АСТРОФИЗИКА

TOM 47

НОЯБРЬ, 2004

ВЫПУСК 4

УДК: 524.3

МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ HD 2453

Ю.В.ГЛАГОЛЕВСКИЙ Поступила 3 февраля 2004 Принята к печати 19 мая 2004

Построена модель магнитного поля звезды HD 2453 с очень большим периодом вращения ($P=521^{4}$). Найдено, что структура поля соответствует модели диполя, смещенного от центра на $\Delta r = 0.09 R$. Угол наклона оси диполя к оси вращения $\beta = 5^{\circ}$, т.е. ось диполя почти совпадает с осью вращения. Угол наклона оси вращения к лучу зрения $i=79^{\circ}$, т.е. звезда видна почти с экватора вращения и экватора магнитного поля. Этим объясняется малая амплитуда фазовой зависимости эффективного магнитного поля Be(P) и малая амплитуда фотометрической переменности. Величина поля на магнитных полюсах Bp = +4400 и -7660 Гс. Параметры магнитного поля оказались близкими тем, которые получены Ландстритом и Матиссом из предположения дипольно-квадрупольно-октупольной модели. Получена меркаторская карта распределения магнитного поля HD 2453.

1. Введение. В данной работе мы исследуем структуру магнитного поля химически пекулярной звезды HD 2453. Это звезда SrCrEu типа, она относится к медленным (период вращения $P > 25^{d}$) ротаторам, так как период вращения ее $P = 521^{d} \pm 2^{d}$ [1]. Задача данной работы состоит в исследовании различий конфигураций магнитного поля у CP-звезд с большими и малыми периодами вращения, поскольку такие различия подозреваются [2].

Разные методы моделирования в отдельных случаях приводят к существенно разным результатам, поэтому второй задачей является выяснение причин таких различий. Можно подозревать, что некоторые методы не чувствительны к особенностям строения магнитного поля.

Раньше (начиная с Бэбкока) считалось, что магнитные поля химически пекулярных звезд имеют дипольную структуру. Для определения параметров магнитного поля использовался простой метод Стиббса-Престона [3], использующий фазовые зависимости изменения эффективного магнитного поля *Be*(*P*). Позднее стало ясно, что у многих магнитных звезд структура магнитного поля отличается от дипольной, поэтому разные авторы предприняли попытки усложнять методику моделирования.

Наши модели магнитного поля химически пекулярных звезд строятся методом, так называемого, "распределения магнитных зарядов" (РМЗ). Магнитное поле на поверхности звезды определяется векторным суммированием магнитных полей виртуальных магнитных зарядов (монополей), которые в зависимости от сложности конфигурации поля могут составлять диполи, квадруполи и другие мультиполи, расположенные внутри звезды таким образом, чтобы вычисленные фазовые зависимости магнитного поля совпадали с наблюдаемыми зависимостями. На примере звезды HD 2453 хорошо видно, как это делается. Существуют другие методы описания структуры поля, например, метод сферических гармоник [4] и др. Разработаны также методы, использующие детальный анализ распределения параметров Стокса внутри спектральных линий. Эти методы крайне трудоемки и требуют громадного количества наблюдательных данных, полученных с экстремально высокой точностью, и по этой причине применимы лишь к ограниченному количеству ярких звезд.

К настоящему времени накопилось достаточно много наблюдательного материала по фазовым зависимостям магнитного поля. Наш метод позволяет использовать такие данные при учете минимума параметров. После сравнения с другими методами есть основания предполагать, что в первом приближении метод "распределения магнитных зарядов" дает правильную картину распределения магнитного поля по поверхности и достаточно точные параметры. Метод впервые описан в работе [5], теоретические основы метода приведены в [6-8]. Примеры использования метода РМЗ можно видеть в работах [9-11].

Основные физические параметры звезды следующие. Эффективная температура Te = 8450 K [12], абсолютная болометрическая величина, оцененная по гиппарховским параллаксам [13], Mb (G) = 0.7, оцененная по параметру β [12] $Mb^* = 1.0$. Средняя величина $\log g = 3.8$ соответствует положению звезды на Главной последовательности вблизи звезд IV класса светимости. Угол наклона оси вращения к лучу зрения из $v \sin i = 0$ км/с, вследствие большого периода вращения, определить невозможно. Но он легко выводится из моделирования по фазовым зависимостям Be(P)и Bs(P) (см. далее).

2. Магнитное поле. Среднее эффективное магнитное поле Ве в разные годы измерялось несколькими авторами [14-16].

Фазовая зависимость Be(P), построенная по их данным, приведена на рис.1а кружками. Фазовая зависимость среднего поверхностного магнитного поля Bs(P), построенная по данным [17], представлена на рис.1b также кружками. Эти авторы отмечают, что профиль FeII λ 6149.2Å, по которому делались оценки *Bs*, не имеет влияния бленд, поэтому *Bs* определяется уверенно. Отмечается также, что кривые изменения *Be* и *Bs* с фазой периода близки по форме к синусоиде.

Фазовая кривая *Be*(*P*) всегда имеет отрицательный знак, это означает, что звезда направлена к наблюдателю преимущественно отрицательным магнитным полюсом. Среднее поверхностное поле значительное - 3.75 кГс, а среднее эффективное всего 0.7 кГс. Это является признаком того, что звезда видна почти с магнитного экватора. Эти оба свойства выполняются при условии, что магнитные полюса находятся вблизи полюсов вращения. Таково общее впечатление.



Рис.1. Фазовые зависимости HD 2453. а - изменение измеренного среднего эффективного магнитного поля Be (точки) и вычисленного (сплошная линия); b - изменение измеренного среднего поверхностного магнитного поля Bs (точки) и вычисленного на основе модели центрального диполя (штриховая линия) и смещенного на 0.09 радиуса звезды диполя (сплошная линия).

3. Модель центрального диполя. При предположении модели центрального диполя получены параметры, представленные в табл.1, которые подтверждают предварительное заключение. Используемые параметры - это λ - долгота магнитного заряда, δ - широта заряда, *i* наклон оси вращения к лучу зрения и M = QI магнитный момент (здесь Q - величина заряда, а *l* - расстояние между зарядами). Методом последовательных приближений можно добиться наилучшего совпадения вычисленных и наблюдаемых зависимостей Be(P) и Bs(P). Долгота λ легко определяется положением экстремумов фазовых зависимостей, поэтому решение задачи зависит только от трех параметров - δ , *i* и *M*.

Наилучшее совпадение наблюдаемых и вычисленных фазовых зависи-

мостей получается в случае расположения оси диполя вблизи оси вращения: широта магнитных полюсов $\delta = \pm 85^{\circ}$, наклон оси вращения звезды к лучу зрения $i=97^{\circ}.5$ (82°.5, если отсчитывать от оси вращения в полусфере отрицательного поля). Угол наклона звезды к лучу зрения надежно определяется по среднему значению Bs. Одним из важнейших параметров является β - угол между осью диполя и осью вращения, *Bp* - величина магнитного поля на полюсах. Из полученных параметров видно, что звезда видна практически с экватора вращения и экватора магнитного поля.

Таблица 1

Знак заряда	λ	δ	β	<i>Вр</i> , Гс
+	126° 306	+85° -85	5°	+6000 -6000

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ДИПОЛЯ

Угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 97^{\circ}.5$ (82°.5), величина смещения диполя от центра звезды $\Delta r = 0$.

На рис.1а сплошной линией проведена вычисленная фазовая зависимость Be(P), а на рис.1b штриховой линией проведена зависимость Bs(P). Хорошо видно, что модельная зависимость Be(P) совпадает с наблюдениями, а модельная зависимость Bs(P) имеет слишком малую амплитуду. Это обстоятельство указывает на то, что у HD 2453 поле не дипольное и его структуру необходимо уточнить.

Поскольку экстремумы фазовых зависимостей совпадают по фазе, то можно предположить, что диполь сдвинут вдоль своей оси, а не поперек. Для того, чтобы увеличить амплитуду зависимости *Bs*(*P*), надо напряженность вблизи положительного полюса уменьшить (см. рис.1a, b), а вблизи отрицательного полюса увеличить. Следовательно, диполь сдвинут в сторону отрицательного магнитного заряда.

4. Модель смещенного диполя. Методом последовательных приближений мы получили модель смещенного диполя со следующими параметрами (табл.2):

Таблица 2

Знак заряда	λ	δ	β	Вр, Гс
+	126°	85°	5°	4400
States of the second	306	-85	1 day	-7660

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ СМЕЩЕННОГО ДИПОЛЯ

Угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения *i* = 101° (79°). Как мы и предполагали в предыдущем обсуждении, в самом деле диполь смещен в сторону отрицательного заряда на величину $\Delta r = 0.09$, угол наклона оси вращения к лучу зрения изменился мало, координаты магнитных зарядов остались прежними, но изменились величины *Bp* на магнитных полюсах, они стали разными. Как видно из рис. lab, зависимость *Be*(*P*) осталась прежней, но наблюдаемая и вычисленная зависимости *Bs*(*P*) теперь хорошо совпадают (модельная зависимость проведена сплошной линией). В отличие от многих звезд, у которых диполь смещен поперек оси диполя (например, HD 126515 [18]), в данном случае диполь смещен вдоль оси. Такие структуры встречаются также у быстровращающихся звезд. Обращает на себя внимание то, что экстремумы магнитного поля не точно совпадают с фазами 0 или 0.5. Они сдвинуты на - 0.15 периода, следовательно эфемериду следует изменить.

На примере HD 2453 хорошо видно, что если для какой-либо звезды имеется только одна фазовая зависимость Be(P), а Bs(P) отсутствует (или наоборот), то не всегда можно узнать, что диполь смещен. В этом состоит опасность моделирования поля только по одной фазовой зависимости. Поэтому все параметры магнитных полей, полученные ранее разными авторами методом Стиббса-Престона [3], предполагающим модель центрального диполя, следует рассматривать только как первое приближение.

Сравним полученные параметры магнитного поля изучаемой звезды с данными других авторов. Ландстрит и Матисс [19] использовали дипольноквадрупольно-октупольную модель HD 2453 и нашли, что вклад каждой составляющей равен -5000, -600, +1800 Гс, углы $\beta = 11^{\circ}$, $i = 62^{\circ}$. Таким образом, порядок величины поля тот же, угол β тоже мал, но угол наклона звезды *i* к лучу зрения отличается значительно - на 17°. Мы предполагаем, что учет гармоник более высокого порядка, чем октуполь, привел бы к лучшему согласию с нашими данными.



Рис.2. Меркаторская карта распределения напряженности магнитного поля звезды HD 2453.

5. Меркаторская карта распределения магнитного поля HD 2453. Вычислительная программа дает возможность получения меркаторской карты распределения магнитного поля по поверхности звезды. Она приведена на рис.2. По оси абсцисс указана долгота λ , а по оси ординат широта δ . Кружками обозначено положение магнитных полюсов, линиями обозначены области с одинаковой напряженностью магнитного поля. Хорошо заметно, что магнитные полюса почти совпадают с осью вращения и мы наблюдаем звезду почти точно с экватора магнитного поля. Этим объясняется малая амплитуда фазовой зависимости *Be*(*P*).

6. Выводы. Наша модель показала, что диполь у HD 2453 смещен вдоль своей оси, такое смещение диполя - обычное явление. Параметры магнитного поля оказались близкими тем, которые получены в работе [19] из модели коллинеарно расположенных диполя, квадруполя и октуполя.

Среднее поверхностное поле HD 2453 по сравнению с другими магнитными звездами невелико: $B_S = 3.75 \, \mathrm{k\Gammac}$. На рис.3 приведена гистограмма распределения числа магнитных звезд в зависимости от величины Bs и на ней стрелкой отмечено положение изучаемой звезды (данные для построения гистограммы взяты из каталога [20]). Поскольку поле HD 2453



Рис.3. Распределение магнитных звезд по величине Вз. Стрелкой указано положение звезды HD 2453.

относительно слабое, а период вращения большой, то возникает противоречие с гипотезой участия магнитного поля в торможении звезды. С другой стороны, выполняется одно из условий [2] эффективной потери момента вращения с участием магнитного поля, а именно, малый угол $\beta = 5^{\circ}$. Однако заметим, что звезда HD 119419 имеет практически такие же параметры магнитного поля [9], как у HD 2453, но она относится к быстрым ротаторам с периодом вращения $P = 2^{d}.6$ ($\beta = 5^{\circ}$), что тоже противоречит предположению о потере момента вращения с участием магнитного поля. Таким образом, проблема потери момента вращения с участием магнитного поля пока еще не закрыта.

В отличие от некоторых других звезд (например, βCrB [21]) наши параметры магнитного поля HD 2453 близки к тем, которые получены с помощью модели с коллинеарными диполем, квадруполем и октуполем [19]. Различия в параметрах моделей структуры магнитного поля некоторых звезд, изученных разными методами, приводят к выводу о необходимости дальнейших шагов по моделированию нашей методикой.

Пример звезды HD 2453 показывает, что по единственной зависимости Be(P), без привлечения Bs(P) практически невозможно выявить модель смещенного диполя и оценить точный угол наклона оси вращения к лучу зрения. Поэтому все оценки параметров магнитного поля звезд с применением методики Стиббса-Престона для модели центрального диполя, сделанные ранее, следует отнести как к первому приближению.

К сожалению, у быстрых ротаторов с *P*<25^d практически невозможно определить среднее поверхностное магнитное поле обычным методом - по расщеплению спектральных линий, поэтому необходимо делать оценки косвенными методами.

Из полученных параметров магнитного поля видно, что звезда видна почти с экватора вращения и экватора магнитного поля. Как правило, химические элементы концентрируются на магнитных полюсах и магнитном экваторе. Этим объясняется малая амплитуда фазовой зависимости эффективного магнитного поля *Be*(*P*) и малая амплитуда фотометрической переменности [1].

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

MAGNETIC MODEL OF HD 2453

Yu.V.GLAGOLEVSKIJ

A model of the magnetic field of the star HD 2453 with a very large period of rotation ($P = 521^{d}$) is constructed. It is found, that the structure of the field corresponds to the dipole model, displaced from the center by $\Delta r = 0.09 R$. The angle of inclination of the dipole axis to the axis of rotation is $\beta = 5^{\circ}$, i.e. the axis of the dipole almost coincides with the axis of rotation. The angle of inclination of the axis of rotation to the line of sight is $i = 79^{\circ}$, i.e. the star is visible almost from the equator of rotation and equator of the magnetic field. This circumstance explains the small amplitude of phase dependence of the effective magnetic field Be(P) and the small amplitude of photometric variability. The value of the field strength at magnetic poles Bp = +4400 and -7660 G. The magnetic field parameters appeared to be close to those obtained by Landstreet and Mathyss from the assumption of the dipole-quadrupole-octupole model. The mercator map of the distribution of magnetic field for HD 2453 has been obtained.

Key words: stars: magnetic fields - stars: individual: HD 2453

ЛИТЕРАТУРА

- 1. F.A. Catalano, P. Renson, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 127, 421, 1998.
- 2. K.Stepien, Astron. Astrophys., 353, 227, 2000.
- 3. G. Preston, Publ, Astron. Soc. Pacif., 83, 571, 1971.
- 4. A.J. Deutsch, Astrophys. J., 159, 895, 1970.
- 5. E. Gerth, Yu. V. Glagolevskij, G. Scholz, in: "Stellar Magnetic Fields", eds. Yu. V. Glagolevskij, I.I. Romanyuk, M., 1997, p.67.
- 6. E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij, in: "Magnetic Fields of CP and Related Stars, eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, M., 2000, p.151.
- 7. E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij, Bull. Spec. Astrophys. Observ., 55, 2004 (in press).
- 8. V.R.Khalack, Yu.N.Khalack, A.V.Schavrina, N.S.Polosukhina, Astron. Z., 78, 655, 2001.
- 9. Yu.V.Glagolevskij, Astrophysics, 44, 121, 2001.
- 10. Yu. V. Glagolevskij, Astron. Astrophys., 382, 935, 2002.
- 11. Yu. V. Glagolevskij, Bull. Spec. Astrophys. Observ., 55, 2004 (in press).
- 12. Yu. V. Glagolevskij, Bull. Spec. Astrophys. Observ., 53, 33, 2002.
- 13. A.E. Gomez, X.Luri, S. Grenier et al., Astron. Astrophys., 336, 953, 1998.
- 14. H.W.Babcock, Astrophys. J. Suppl. Ser., 3, 141, 1958.
- 15. S.C. Wolff, Astrophys. J., 202, 127, 1975.
- G.Mathys, S.Hubrig, J.D.Landstreet, T.Lanz, J.Manfroid, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 123, 353, 1997.
- 17. G.Mathys, S. Hubrig, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 124, 475, 1997.
- 18. Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth, in: "Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Relates Stars", eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, M., 2000, p.161.
- 19. J.D.Landstreet, G.Mathys, Astron. Astrophys, 359, 213, 2000.
- 20. I.IRomanyuk, in "Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars", eds: Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, M., 2000, p.18.
- 21. Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth, in "Magnetic Stars", eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, D.O.Kudryavtsev, 2004 (in press).