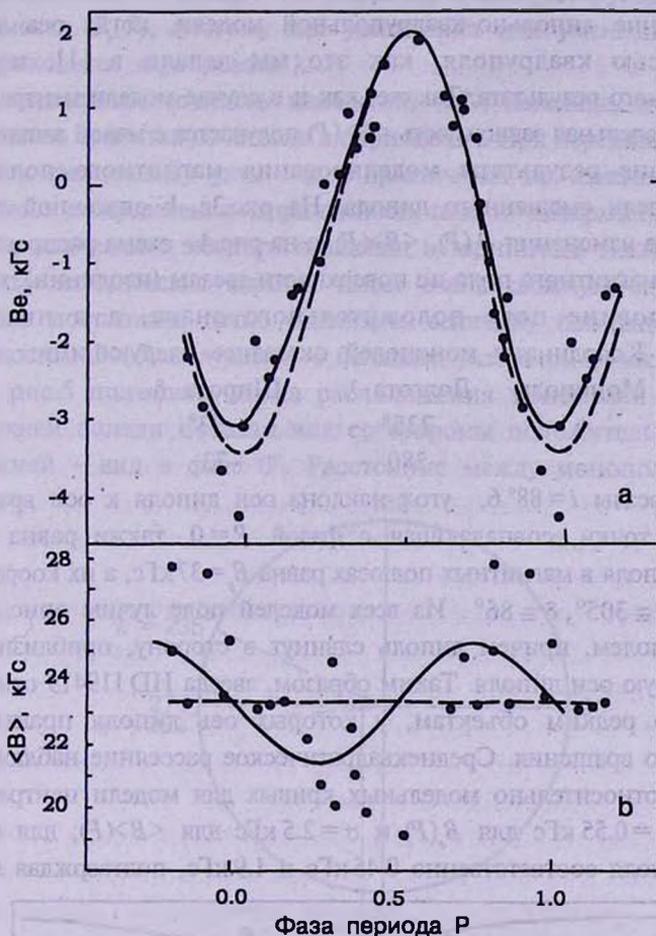


Рис.3 Изменение магнитного поля звезды HD 119419 с фазой периода. Сплошная линия - модельная зависимость при предположении модели смещенного диполя; Штриховая линия - модельная зависимость для центрального диполя.

2) Более правильное значение углов i и χ можно получить методом моделирования с использованием зависимостей $B_p(P)$ и $\langle B \rangle(P)$. Если применить модель центрального диполя, то получаются следующие параметры: $i = 89^\circ$, $\chi = 6^\circ$ и $\langle B \rangle = 23 \text{ кГс}$. При этом долгота магнитных полюсов $\lambda = 0^\circ$ (отрицательный полюс) и 180° (положительный полюс), а луч зрения направлен со стороны отрицательного полюса. Таким образом угол наклона i оказался на 26° больше того, который вычислен из $v \sin i$.

Модельная и наблюдаемая зависимости $B_p(P)$ оказались в удовлетвори-

тельном согласии (рис.3а, штриховая линия), однако модельная зависимость $\langle B \rangle(P)$ изменяется только в пределах 23.8 - 24.0 (штриховая линия), хотя на рис.3б, несмотря на большой разброс, явно заметна переменность приблизительно в пределах 21 - 25 кГс. Следовательно, магнитное поле звезды HD 119419 не дипольное.

3) Применение дипольно-квадрупольной модели, когда ось диполя совпадает с осью квадруполя, как это мы делали в [1], не дало удовлетворительного результата. Так же, как и в случае модели центрального диполя данная модельная зависимость $\langle B \rangle(P)$ получается с малой амплитудой.

4) Наилучшие результаты моделирования магнитного поля дало применение модели смещенного диполя. На рис.3а, б сплошной линией показаны кривые изменения $B_p(P)$, $\langle B \rangle(P)$, а на рис.4 - схема распределения напряженности магнитного поля по поверхности звезды (изолинии), причем в верхней половине поле положительного знака, а в нижней - отрицательного. Координаты монополей оказались следующими:

Монополь	Долгота λ	Широта δ
+	235°	73°
-	280	-73

Угол наклона звезды $i = 88^\circ.6$, угол наклона оси диполя к оси вращения $\chi = 5^\circ$. Долгота точки, совпадающая с фазой $P=0$, также равна $\lambda = 0^\circ$. Напряженность поля в магнитных полосах равна $B_p = 37$ кГс, а их координаты $\lambda(+)\cong 215^\circ$, $\lambda(-)\cong 305^\circ$, $\delta \cong 86^\circ$. Из всех моделей поле лучше описывается смещенным диполем, причем диполь сдвинут в сторону, приблизительно перпендикулярную оси диполя. Таким образом, звезда HD 119419 относится к относительно редким объектам, у которых ось диполя практически совпадает с осью вращения. Среднеквадратическое рассеяние наблюдаемых значений поля относительно модельных кривых для модели центрального диполя равно $\sigma = 0.55$ кГс для $B_p(P)$ и $\sigma = 2.5$ кГс для $\langle B \rangle(P)$; для модели смещенного диполя соответственно 0.45 кГс и 1.9 кГс, подтверждая лучшее

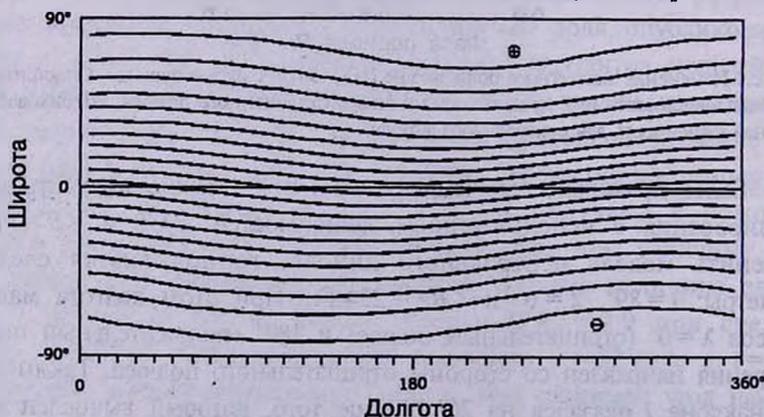


Рис.4 Распределение напряженности магнитного поля по поверхности HD 119419 при предположении смещенного диполя. Изолинии проведены через одинаковые значения ΔB_p .

соответствие последней модели.

На рис.4 хорошо заметна асимметрия распределения напряженности поля относительно оси вращения. Следует подчеркнуть, что амплитуда кривой $\langle B \rangle(P)$ зависит в основном от координат монополей по долготе и от расстояния от центра - a . Параметр a контролируется также формой зависимости $B_i(P)$, поэтому для увеличения или уменьшения амплитуды $\langle B \rangle$ приходится варьировать λ .

К сожалению, точность измерений $\langle B \rangle$ невелика, но она влияет в основном на ориентацию диполя внутри звезды. При переходе от центрального диполя к смещенному углы i и χ практически не изменились, но сильно изменилось распределение напряженности поля по поверхности. То, что звезда видна практически с экватора вращения и магнитного экватора, приводит к тому, что зеемановская картина имеет очень сложную структуру. Это не позволяет достаточно точно оценивать величину поверхностного поля и зависимость $\langle B \rangle(P)$ получается с большим разбросом точек.

На рис.5 приведена схема расположения монополей внутри звезды. На верхней панели показан вид со стороны положительного полюса, а на нижней - вид в фазе 0° . Расстояние между монополями оказалось

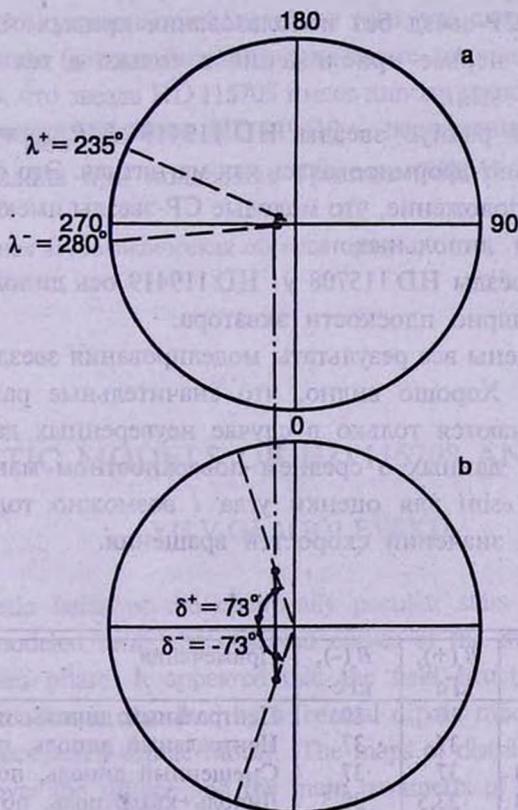


Рис.5. Схема расположения магнитных монополей внутри звезды. а - вид с полюса вращения, б - вид со стороны нулевого меридиана ($P=0$).

равным около 0.2 радиуса звезды. Хотя вследствие неточности измерений эта величина недостаточно надежна (но не более, вероятно, 30%, по нашей оценке), можно сделать вывод, что форма поля не точно дипольная, а, скорее, это поле намагниченного стержня. Диполь смещен перпендикулярно его оси на расстояние 0.05 радиуса звезды. Не исключено, что такая конфигурация внутренней части магнитного поля связана с наличием конвективного ядра.

4) Интересно применить к данной звезде классическую методику Стиббса-Престона, если взять правильный угол $i = 88^\circ.6$. В этом случае $\chi = 5^\circ.3$ и $B_p = 36$ кГс. Отсюда видно, что χ и B_p получились того же порядка, как и в моделях 2 и 3. Таким образом, угол наклона оси вращения i является одним из основных параметров при моделировании. Различие между вычисленным углом $i = 63^\circ$ из $v \sin i$ и полученным из модели $i = 89^\circ$ оказалось довольно большим. Неверными могут быть и $v \sin i$, и радиус звезды R . Правильными значениями должны быть: $v \sin i = 41.7$ км/с (различие с 34.8 км/с из [4] находится в пределах данной там ошибки), либо $R = 1.8$ (различие с принятым значением $R = 2.0$ также в пределах ошибки). Таким образом, моделирование магнитного поля CP-звезд без использования кривых $\langle B \rangle(P)$ следует рассматривать как первое приближение и только в тех случаях, если надежно значение $v \sin i$.

Относительный радиус звезды HD 119419 $R/R_{ZAMS} = 1.1 - 1.2$, т.е. звезда только недавно сформировалась как магнитная. Это обстоятельство поддерживает предположение, что молодые CP-звезды имеют искаженные поля, отличные от дипольных.

В отличие от звезды HD 115708 у HD 119419 ось диполя направлена почти перпендикулярно плоскости экватора.

В табл.3 приведены все результаты моделирования звезды HD 119419, полученные выше. Хорошо видно, что значительные различия между результатами получаются только в случае неуверенных данных о $v \sin i$. Поэтому, если нет данных о среднем поверхностном магнитном поле, то использование $v \sin i$ для оценки угла i возможно только в случае достаточно точных значений скоростей вращения.

Таблица 3

Вариант	i	χ	$B_p(+)$, кГс	$B_p(-)$, кГс	Примечания
1	63	79	10	10	Центральный диполь, по B_p
2	88.8	10	37	37	Центральный диполь, по B_p и $\langle B \rangle$
3	88.6	5.0	37	37	Смещенный диполь, по B_p и $\langle B \rangle$
4	88.7	7.0	33.5	39.5	Диполь+квадруполь, по B_p и $\langle B \rangle$
5	88.6	4.6	110	110	Метод Стиббса-Престона, центральный диполь, i из п.3

5. *Заключение.* Наш опыт моделирования магнитных полей звезд с разными конфигурациями поля и разной их ориентацией показывает, что наша методика в большинстве случаев позволяет получать достаточно точные оценки наклона оси вращения и других параметров, если имеются кривые изменения и эффективного, и поверхностного (или среднего квадратического) магнитного поля. В противном случае угол i определяется из $v \sin i$, которые часто недостаточно точны. Поэтому, результаты моделирования, полученные с учетом $v \sin i$, следует принимать как первое приближение. Ошибки величины χ больше при малых значениях i , а ошибки B_p максимальны как при больших i , так и при малых. Точность измерений магнитного поля B_e и B_p в настоящее время такова, что оценки углов i и χ делаются с ошибкой $\sigma \approx \pm 1^\circ$ и величины B_e с $\sigma \approx \pm 2 - 5\%$. Наилучшее согласие результатов моделирования и данных, полученных методом Стиббса-Престона, получается для дипольных полей.

К настоящему времени мы промоделировали магнитное поле у 12 звезд. Предварительный вывод состоит в том, что, по-видимому, наиболее часто встречаются конфигурации магнитных полей, описываемые смещенным диполем, причем, по-видимому, структура магнитных полей звезд с возрастом упрощается вследствие того, что сложные конфигурации менее устойчивы (имеют большие омические потери).

Интересно, что звезда HD 115708 имеет диполь практически в плоскости экватора вращения, а звезда HD 119419 - перпендикулярно ему.

Работа сделана при поддержке Грантов РФФИ и "Астрономия".

Специальная астрофизическая обсерватория
РАН, Россия

MAGNETIC MODELS OF HD 115708 AND HD 119419

YU.V.GLAGOLEVSKIJ

The magnetic fields of the chemically peculiar stars HD 115708 and HD 119419 were modeled using the observed curves of the magnetic field variation with the rotation phase. It appeared that the field structure of HD 115708 in a first approximation is described by a central dipole model, while that of HD 119419 by a decentered dipole model. The maps of distribution of the magnetic field strength over the surface and the main parameters of the stars are obtained. It turned out that in the former of the stars the dipole is disposed in the equatorial plane, but in the latter it is nearly parallel to the rotation axes.

ЛИТЕРАТУРА

1. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij, G.Scholz*, in "Stellar magnetic Fields", Eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, Moskow, 1997.
2. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij, G.Scholz*, *Contr. Astron. Observ, Skalnate Pleso*, 27, 455, 1998.
3. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij*, in "Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars", eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, 2000 (в печати).
4. *G.Mathys*, *Astron. Astrophys.*, 293, 746, 1995.
5. *H.W.Babcock*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 30, 141, 1958.
6. *G.A.Wade, E.Neagu, J.D.Landstreet*, *Astron. Astrophys.*, 307, 500, 1996.
7. *Yu.V.Glagolevskij*, *Bull. Spec. Astrophys. Observ.*, 38, 152, 1994.
8. *P.Renson, D.Kobi, P.North*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 89, 61, 1991.
9. *D.L.Crowford*, *Dudley Observ. Repr.*, No 14. 1979.
10. *V.Straizis, G.Kuriliene*, *Astron. Space. Sci.*, 80, 353, 1981.
11. *A.E.Gomez, X.Luri, S.Grenier, F.Figueras, P.North, F.Royer, J.Torra, M.O.Menessier*, *Astron. Astrophys.*, 336, 953, 1998.
12. *G.Preston*, *Pub. Astron. Soc. Pacif.*, 83, 571, 1971.
13. *D.A.Bohlender, J.D.Landstreet*, *Astron. Astrophys.*, 269, 355, 1993.
14. *I.B.Thompson, D.N.Brown, J.D.Landstreet*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 64, 219.