

УДК 524.35-337

СЛОЖНАЯ СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ СР-ЗВЕЗДЫ HD32633

© 2008 Ю. В. Глаголевский¹, Е. Герт²

¹ Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

² D-14471, Потсдам, Гонтардштрассе, 130, Германия

Поступила в редакцию 4 февраля 2008 г.; принята в печать 14 февраля 2008 г.

Методом “магнитных зарядов” исследована структура магнитного поля СР-звезды HD32633. Фазовая зависимость ее магнитного поля сильно отличается от синусоидальной. Оказалось, что звезда имеет структуру поля, хорошо описываемую двумя диполями, которые находятся в противоположных частях звезды вблизи экватора вращения. Эти диполи создают по две пары близко расположенных магнитных пятен разного знака, наподобие солнечных. Диполи расположены на расстоянии от центра $\Delta a = 0.6 R$, где R — радиус звезды. Напряженность поля на полюсах равна ± 42 и ± 19 кГс.

Key words: звезды — переменные и пекулярные

1. ВВЕДЕНИЕ

В этой работе мы продолжаем исследование структур магнитных полей химически пекулярных (СР) звезд методом “магнитных зарядов” [1]. С помощью этой методики мы исследовали в общей сложности 23 звезды, из них 9, как оказалось, имеют структуру магнитного поля, соответствующую центральному диполю, 11 — смещенному диполю, 1 — двухдипольную структуру (HD137909) и одна — более сложную структуру (HD37776). В данной работе мы исследуем еще одну звезду, у которой форма фазовой зависимости магнитного поля $Be(\Phi)$ сильно отличается от синусоиды для случая центрального диполя.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Звезда HD32633 Si+SrCrEu-типа пекулярности имеет эффективную температуру $T_e = 12750$ К, ее абсолютная болометрическая звездная величина, определенная по данным, полученным со спутника HIPPARHUS, равна $M_b(G) = -1.1$, а по параметру β — $M_b(\beta) = -1.4$ [2]. В этой же работе ([2]) определен параметр звезды, $R/R_z \approx 1.3$, т. е. она относится к звездам V класса светимости. Здесь R — радиус звезды в настоящее время, а R_z — ее радиус на линии нулевого возраста Главной последовательности.

Скорость вращения $v \sin i$ необходимая для оценки угла наклона i оси вращения к лучу зрения, взята из работы [3]: $v \sin i = 23$ км/с. В работе [4] показано, что при $v \sin i = 23$ км/с радиус звезды должен быть $R \geq 2.9 R_\odot$.

Наши данные показывают, что при использовании величины $M_b(G)$ радиус звезды $R = 1.6 R_\odot$, а при использовании $M_b(\beta)$ $R = 3.1 R_\odot$. Таким образом, последнее ее значение хорошо согласуется с оценками из работы [4]. Мы используем среднее между ними $R = 3.0 R_\odot$.

Период вращения $P = 6.43$ дня [5], поэтому по известной формуле $v = 50.6 \cdot R/P = 23.7$ км/с ($\sin i = 0.97$) находим, что $i = 84^\circ \pm 5^\circ$ (или 96° , если отсчитывать от полюса вращения в полусфере положительного знака поля). Таким образом, звезда видна практически с экватора вращения.

Заметим, что если взять значение $M_b(G)$, то $v = 2.6$ км/с и $\sin i > 1$. Следовательно, вариант $M_b(\beta) = -1.4$ оказывается более реальным.

3. ФАЗОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ $Be(\Phi)$ ДЛЯ HD 32633

В настоящее время существует несколько рядов измерения магнитного поля у звезды HD 32633 в разных фазах периода [5–9]. Все они хорошо согласуются между собой, кроме данных из работы [6]. Чтобы можно было их использовать, мы умножили эти значения на коэффициент 0.75, как авторы работы [5]. Таким образом, в нашем распоряжении оказываются 94 измерения, которые надежно определяют фазовые изменения. Для лучшей наглядности мы использовали для построения фазовой зависимости усредненные данные, полученные методом скользящего среднего по трем точкам. Эта кривая представлена на Рис. 1 точками. Хорошо видно, что форма фазовой зависимости сильно отличается от синусоидальной, которая

обычно бывает у звезд с магнитной конфигурацией центрального диполя. Фазы вычислялись по эфемериде из работы [5].

Для моделирования мы используем обычный наш метод “магнитных зарядов”, подробно описанный в работах [1, 10].

4. МОДЕЛЬ ЦЕНТРАЛЬНОГО ДИПОЛЯ

Как обычно, первым шагом моделирования является получение модели центрального диполя.

Центральный диполь для HD 32633 построен так, чтобы амплитуда B_e была равна наблюдаемой амплитуде. Результаты вычислений показаны в Табл. 1 и Рис. 1а. На нем видно, что форма вычисленной фазовой зависимости $B_e(\Phi)$ сильно отличается от наблюдаемой, то есть конфигурация магнитного поля звезды HD 32633 не соответствует модели центрального диполя.

5. МОДЕЛЬ СМЕЩЕННОГО ДИПОЛЯ

Значительное количество СР-звезд имеет структуру поля, соответствующую смещенному из центра звезды магнитному диполю. Поэтому следующим шагом был расчет этой модели. Результаты вычислений приведены в Табл. 2 и на Рис. 1б. На рисунке видно, что восходящая часть модельной фазовой кривой на $\Phi = 0 - 0.3$ хорошо соответствует наблюдаемой фазовой зависимости, но нисходящая часть ($\Phi > 0.5$) резко отличается от нее. Смещение диполя из центра звезды оказывается равным 0.6 радиуса. Очевидно, что наблюдаемую конфигурацию нельзя описать одним смещенным диполем.

6. СЛОЖНАЯ ДВУХДИПОЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Для двухдипольной структуры магнитного поля методом последовательных приближений удалось получить модельную фазовую зависимость, удовлетворительно описывающую наблюдательные данные (Рис. 1с, Табл. 3).

Сдвиг обоих диполей оказался одинаковым и равным $\Delta a = (0.6 \pm 0.1)$ радиуса звезды. Фазовая зависимость слабо меняется при изменении сдвига Δa и точно установить его размер трудно. Поскольку ошибка величины Δa находится в пределах ± 0.1 , то можно предполагать, что уровни, на которых расположены диполи, вряд ли различаются больше, чем на эту величину. Величина $\Delta a = 0.6$ представляется достаточно надежной, так как при ее уменьшении даже на 0.1 модельный положительный максимум становится заметно более широким, а ступенька более сглаженной. При увеличении Δa максимум становится более узким,

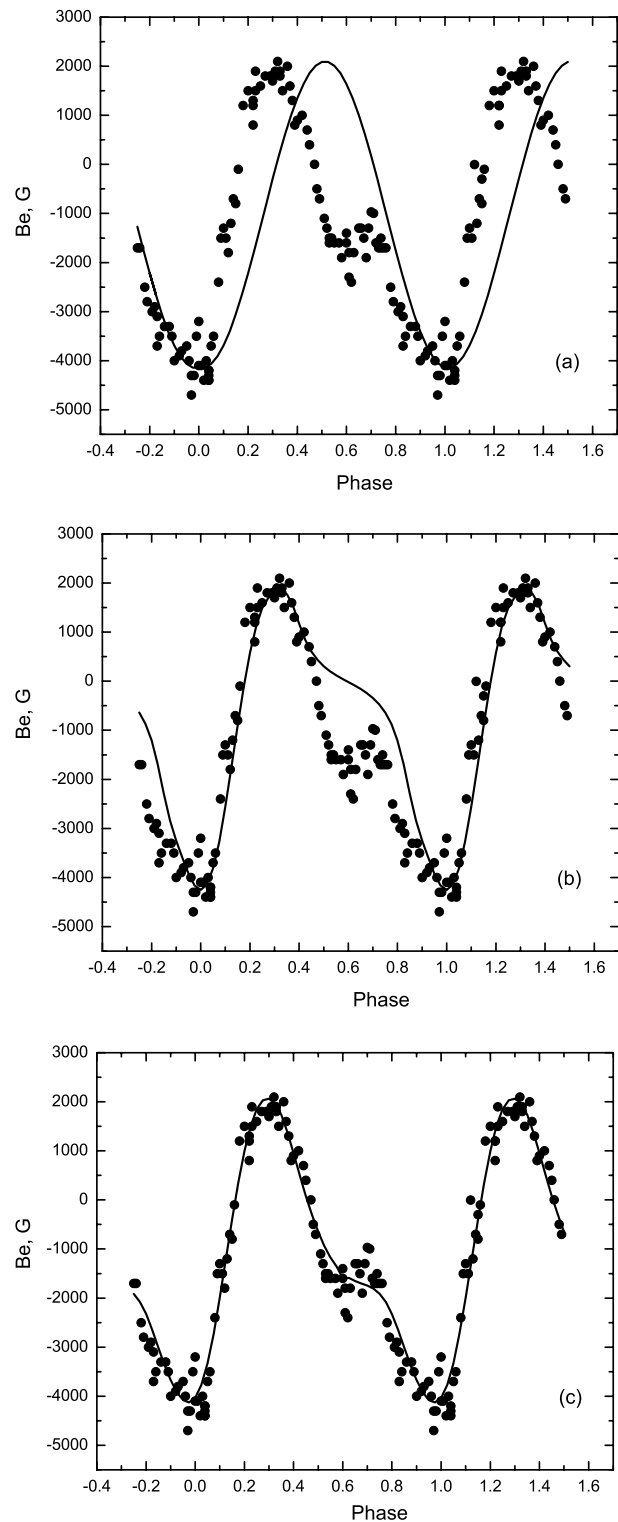


Рис. 1. Наблюдаемая и модельная фазовые зависимости магнитного поля звезды. (а) Модель центрального диполя, (б) модель с одним смещенным диполем, (с) модель с двумя смещенными диполями.

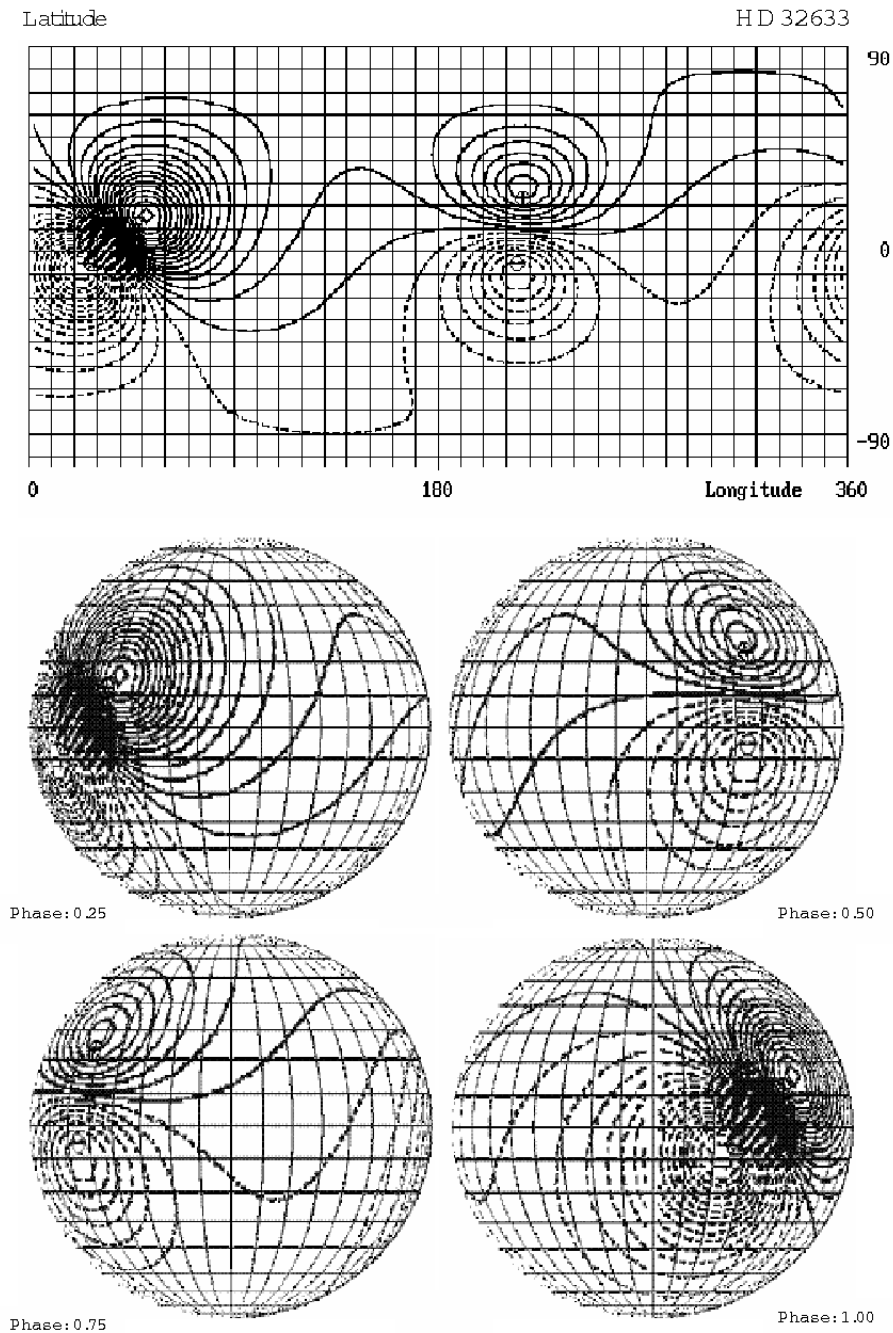


Рис. 2. Меркаторская карта и глобусы, показывающие распределение магнитного поля по поверхности HD32633.

чем наблюдаемый, а ступенька становится ниже наблюдаемых значений.

Наш опыт показывает, что в наибольшей степени ошибка полученных параметров зависит от точности угла i . Ошибки за счет рассеяния точек на

фазовых зависимостях существенно меньше. Для координат они равны $\pm 1^\circ$, а для B_p — 300–400 Гс. Чтобы оценить, какие ошибки полученных параметров двухдипольной модели могут иметь место из-за неопределенности угла i мы провели расчеты,

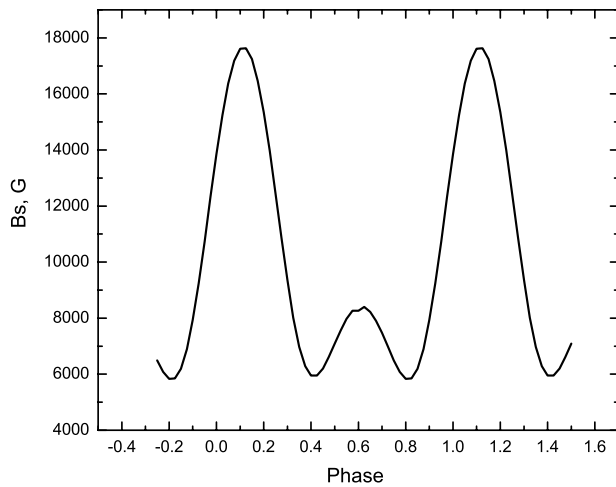


Рис. 3. Фазовая зависимость среднего поверхностного магнитного поля B_s , вычисленная по модели двух диполей.

изменив углы i на величину ошибки $\pm 5^\circ$. В Табл. 3 в скобках приведены отклонения вновь полученных параметров. Они показывают, как велико влияние предполагаемой ошибки угла i .

На Рис. 1с видно, что в районе ступеньки на фазе $\Phi \approx 0.7$ наблюдаемые величины магнитного поля изменяются более резко, чем получается из модели, которая дает плавную ступеньку. Однако, скорее всего, резкие изменения не реальные, потому что мы наблюдаем интегральную картину по полусфере и все локальные особенности должны быть сглажены. Резкие изменения, скорее всего, вызваны сложными изменениями поляризации в профилях линий, приводящими к искажению измерений в отдельных фазах периода.

Полученную модель мы принимаем как первое приближение и считаем основным результатом воспроизведение формы изменения магнитного поля, а количественные оценки параметров менее надежны.

Координаты точек с максимальной напряженностью магнитного поля оказались следующими: для “сильного диполя” положительный полюс имеет $\lambda=51^\circ$, $\delta=15^\circ$, отрицательный полюс $\lambda=24^\circ$, $\delta=-9^\circ$; для “слабого диполя” положительный полюс имеет $\lambda=217^\circ$, $\delta=28^\circ$, отрицательный полюс $\lambda=215^\circ$, $\delta=-10^\circ$. По нашим оценкам ошибки полученных координат такого же порядка, как и для координат монополей.

Одной из основных характеристик магнитного поля СР-звезд в случаях дипольной его структуры является угол между осью диполя и осью вращения — β . В рассматриваемой модели, очевидно, параметр β определяется для каждого диполя отдельно. В нашем случае β — угол между

Таблица 1. Параметры модели центрального диполя для звезды HD32633

Знак монополя	$\lambda, ^\circ$	$\delta, ^\circ$	$B_p, \text{Гс}$	$\beta, ^\circ$
–	0	–60	12970	40
+	180	60	12970	

Таблица 2. Параметры модели смещенного диполя для звезды HD 32633

Знак монополя	$\lambda, ^\circ$	$\delta, ^\circ$	$B_p, \text{Гс}$	$\beta, ^\circ$
–	27	–5	143000	–
+	47	15	157000	

осью диполя и плоскостью, проходящей через ось вращения и центр диполя. На Рис. 2 приведена меркаторская карта распределения магнитного поля звезды HD 32633, а также глобусы звезды в разных фазах периода вращения. Видно, что расстояния между монополями достаточно большие, т. е. диполи имеют вид стержневых магнитов. Оси диполей направлены под большим углом к экватору вращения, а именно под углом $\beta \approx 48^\circ$ и 5° (для сильного и слабого диполя соответственно) относительно плоскости, проходящей через ось вращения. Из полученной модели можно вычислить фазовую зависимость среднего поверхностного магнитного поля B_s (Рис. 3). Среднее значение B_s равно 10 ± 2 кГс. Структура изомагнитных линий пятен на Рис. 2 похожа на структуру солнечных пятен, как было описано в работах [11, 12] при анализе возможностей нашей методики моделирования. Моделирование таких пятен подразумевает существование источников магнитного поля противоположной полярности, расположенных неглубоко под поверхностью. Это эффект максимальной “нецентральности” магнитного диполя. В работе [13] обсуждается возможность применения метода для описания структуры поля при любом сдвиге диполя от центра звезды, даже выше поверхности, например, если диполь расположен на спутнике. Программа вычисления распределения магнитного поля по поверхности на основе магнитных “зарядов” работает во всех случаях с одним и тем же алгоритмом. Вычисление магнитной карты позволяет только описывать структуру магнитного поля на поверхности звезды без каких-либо предположений о механизме его генерации и истории эволюции.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

Из двадцати трех исследованных нами звезд только две имеют двухдипольную структуру маг-

Таблица 3. Параметры двухдипольной модели магнитного поля звезды HD32633

Знак монополя	$\lambda, ^\circ$	$\delta, ^\circ$	Вр, кГс	$\beta, ^\circ$
—	27±1	−5±1	−40.6±4.9	48±2
+	47±1	12±6	+41.6±4.9	
—	215±1	−5±1	−19.3±2.4	5±2
+	217±1	23±3	+19.3±2.4	

нитного поля, это HD 32633 и HD 137909 [10]. Однако формы фазовых зависимостей $B_e(\Phi)$ для них существенно различаются. Это приводит к тому, что у HD 32633 оси диполя, как мы видели, примерно перпендикулярны плоскости экватора вращения, а у HD 137909 — параллельны. Это важное различие должно учитываться при исследовании начальных фаз возникновения магнитных звезд и их дальнейшей эволюции. В последнее время проблеме начальных фаз эволюции звезд уделяется большое внимание. Например, в работе [14] рассматриваются условия возникновения вначале нестабильного запутанного магнитного поля звезд и перехода его со временем в устойчивое состояние, которое наблюдается у магнитных звезд. Оказалось, что устойчивая конфигурация — это кольцо (тороид) внутри звезды, образованное переплетающимися магнитными силовыми линиями. Эта фигура осесимметрична. Внутри этого кольца образуются магнитные силовые линии, формирующие полоидальную составляющую магнитного поля, которую мы и наблюдаем. Расчеты показали, что такая конфигурация стабильна в течение 10^{10} лет, что подтверждают наблюдения [13]. Со временем только омическая диссипация разрушает это поле [15, 16]. По нашему мнению, данная работа — существенный шаг в исследовании начальных фаз эволюции звезд, но это направление надо всячески совершенствовать. В частности, пока неясно, как в рамках нашего подхода объяснить конфигурации магнитных полей двух рассматриваемых звезд. Как видно из Рис. 1с вычисленная зависимость достаточно хорошо соответствует наблюдаемой. Это говорит о том, что структура магнитного поля в первом приближении соответствует двухдипольной, во всяком случае отличается от нее не сильно. Обе звезды имеют большой возраст, принадлежат к V классу светимости и структура их магнитного поля должна была бы упроститься после выхода на Главную последовательность. С другой стороны, в конце жизни звезды на Главной последовательности тороидальное поле должно всплыть к поверхности [14], как на Солнце. Однако HD32633 и HD137909 еще не такие старые объекты, чтобы такая нестабильность успела возникнуть. Рассматриваемый сценарий [14] не учитывает

также, например, то, что магнитные звезды имеют любые значения углов между осью диполя и осью вращения — β .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **56**, 25 (2003).
2. Yu. V. Glagolevskij, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **33**, 33 (2002).
3. E. F. Borra and J. D. Landstreet, Astrophys. J. Suppl. **42**, 421 (1980).
4. F. Leone, G. Catanzaro, and S. Catalano, Astronom. and Astrophys. **355**, 315 (2000).
5. P. Renson, Astronom. and Astrophys. **139**, 131 (1984).
6. G. Preston and K. Stepień, Astrophys. J. **151**, 577 (1968).
7. E. F. Borra and J. D. Landstreet, Astrophys. J. Suppl. **42**, 421 (1980).
8. G. Mathys, Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. **89**, 121 (1991).
9. G. A. Wade, J-F. Donati, J. D. Landstreet, and S. L. S. Shorlin, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **313**, 851 (2000).
10. Yu. V. Glagolevskij and E. Gerth, in “*Magnetic stars*”, eds. by Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, D. O. Kudtryavtsev (Nizhnij Arkhyz, 2004), p. 142.
11. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, in “*1-st Potsdam Thinkshop on Sunspots and Starspots*”, eds. by K. G. Strassmeier, A. Washuettl (Potsdam/Germany, AIP, 2002), p. 111.
12. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, in “*Modelling of Stellar Atmospheres*”, eds. by N. Piskunov, W. W. Weiss, D. F. Gray (Uppsala/Sweden, IAU Symp. 210, 2002), p.111.
13. E. Gerth and Yu. V. Glagolevskij, in “*The A-stars puzzle*”, eds. by J. Zverko, J. Ziznovsky, S. J. Adelman, W. W. Weiss (Poprad/Slovakia, IAU Symp., 224, 2005), p. 629.
14. J. Braithwaite and A. Nordlund, Astronom. and Astrophys. **450**, 1077 (2006).
15. Yu. V. Glagolevskij, in “*Magnetic stars*”, eds. by Yu. V. Glagolevskij, I. M. Kopylov (Leningrad, Nauka, 1988), p. 206.
16. Ю. В. Глаголевский, Е. Герт, Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв. **58**, 17 (2005).

COMPLEX STRUCTURE OF THE MAGNETIC FIELD OF THE CP STAR HD32633**Yu. V. Glagolevskij, E. Gerth**

The method of “virtual magnetic charges” is used to analyze the structure of the magnetic field of the CP star HD32633. The phase relation of its magnetic field differs strongly from a sine wave. The structure of the star’s field can be described fairly well by two dipoles located in the opposite regions of the star near its rotation equator. Each of these dipoles produces two pairs of magnetic spots of opposite polarity similar to sunspots. The dipoles are located at a distance of $\Delta a=0.6 R$ from the center, where R is the radius of the star. The field strength at the poles is equal to ± 42 and ± 19 kG.