

Модели магнитного поля СР-звезд с большими периодами вращения

Ю.В. Глаголевский¹, Е. Герт²

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п.Нижний Архыз, 369167, Россия

²D-14471 Potsdam, Gontardstr. 130, Germany, Ewald-Gerth@t-online.de

Аннотация.

С помощью метода “распределения магнитных зарядов” построены модели магнитного поля звезд HD2453, HD12288, HD200311, имеющих большой период вращения. Рассмотрены два варианта моделей: углы β между осью вращения и осью диполя малы и велики (вследствие двойственности решения). Оказалось, что структура магнитного поля двух первых звезд лучше всего описывается моделью центрального диполя, а у HD200311 — моделью смещенного диполя с величиной смещения $\Delta r = 0.08R$. У всех звезд углы β оказываются большими. Модели с близкими осями (малыми β) меньше соответствуют наблюдательным данным. Построены карты распределения напряженности магнитного поля по поверхности.

Abstract. Models of the magnetic field of the stars HD2453, HD12288, HD200311 having a great rotational periods, are constructed by the method of “magnetic charge distribution”. Two variants of models are considered: angles β between the rotation and dipole axes are small or large (as a result of duality of the solution). It turned out that the magnetic field structure of the first two stars is best described by the central dipole model, while in HD200311 by the model of the decentred dipole shifted by $\Delta r = 0.08R$. For all the stars angles β prove to be large. Models with close axes (small β) are less consistent with observational data. Maps of magnetic intensity distribution over the surface are constructed.

1. Введение

Данная работа посвящена детальному исследованию медленно вращающихся СР-звезд, имеющих период $P > 25^d$. Она является продолжением исследования HD2453 (Глаголевский, 2004а), основные задачи которого заключаются в следующем:

1) сравнение свойств магнитного поля быстрых и медленных ротаторов;

2) выяснение правильности предсказаний Стемпиени (2000) о том, что звезды с большими периодами вращения потеряли момент вращения с участием магнитного поля. Эта потеря эффективнее в случае малого угла β между магнитной осью и осью вращения;

3) сравнение результатов моделирования магнитного поля, полученного нашим методом “распределения магнитных зарядов” (см.ниже) и другими методами, имея в виду, что каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, что дает более полное представление о свойствах звезды.

2. Модель “распределения магнитных зарядов”

Вначале коротко о методе моделирования. Положение диполя с моментом $M = Ql$ (Q — заряд, l — расстояние между зарядами) задается внутри звезды в соответствии с координатами каждого монополя по долготе λ и широте δ (широта отсчитывается от экватора). Задавая заряд Q , угол наклона звезды к лучу зрения i и долготу δ и вычисляя величину среднего эффективного B_e и среднего поверхностного B_s поля в разных фазах P периода вращения, мы получаем модельные фазовые зависимости. Методом последовательных приближений можно добиться наилучшего совпадения вычисленной и наблюдаемой зависимости. Метод “распределения магнитных зарядов” подробно описан в работе Герта и др. (1997), теоретические основы приведены в работах Герта, Глаголевского (2000, 2003); Халака и др. (2001), примеры применения даны в работах Глаголевского (2001, 2002, 2003а).

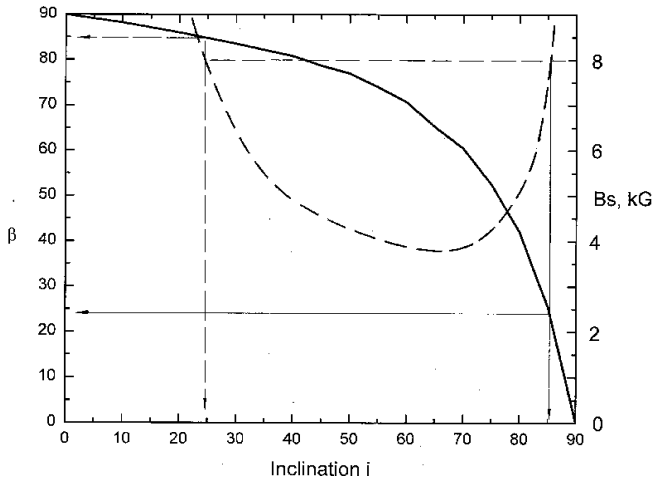


Рис. 1: Типичное изменение среднего поверхностного магнитного поля B_s (штриховая линия) и угла β (сплошная линия) между осью вращения и осью диполя с изменением угла наклона звезды к наблюдателю i .

3. Основные параметры звезды HD2453

Следуя предположению Стемппеня (2000) о необходимости малых углов β между осью вращения и осью диполя у медленных ротаторов, мы в работе Глаголевского (2004а) строили модель магнитного поля звезды HD2453 при условии, что угол β мал. Но для того, чтобы вычисленные фазовые зависимости совпали с данными наблюдений, пришлось допустить, что диполь у HD2453 смещен вдоль своей оси в сторону отрицательного магнитного заряда на величину $\Delta r = 0.09$ радиуса звезды. Из полученных в таком случае параметров магнитного поля следует, что звезда видна почти с экватора вращения и экватора магнитного поля. Как правило, одни химические элементы концентрируются на магнитных полюсах, другие на магнитном экваторе, поэтому можно ожидать малую амплитуду фотометрической переменности. У HD2453 $\Delta V = 0^m.02$ (Каталано, Ренсон, 1998). Величина амплитуды типична для СЗ-звезд. Наш метод моделирования дает параметры магнитного поля HD2453 близкие тем, которые получены с помощью модели с коллинеарными диполем, квадруполем и октуполем (Ландстрит, Матис, 2000), однако, по нашему мнению, более реальна другая модель, которую мы представляем ниже.

На рис.1 приведены типичные зависимости $\beta(i)$ и $B_s(i)$ для наклонного ротатора. Они показывают, что при одном и том же значении B_s существует две модели магнитного поля звезды — с большим и малым углом β . Нет формальных способов разделения этих моделей в **рамках нашего метода**, поэтому выбор между ними приходится делать

на основании некоторых предположений. Так, для звезды HD2453 вначале была выбрана модель с малым углом β , потому что такая модель лучше соответствует гипотезе магнитного торможения, но при этом пришлось допускать значительный сдвиг диполя вдоль оси. Однако оказалось, что модель центрального диполя отлично описывает обе фазовые зависимости без необходимости смещать диполь вдоль оси. Но в этом случае получается большой угол β . Таким образом, модель центрального диполя кажется предпочтительнее. На рис.2А,В приведены (сплошная линия) наблюдаемые и вычисленные зависимости для центрального диполя, которые построены при параметрах, приведенных в табл.1А. Параметр — это величина поля на магнитных полюсах. Для сравнения штриховой линией дана фазовая кривая для модели смещенного диполя (с малым углом β).

Для центрального диполя угол наклона оси вращения $i = 14^\circ$, угол между осью вращения и осью диполя $\beta = 80^\circ$. Таким образом, ось диполя находится близко к плоскости экватора. Хорошее соответствие вычисленных и наблюдаемых фазовых зависимостей для простейшей модели без всяких дополнительных предположений, является аргументом в пользу рассмотренного варианта модели. На рис.3 приведена меркаторская карта распределения напряженности магнитного поля по поверхности для модели центрального диполя.

4. Основные параметры звезды HD12288

Данные для фазовой зависимости среднего эффективного магнитного поля $B_e(P)$ взяты из работы Вейда и др. (2000), они представлены на рис.4А точками. Фазовая зависимость для среднего поверхностного магнитного поля $B_s(P)$ взята из работы (Матис и др., 1997), она показана на рис.4В тоже точками. При построении этих зависимостей мы пользовались эфемеридой из работы (Вейд и др., 2000)

$$JD = 2448499.87 + 34^d.9E.$$

Среднее эффективное магнитное поле $B_e \approx 1.5$ kG всегда имеет отрицательный знак, следовательно звезда видна преимущественно со стороны полусферы с полем в основном отрицательного знака, а среднее значение поверхностного поля $B_s \approx 8$ kG. Угол наклона оси вращения к лучу зрения i определялся на основе моделирования, так как из $v \sin i$ величину i получить нельзя вследствие слишком медленного вращения, $P = 34^d.9$

Первым шагом является вычисление модели с диполем, находящимся в центре звезды. Из

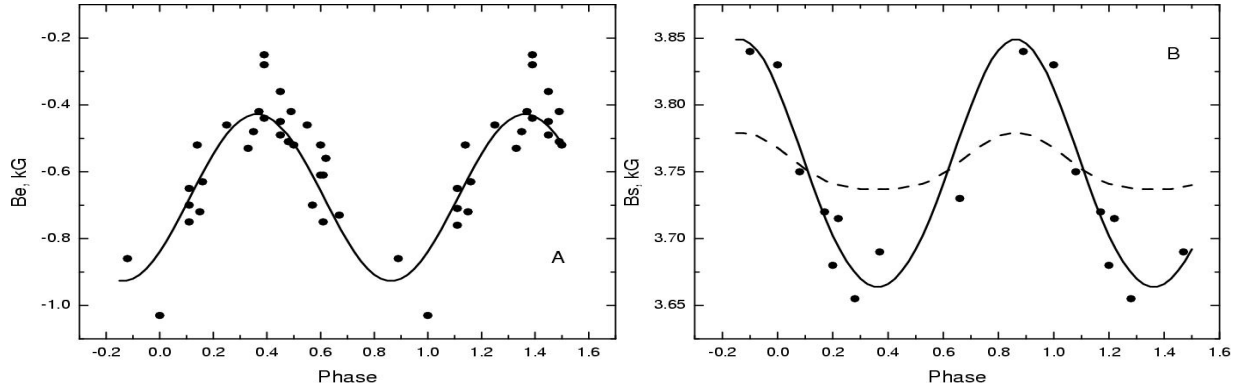


Рис. 2: Измеренные фазовые зависимости среднего эффективного $Be(P)$ и среднего поверхностного $Bs(P)$ магнитного поля звезды HD2453 (точки). А: сплошная линия — вычисленная фазовая зависимость для центрального диполя в случае большого и малого угла β (они совпадают); В: сплошная линия — вычисленная зависимость для центрального диполя и большого угла β , штриховая линия — для центрального диполя и малого угла β .

Таблица 1:

А. Параметры модели центрального диполя HD2453

Знак порядка	λ	δ	Bp , G
+	144°	10°	6560
—	324	—10	—6560

В. Сравнение параметров магнитного поля HD2453, полученных из разных моделей разными авторами

i	β	Δr	Bp , kG	Ссылка
62°	11°	—	—	Ландстрит, Матис (2000)
79	5	0.09	+4400–7660	Наша модель смещенного диполя (Глаголевский, 2004)
14	80	0.0	± 6560	Наша модель центрального диполя

рис.4 видно, что экстремумы зависимостей $Be(P)$ и $Bs(P)$ приходятся на фазы 0.0 и 0.5, следовательно, первоначальные значения λ равны соответственно 0° и 180°. Пусть “Вариант 1” соответствует предположению малого угла, а “Вариант 2” — большого угла.

Методом последовательных приближений мы достигли наилучшего совпадения наблюдаемых и вычисленных фазовых зависимостей $Be(P)$, которые получились при параметрах, приведенных в табл.2.

В “Варианте 1” угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 85^\circ$, угол между осью вращения и осью диполя $\beta = 10^\circ$, в “Варианте 2” $i = 24^\circ$, $\beta = 66^\circ$.

На рис.4А вычисленные зависимости для обоих вариантов совпали и показаны сплошной линией, а на рис.4В первая представлена штриховой линией, а вторая сплошной линией. Хорошо видно, что наблюдательным данным лучше соответствует 2-ой вариант. В этом случае наблюдаемые и вычисленные фазовые зависимости совпадают. Следова-

Таблица 2: Параметры модели центрального диполя HD12288

А. 1-ой вариант с малым углом β

Знак заряда	λ	δ	β	Bp , гаусс
—	0°	80°	10°	12600
+	180°	—80°	10°	—12600

В. 2-ой вариант с большим углом β

Знак заряда	λ	δ	β	Bp , гаусс
—	0°	80°	66°	13400
+	180°	—80°	66°	—13400

тельно, модель центрального диполя во 2-ом варианте более правильно описывает структуру поля звезды HD12288. Для того, чтобы вычисленные и наблюдаемые фазовые зависимости в первом варианте совпали, необходимо сместить диполь вдоль оси, как в случае HD2453.

В случае 1-го варианта, когда ось диполя практически совпадает с осью вращения, трудно ожи-

Таблица 3:

А. Параметры модели смещенного диполя HD12288

Знак заряда	λ	δ	β	B_p , гаусс
–	0°	78°	12°	+9700
+	180°	-78°	12°	15800

В. Сравнение параметров магнитного поля HD12288, полученных из разных моделей разными авторами

i	β	Δr	B_p , kG	Ссылка
62°	22°	–	–	Ландстрит, Матис (2000)
61°	21°	+0.01	11.8	Вейд и др. (2000)
78.5°	12°	+0.08	+9.7; –15.8	Наша модель смещенного диполя
24°	66°	0.0	± 13.4	Наша модель центрального диполя

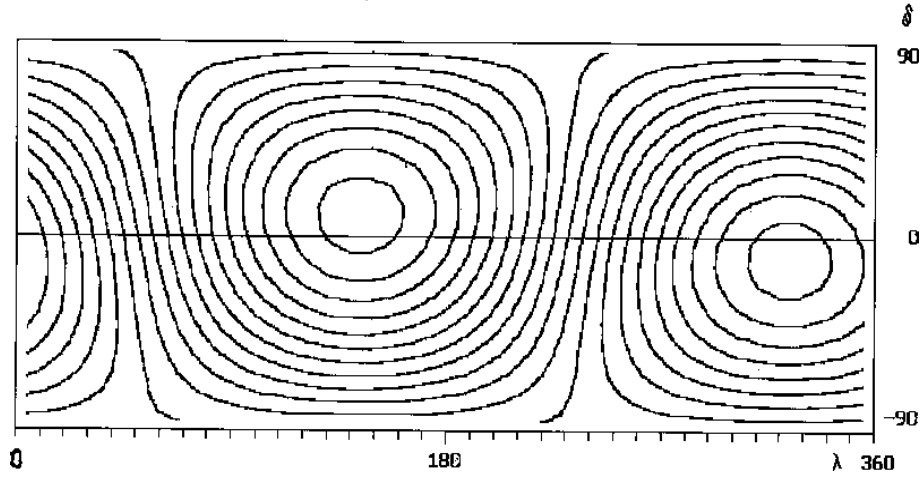
Рис. 3: Меркаторская карта распределения напряженности магнитного поля по поверхности HD2453 для модели центрального диполя и большого угла β .

Таблица 4: Модель магнитного поля HD200311

А. 1-ый вариант с малым углом β

Знак заряда	λ	δ	B_p , гаусс
+	342°	77°	13640
–	162°	-77°	–13640

В. 2-ой вариант с большим углом β

Знак заряда	λ	δ	B_p , гаусс
+	342°	4°	14560
–	162°	-4°	–14560

дать заметной фотометрической переменности. Но в работе (Вольф, Моррисон, 1973) показано, что амплитуда изменений $\Delta V = 0^m.02$, а $\Delta U = 0^m.03$, что для СР-звезд величины значительные. Заметная фотометрическая переменность не противоречит предположению большого угла β .

Меркаторская карта распределения напряжен-

ности магнитного поля по поверхности, вычисленная нами для центрального диполя, приведена на рис.5.

5. Модель смещенного диполя HD12288

Попробуем проанализировать еще один возможный вариант, а именно модель смещенного диполя. Из рассмотрения рис.4В (штриховая линия) видно, что для исправления зависимости $B_s(P)$ диполь следует сместить в сторону отрицательного заряда, тогда величина B_s на фазе $P = 0$ увеличится, а на фазе $P = 0.5$ уменьшится.

Методом последовательных приближений были вычислены фазовые зависимости, которые хорошо совпадают с наблюдаемыми, они были получены при параметрах, приведенных в табл.3А. Диполь оказался смещенным на величину $\Delta r = 0.08$ радиуса звезды в сторону отрицательного заряда. Угол $i = 78.5^\circ$, т.е. звезда видна практически

с экватора вращения и экватора магнитного поля. Угол между осью вращения и осью диполя $\beta = 12^\circ$. Вычисленные фазовые зависимости для модели смещенного диполя показаны на рис.4А и В сплошными линиями.

В табл.4В сравнены параметры наших моделей с теми, которые получены из модели коллинеарно расположенных диполя, квадруполь и октуполь (Ландстрит, Матис, 2000) и из модели смещенного диполя (Вейд и др., 2000). Магнитная ось и ось вращения очень близки. Величины напряженности дипольной, квадрупольной и октупольной компонент равны соответственно -10100 , -2800 , 4200 гаусс. В работе Вейда и др. (2000) приводится только одно значение поля на полюсе B_p . Несмотря на некоторые различия параметров, общая тенденция остается: большой угол наклона оси вращения к лучу зрения, малый угол между осью вращения и осью диполя, величины поля на полюсах одного порядка, большое различие величин смещения диполя. Пока нет достаточно количества данных для анализа причин наблюдаемых различий моделирования. Таким образом, указанные авторы из двух возможностей выбрали, на наш взгляд, менее обоснованный вариант. Необходимость смещения диполя свидетельствует о том, что данная модель менее вероятна.

6. Модель магнитного поля HD200311

Звезда HD200311 имеет период вращения 26^d . Фазовые зависимости для эффективного магнитного поля B_e взяты из работы Вейда и др. (1997), а для среднего поверхностного поля B_s — из работы Матиса и др. (1997), они показаны на рис.6А,В точками. Как и в предыдущих случаях, вначале были построены модели центрального диполя для случаев малого (1-ый вариант), и большого (2-ой вариант) угла β . Для 1-го варианта методом последовательных приближений вычислена фазовая зависимость $B_e(P)$, которая хорошо совпадает с наблюдательными данными, она показана на рис.6А сплошной линией. При этом оказалось, что зависимость $B_s()$ наблюдательным данным не соответствует (рис.6В, штриховая линия). Параметры модели приведены в табл.4А.

Угол наклона оси вращения $i = 89^\circ$, а угол между осями $\beta = 13^\circ$. Аналогичная модель в работе Вейда и др. (1997) дает следующие параметры $i = 90^\circ$, $\beta = 28^\circ$, $B_p = 12800$ G.

Посмотрим, что дает модель центрального диполя при предположении большого угла β . Вычисленная фазовая зависимость $B_e(P)$ на рис.6А совпадает с предыдущим случаем, а вычисленная зависимость $B_s(P)$ на рис. 6В (сплошная

линия) не совпадает с наблюдательными данными, но ближе к ним, чем в случае близких осей. Параметры этой модели приведены в табл.4В. Угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 30^\circ$, угол между осями $\beta = 86^\circ$. В работе Вейда и др. (1997) $i = 28^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $B_p = 12800$ G, т.е. довольно близкие значения. Таким образом, модель с магнитной осью, находящейся вблизи плоскости экватора вращения, лучше соответствует наблюдательным данным, чем модель с совпадающими осями, однако для полного соответствия наблюдениям оказалось необходимым применить модель смещенного диполя. Из рис.4В видно, что смещение должно быть в сторону положительного монополя.

7. Модель смещенного диполя HD200311

Удовлетворительного совпадения вычисленных и наблюдаемых фазовых кривых можно добиться в случае совпадающих осей при предположении смещенного диполя, как в случаях с HD2453 и HD12288. Смещение диполя в сторону положительного заряда на величину $\Delta r = 0.08$ в первом варианте и на $\Delta r = 0.13$ во втором варианте приводит к фазовым зависимостям, показанным на рис.7А,В. Поскольку в первом варианте смещение оказывается меньше, примем его как более вероятный.

Параметры модели смещенного диполя приведены в табл. 5. Угол наклона звезды $i = 30^\circ$, угол между осями $\beta = 86^\circ$.

Значительная фотометрическая переменность (Адельман, 1997) больше соответствует той модели, у которой магнитная ось ближе к экватору, чем к оси вращения. На рис.8 приведена меркаторская карта распределения магнитного поля по поверхности HD200311. В табл.5 сравнены параметры, полученные разными авторами.

В отличие от первых двух звезд в случае HD200311 пришлось предполагать смещение диполя вдоль магнитной оси. Как правило, такое смещение указывает на несоответствие амплитуд фазовых зависимостей $B_e(P)$ и $B_s(P)$. У первых двух звезд такое несоответствие получается при неправильной модели. В последнем случае можно предположить несоответствие из-за систематических ошибок в фазовых зависимостях. Причины таких ошибок могут быть разные, например неравномерность распределения химических элементов.

8. Выводы

1. Из проведенного анализа можно сделать вывод, что у исследованных нами медленно вращающихся звезд HD2453, 12288 модели центрального диполя

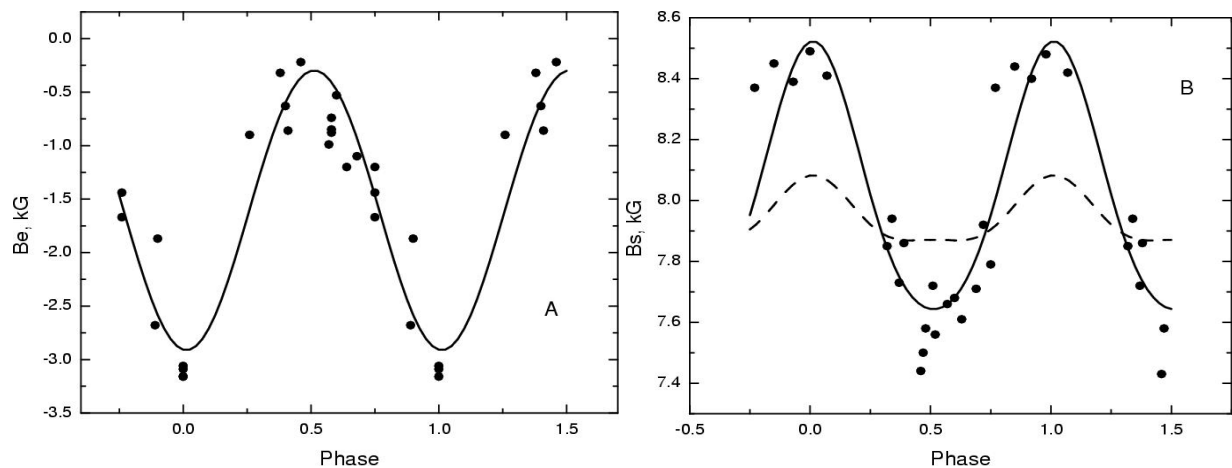


Рис. 4: Измеренные фазовые зависимости среднего эффективного $\langle B_e(P) \rangle$ и среднего поверхностного $\langle B_s(P) \rangle$ магнитного поля звезды HD12288 (точки).

А: сплошная линия — вычисленная фазовая зависимость для центрального диполя в случае большого и малого угла β (они совпадают). В: сплошная линия — вычисленная зависимость для центрального диполя и большого угла β , штриховая линия — для центрального диполя и малого угла β .

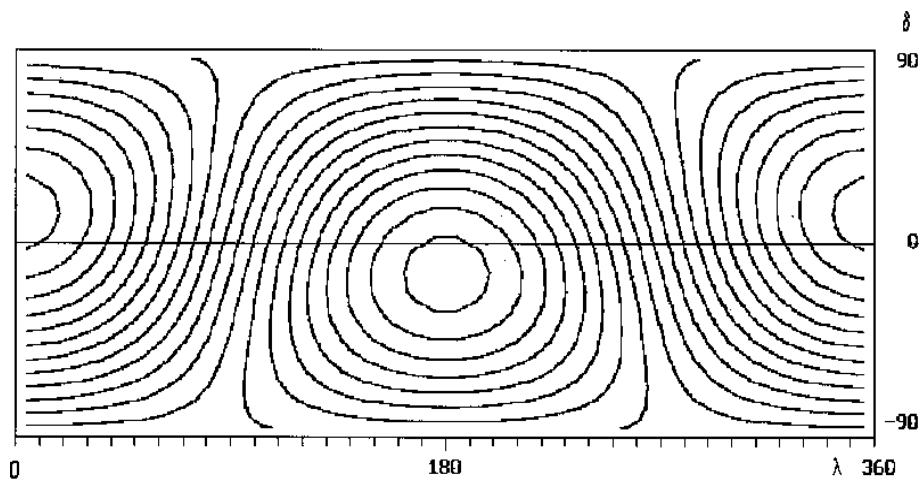


Рис. 5: Меркаторская карта распределения напряженности магнитного поля по поверхности HD12288 для модели центрального диполя и большого угла β .

Таблица 5:

А. Параметры модели смещенного диполя HD 200311

Знак заряда	λ	δ	B_p , гаусс
+	342°	4°	18520
—	162°	-4°	-11420

В. Сравнение параметров магнитного поля of HD200311, полученных из разных моделей разными авторами

i	β	Δr	B_p , kG	Ссылка
88°	24°	—	—	Ландстрит, Матис (2000)
28	90	0.09	± 12800	Вейд и др. (2000)
30	86	0.08	+18520 — 11420	Наша модель смещенного диполя
30	86	0.0	± 14560	Наша модель центрального диполя

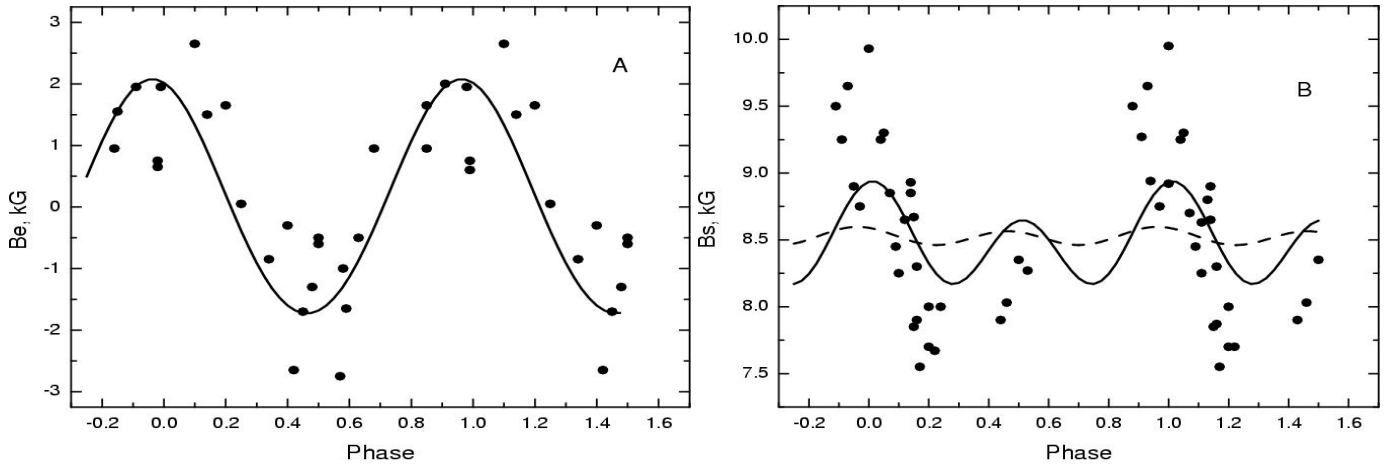


Рис. 6: Фазовые зависимости для звезды HD200311. А: сплошная линия — вычисленная фазовая зависимость для центрального диполя в случае малого и большого углов β (они совпадают). В: сплошная линия — вычисленная зависимость для центрального диполя и большого угла β , штриховая линия — то же для малого угла β .

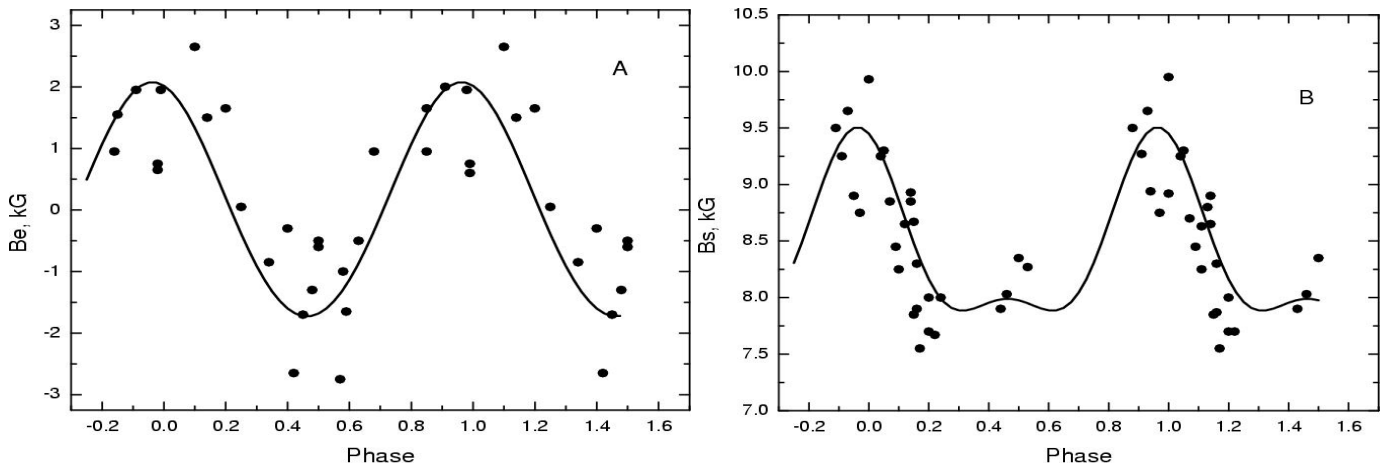


Рис. 7: То же, что на рис.6, но для смещенного диполя.

наилучшим образом соответствуют наблюдательным данным. Для звезды HD200311 потребовалась модель смещенного диполя. Все модели показывают, что изучаемые звезды обладают скорее большими углами между осями вращения и диполя, чем малыми. В таком случае модели не соответствуют гипотезе о торможении поздних CP-звезд с участием магнитного поля (Стемпень, 2000). В связи с этим замечанием вспомним, что магнитные поля у молодых звезд на стадии эволюции до главной последовательности с малыми $v \sin i$ не были обнаружены (Глаголевский, Чунтонов, 2001) и участие магнитного поля в процессе торможения сомнительно (Глаголевский, 2003в). В таком случае большие периоды вращения скорее всего присущи маломассивным CP-звездам изначально (“магнитное” торможение могло иметь место в том случае, если на ранних стадиях эволюции холод-

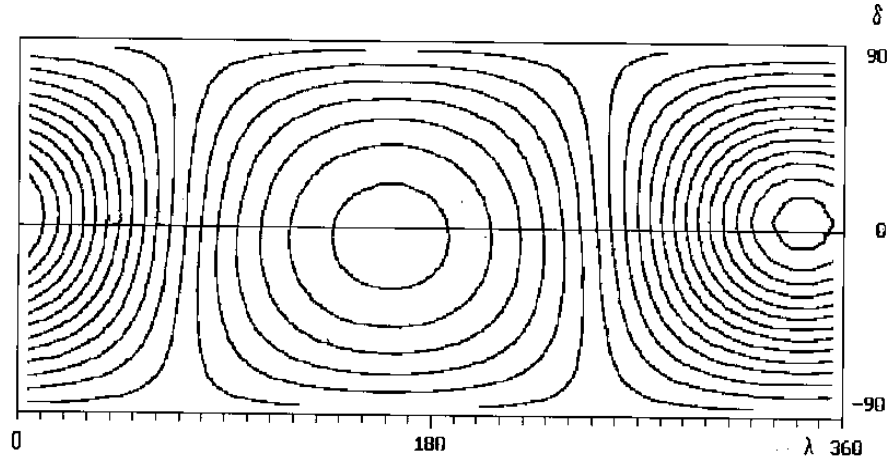
ные CP-звезды прошли конвективную фазу звезд TТaу, у которых магнитное поле наблюдается).

Параметры, принятые нами как наиболее вероятные, приведены в табл. 6. Амплитуды переменности взяты из упомянутых выше источников, они приблизительно одинаковы по величине у всех изучаемых звезд.

2. Интересна проблема смещенного диполя. Смещение во всех случаях происходит вдоль оси диполя. Это означает, что фазовые зависимости $Be(P)$ и $Bs(P)$ не соответствуют друг другу по амплитуде. Для приведения их в соответствие приходится диполь сдвигать так, чтобы скомпенсировать разницу. По-видимому, недостаточна амплитуда Be . Очевидно, что из двух возможных вариантов модели более вероятна та, которая требует наименьшей компенсации. Пока нет достаточного количества данных для того, чтобы предполагать,

Таблица 6: *Probable parameters of the studied stars*

Star	Type	P	i	β	Bp , G	ΔV
HD2453	SrCrEu	521 ^d	14°	80°	±6560	0 ^m 02
HD12288	SrCrEu	34.5	24	66	±13400	0.02
HD200311	Si+	52	30	86	+18520 -11420	0.03

Рис. 8: Меркаторская карта распределения напряженности магнитного поля по поверхности HD200311 для смещенного диполя и большого угла β .

какова причина этого несоответствия — методическая или физическая. Уменьшение амплитуды изменения или B_s может быть вызвано многими методическими причинами: плохим спектральным разрешением, сложной конфигурацией поля, блендированием линий и т.д., а также неравномерным распределением химических элементов по поверхности. В случае реальной асимметрии поля можно было предполагать, что сдвиг диполя должен быть в любом направлении, а не только вдоль оси диполя.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта программы “Астрономия”

Список литературы

Адельман (Adelman S.J.), 1997, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **122**, 249
Вейд и др. (Wade G.A., Elkin V.G., Landstreet J.D., Romanyuk I.I.), 1997, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **297**, 748
Вейд и др. (Wade G.A., Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I., Landstreet J.D., Mathys G.), 2000, *Astron. Astrophys.*, **355**, 1080
Вольф, Моррисон (Wolff S.C., Morrison N.D.), 1973, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **85**, 141
Герт, Глаголевский (Gerth E., Glagolevskij Yu.V.), 2000, in: “Magnetic fields of CP and related stars”, eds.:

Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I., Moscow, 151
Герт, Глаголевский (Gerth E., Glagolevskij Yu.V.), 2004, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, **55** (in press)
Герт и др. (Gerth E., Glagolevskij Yu.V., Scholz G.), 1997, in: “Stellar magnetic fields”, eds.: Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I., Moscow, 67
Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 2001, *Astrophysics*, **44**, 121
Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 2002, *Astron. Astrophys.*, **382**, 935
Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 2004, *Astrophysics*, (in press)
Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 2003a, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, **56**, 15 (in press)
Глаголевский (Glagolevskij Yu.V.), 2003, *Astrophysics*, **46**, 319
Глаголевский, Чунтонов (Glagolevskij Yu.V., Chountonov G.A.), 2001, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, **51**, 88
Каталано, Ренсон (Catalano F.A., Renzon P.), 1998, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **127**, 421
Ландстрит, Матис (Landstreet J.D., Mathys G.), 2000, *Astron. Astrophys.*, **359**, 213
Матис и др. (Mathys G., Hubrig S., Landstreet J.D., Lanz T., Manfroid J.), 1997, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **123**, 353
Степень (Stepien K.), 2000, *Astron. Astrophys.*, **353**, 227
Хелек и др. (Khalack V.R., Khalack Yu.N., Schavrina A.V., Polosukhina N.S.), 2001, *Astron. Zh.*, **78**, 655