

УДК 523.3; 524.31.02.-36

## Особенности вращения магнитных CP-звезд

*Романюк И.И., Семенко Е.А.*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

Поступила в редакцию 12 декабря 2005

**Аннотация.** Исследуются особенности вращения магнитных CP-звезд. Известно, что величины  $v_e \sin i$  для них примерно в 3–4 раза ниже, чем у нормальных звезд ГП той же температуры. Мы показали, что среди холодных объектов с аномалиями Sr, Cr, Eu нет быстровращающихся, поля сложной конфигурации встречаются только у быстрых ротаторов. Хотя магнитные поля медленных ротаторов в 2 раза меньше, чем у быстрых, этого, однако, недостаточно для объяснения возникновения крупномасштабного магнитного поля CP-звезд механизмом динамо, реликтовая теория подтверждается наблюдениями в большей степени.

---

## 1 Введение

Вращение – наряду с массой и температурой – один из фундаментальных параметров звезд. 80 лет тому назад Г.А. Шайн и О. Струве впервые предложили и потом применили метод определения скорости вращения (точнее, ее проекции на луч зрения –  $v_e \sin i$ ) звезд разных типов на основании измерений ширин линий. Сами экваториальные скорости вращения  $v_e$  находятся затем при помощи моделирования. Работа имела фундаментальное значение: было установлено, что быстрее всех вращаются звезды ранних типов – O-A, в то время как у спектральных классов G, K, M признаки осевого вращения практически отсутствуют (Копылов, 1995).

Цель предлагаемой работы – анализ особенностей вращения магнитных химически-пекулярных (CP) звезд. Хотя они и являются объектами Главной последовательности, но по такому параметру как вращение, кардинально отличаются от нормальных звезд тех же спектральных классов. Так как массы и светимости CP-звезд разных типов находятся в достаточно узких интервалах значений – трудно найти какие-либо зависимости между указанными параметрами и величиной магнитного поля. В то же время известно, что периоды вращения CP-звезд расположены в интервале от долей суток до десятков лет, поэтому имеет смысл поискать различные зависимости.

Большинство магнитных CP-звезд (Ap/Bp-звезд) показывают синхронную фотометрическую, спектральную и магнитную переменность, которая надежно интерпретируется моделью наклонного ротатора – вращением звезды с химически неоднородной поверхностью и дипольным магнитным полем, ось диполя наклонена к оси вращения (Хохлова, 1983). Зная период вращения и радиус звезды, можно независимо определить скорость ее вращения.

Существуют различные теории образования магнитных полей CP-звезд, которые в итоге сводятся к двум: 1) реликтовой, в которой магнитное поле возникло вместе со звездой из межзвездной среды и 2) динамо в ядре, в которой генерация поля продолжается и в настоящее время.

Обе теории имеют существенные недостатки и не могут полностью объяснить наблюдения. Однако наблюдаемые следствия работы различных механизмов разные. В частности, в теории динамо поле пропорционально скорости вращения звезды, в реликтовой – подобные зависимости не ожидаются. Например, Мосс (2001) приводит аргументы, что если поле генерируется механизмом динамо, то звезда с периодом вращения 10 суток должна иметь поле в 20 раз сильнее, чем с периодом 10 лет. Поэтому, исследуя поля быстрых и медленных ротаторов, можно попытаться найти механизмы образования магнитных полей Ap/Vr звезд.

## 2 Определение скорости вращения Ap/Vr звезд.

Сравнение показывает, что средние скорости вращения  $v_e \sin i$  нормальных A-звезд составляют примерно 100–150 км/с. Максимум распределения скоростей вращения магнитных Ap-звезд приходится на 50 км/с. В свою очередь, внутри класса магнитных звезд также существуют различия: наиболее быстрое вращение демонстрируют более горячие звезды с кремниевыми аномалиями ( $v_e \sin i \geq 100$  км/с), более холодные и менее массивные SrCrEu-звезды вращаются со скоростями существенно меньшими. Надежно доказано, что в произведении  $v_e \sin i$  малой величиной является скорость вращения  $v_e$ : наблюдается обратная зависимость между периодами и скоростями вращения.

Внедрение ПЗС матриц в наблюдения по сравнению с фотопластинкой позволило с высокой точностью сравнивать наблюдаемый спектр с синтетическим и определять величину  $v_e \sin i$  для Ap/Vr звезд с точностью порядка 1 км/с.

В спектрах магнитных звезд с медленным вращением ( $v_e \sin i < 10$  км/с) и сильным полем ( $B_e > 10$  кГс) можно найти расщепленные зеемановские компоненты и по ним определить поле на поверхности звезды  $B_s$  (например, Престон, 1972). Скорости вращения таких звезд находят исключительно по периодам вращения. Для быстрых ротаторов предложены методы доплер-зеемановского картирования (Хохлова, 1983; Пискунов, 2001, и др.).

При исследовании вращения магнитных звезд не следует забывать, что эффект Зеемана приводит к магнитному уширению линий, поэтому для определения  $v_e \sin i$  надо использовать линии с малым фактором Ланде (желательно, с нулевым). Лучше всего подходит неблендированная линия Fe II 4508Å с фактором Ланде 0.5.

## 3 Анализ периодов вращения

Вопрос о существовании магнитного торможения на Главной последовательности в настоящее время решен, в частности, вследствие изучения И.М. Копыловым и его группой магнитных звезд в скоплениях разного возраста (Копылов, 1987): магнитного торможения на ГП не наблюдается.

Проведем разбиение выборки магнитных звезд на 4 группы: 1) с периодами до 3 суток – очень быстрые ротаторы; 2) от 3 до 30 суток – быстрые; 3) от 30 до 300 – медленные и 4) более 300 суток – очень медленные ротаторы.

Предположение о наклонном ротаторе в сочетании с известными радиусами Ap/Vr-звезд ( $1.5\text{--}5R_\odot$ ) позволяет независимым методом определять скорости вращения, ориентацию оси вращения в пространстве, а также наклон магнитной оси к оси вращения. Для определения скорости служит формула

$$v_e = 50.6R/P,$$

где радиус звезды  $R$  выражен в радиусах Солнца, а период  $P$  – в сутках.

Рассмотрим зависимость “период вращения-температура” для магнитных CP-звезд (рис. 1). Из рисунка 1 видно, что нижняя граница периода (около 0.5 суток) справедлива во всем рассматриваемом диапазоне температур. В то же время среди горячих звезд не наблюдается медленных ротаторов. На рисунке не приведены (из-за масштабного фактора) около 20 медленных ротаторов с периодами вращения более 70 суток. Все они холодные звезды в интервале температур 7500–9000 К.

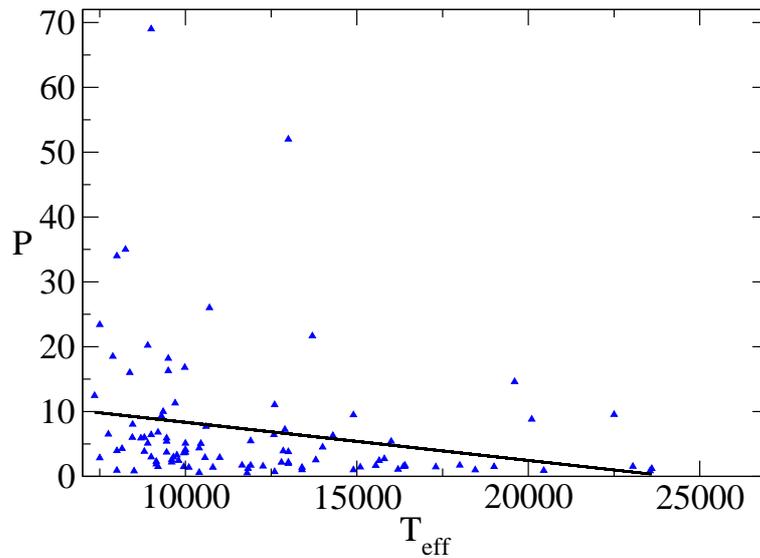


Рис. 1. Зависимость “Период вращения-температура” для магнитных CP-звезд

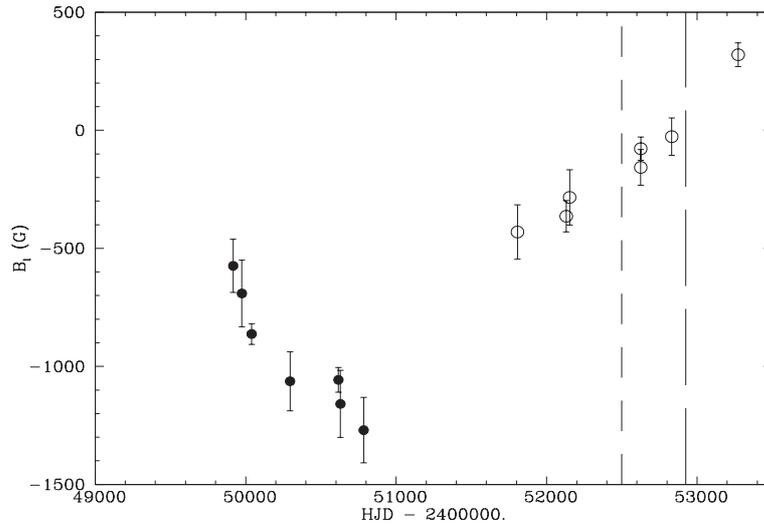
#### 4 Исследование зависимости величины и топологии магнитных полей CP-звезд от скорости их вращения

На 6-м телескопе развернута большая программа исследований магнитных звезд, имеющих разные скорости вращения, с целью выбора механизма образования их глобальных магнитных полей. Особое внимание было уделено очень медленным ротаторам – звездам с периодами вращения годы и десятилетия. У таких звезд не должно быть очень сильных магнитных полей, если за их возникновение отвечает динамо-механизм (Романюк, 2004). За 15 лет наблюдений мы увеличили список таких объектов с 5 до 16. Всего нами было проанализировано более 90 магнитных кривых CP-звезд с различными периодами вращения. Детальный анализ проблемы проведен в работе (Романюк, 2004), здесь рассмотрим основные выводы.

##### 4.1 Медленные ротаторы

Наша выборка медленных ротаторов состоит из 26 звезд, из которых 16 имеют периоды более 300 суток. Согласно результатам нашего анализа (Романюк, 2004), у них наблюдаются достаточно сильные магнитные поля. С другой стороны, ни одна из звезд-медленных ротаторов не имеет сверхсильных полей и полей сложной, недипольной структуры. Для 24-х из 26-ти звезд экстремальное значение поля  $B_e$  не превосходит 3 кГс и поверхностное поле  $B_s$  – 10 кГс. Большинство медленных ротаторов относятся к классу относительно холодных SrCrEu-звезд. Среди них нет ни одной звезды с аномальными линиями гелия и практически нет звезд с аномалиями содержания кремния. Среднее значение экстремального значения продольной компоненты  $B_e$  для 16 очень медленных ротаторов составляет  $1680 \pm 220$  Гс.

Наибольшие периоды вращения (около 75 лет) найдены у звезд  $\gamma$  Eri и HD 137949. В максимуме величина поля  $B_e$  для этих объектов достигает, соответственно, -1100 Гс и +1900 Гс. Это демонстрирует, что большие поля среди медленных ротаторов не являются уникальным явлением. Более половины очень медленных ротаторов являются пульсаторами –  $\alpha$ Cr-звездами. Эти пульсации (с характерным временем от 6 до 15 мин.) не связаны с вращением. На рис. 2 представлены измерения магнитного поля у очень медленного ротатора – звезды HD 965. Наблюдения получены в Чили (ESO) и в CAO на БТА (заштрихованные и светлые точки, соответственно) (Елькин и др., 2005). Период магнитной переменности явно превышает 10 лет,



**Рис. 2.** Кривая магнитной переменности звезды HD 965. Штриховые вертикальные линии ограничивают период фотометрических наблюдений

пульсации в области магнитного экватора не наблюдаются (подробности см. в указанной выше статье).

Что касается конфигурации магнитных полей медленных ротаторов, то она практически не отличается от дипольной.

## 4.2 Быстрые ротаторы

Звезды с периодами вращения от 3 до 30 суток могут иметь как доплеровские профили, так и зеемановские (в случае сильного поверхностного поля). Изучение очень быстрых ротаторов ( $P < 3^d$ ) проводится исключительно методами доплер-зеемановского картирования. Как уже говорилось ранее, результатом такой процедуры является локальное, а не усредненное по видимой поверхности, поле.

Размер выборки быстрых ротаторов существенно больше, чем медленных – более 100 объектов. Однако не для всех из них имеется достаточное количество наблюдений. Надежные кривые  $B_e$  построены для 40 быстрых ротаторов, из них только для девяти звезд имеются измерения поверхностного поля  $B_s$ . Среднее значение экстремального поля составляет  $B_e = 2400 \pm 300$  Гс, что примерно в 1.5 раза больше, чем у медленных ротаторов, и на порядок меньше предсказаний теории динамо.

Наибольших значений продольная компонента достигает у звезд с периодами от 5 до 10 суток, среднее значение  $B_e$  у звезд, попадающих в этот диапазон, достигает  $3080 \pm 480$  Гс.

Все известные магнитные звезды с полями сложной конфигурации являются быстрыми ротаторами. В качестве примера на рис. 3 представлен участок спектра звезды с усиленными линиями гелия HD 37776. Период ее вращения  $P$  составляет  $1.539^d$  суток. HD 37776 обладает самым сильным из всех известных магнитных CP-звезд полем (вплоть до 70 кГс на поверхности) (Романюк и др., 1997).

На рисунке хорошо видно, как сильное магнитное поле искажает профили линий. Вместе с расщепленными компонентами мы также наблюдаем проявления кросс-овер эффекта. Сильное поле должно приводить к переменности поляризации с вращением звезды, что мы и можем увидеть на рис. 4, где приведено распределение V-параметра Стокса в линии гелия  $5876\text{\AA}$  с фазой вращения.

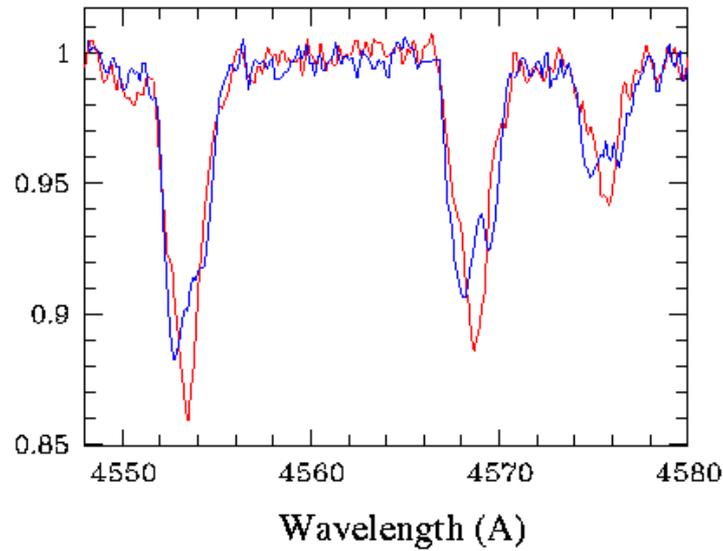


Рис. 3. Участок зеемановского спектра звезды HD 37776

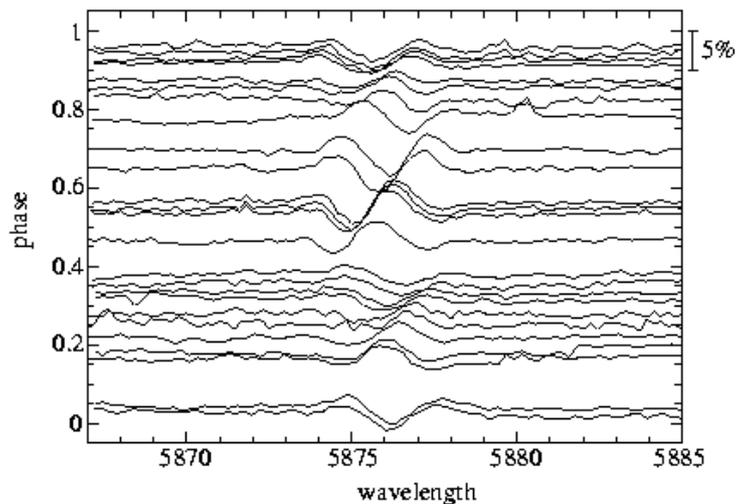


Рис. 4. Переменность V-параметра Стокса линии гелия 5876Å с фазой вращения звезды HD 37776

### 4.3 Некоторые другие зависимости от вращения

Одним из признаков принадлежности звезды к классу магнитных является высокий индекс пекулярности звезды  $\Delta a$  (Maitzen, 1976). Подробно связи между величиной  $\Delta a$  и магнитным полем рассмотрены в работе (Романюк, 2004). Некоторые главные выводы приведены ниже.

Таблица 1 демонстрирует нам увеличение индекса  $\Delta a$  с увеличением периода вращения для одной и той же температуры в интервале 8000–11000 К. Для более подробного сравнения весь интервал температур был разбит на три подынтервала. Несмотря на отчетливо просматривающуюся тенденцию к увеличению индекса пекулярности с периодом, мы полагаем нужным отметить малый размер выборки.

Магнитные поля, как уже отмечалось ранее, достигают максимальных значений при периодах

Таблица 1. Зависимость индекса пекулярности  $\Delta a$  от вращения и температуры

Периоды, сутки	Средние $\Delta a$	Количество звезд	Интервал температур
$P < 3$	$36 \pm 5$	9	10000–11000
$3 < P < 30$	$54 \pm 7$	4	
$P > 30$	67	1	
$P < 3$	$35 \pm 3$	10	9000–10000
$3 < P < 30$	$44 \pm 5$	10	
$P > 30$	$49 \pm 15$	3	
$P < 3$	16	1	8000–9000
$3 < P < 30$	$40 \pm 14$	12	
$P > 30$	$55 \pm 5$	4	

от 5 до 10 суток, очень медленные ротаторы имеют наиболее слабые поля. И в целом, зависимость величины от периода слабая.

Рассмотрим теперь частоту встречаемости магнитных пекулярных звезд в скоплениях.

Из 26 объектов с аномально ослабленными линиями гелия (He-wk звезды) и известными периодами вращения, 20 являются членами разных скоплений.

Среди 17 звезд с периодами менее 3 суток – 16 (94%) входят в скопления, среди остальных девяти с периодами более трех суток, членами скоплений являются только три звезды. Этот факт может иметь некоторый смысл при рассмотрении эволюции магнитных звезд.

Среди более холодных кремниевых звезд относительное число звезд-членов скоплений меньше. Из нашей выборки только 9 из 33 (27%) объектов типа Si и 7 из 28 (25%) звезд типа Si+ с известными периодами являются членами скоплений.

Что касается наиболее холодных SrCrEu-звезд, то для подобного анализа у нас еще не достаточно материала. Распределение поля среди звезд с различными видами пекулярности представлено на рис. 5.

## 5 Пространственное распределение и кинематика mCP-звезд

За некоторыми исключениями, пространственное распределение и кинематика CP-звезд соответствуют таковым для нормальных звезд. Однако, можно выделить некоторые особенности.

Среди 51 реверсивной звезды (т.е. меняющей знак поля на противоположный при вращении) 11 звезд являются членами скоплений, тогда как из 83 нереверсивных в скоплениях встречаются 35. В процентном соотношении это, соответственно, составит 22% и 42%. Нулевая гипотеза отвергается на уровне 0.1%. В качестве объяснения наблюдаемых особенностей можно предположить, что либо пекулярности видны преимущественно с полюсов, либо это реальный факт, отражающий преимущественную ориентацию звезд в скоплениях по сравнению со звездами фона. Кроме того, звезды с различной конфигурацией поля по разному распределены относительно спирального рукава Ориона Галактики. В таблице 2 приведены данные о пространственном распределении звезд с разной ориентацией магнитной оси.

Вероятность случайного возникновения столь существенного различия в распределении нереверсивных звезд, вычисленная исходя из биномиального распределения, составляет лишь 0.02%. В качестве подтверждения факта различной пространственной ориентации можно привести данные о магнитных звездах в скоплении Скорпиона-Центавра. В этом скоплении из 16 магнитных звезд 13 – нереверсивные, из которых, в свою очередь, 10 – нереверсивные (–) и лишь три – реверсивные, что указывает на то, что в локальных объемах может иметь место выстроенность магнитных осей.

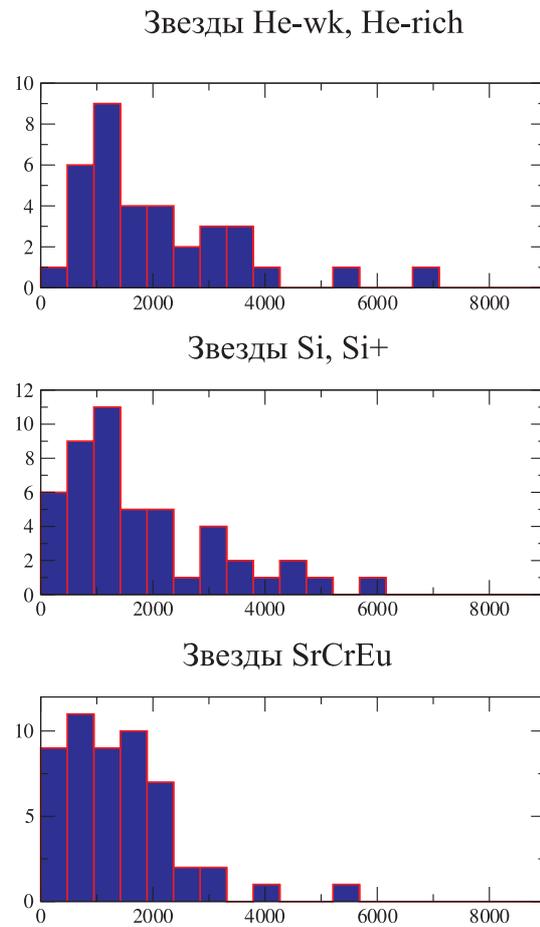


Рис. 5. Распределение звезд по величине магнитного поля для звезд различного типа пекулярности

Таблица 2. Пространственное распределение звезд с различной конфигурацией поля

Тип звезд	Вдоль рукава	Поперек рукава
Реверсивные	15	21
Нереверсивные (+)	13	13
Нереверсивные (-)	5	26

## 6 Выводы

Исходя из всего вышесказанного можно сделать несколько выводов. В первую очередь, что магнитное поле у звезд с периодом вращения в несколько суток примерно в два раза больше, чем у звезд с периодом в несколько лет. Однако, это различие существенно меньше величины, предсказываемой теорией динамо. Во-вторых, поля сложной структуры наблюдаются только у быстрых ротаторов. И, в-третьих, наблюдательные данные в большей степени подтверждают реликтовую теорию происхождения магнитных полей CP-звезд.

Авторы благодарят Д.О. Кудрявцева и Г.А. Чунтонова за помощь в проведении наблюдений, Российский Фонд Фундаментальных исследований – за частичную финансовую поддержку (РФФИ грант 03-02-16342).

## Литература

- Елькин и др. (Elkin V.G., Kurtz D.W., Mathys G., Wade G.A., Romanyuk I.I., Kudryavtsev D.O., Smolkin S.) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2005. V. 358. P. 1100.
- Копылов И.М. // *Астрофиз.исслед. (Изв. САО)*. 1987. Т. 24, С. 44.
- Копылов И.М. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1995. Т. 90. С. 11.
- Майтцен (Maitzen H.M.) // *Astron. Astrophys.* 1976. V. 51, N. 2, P. 223.
- Мосс (Moss D.) // *Magnetic fields across the Hertzsprung-Russel diagram*. Eds: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe: ASP conf. Series. 2001. 248. P. 309.
- Пискунов (Piskunov N.E.) // *Magnetic fields across the Hertzsprung-Russel diagram*. Eds: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe: ASP Conf. Series. 2001. 248. P. 293.
- Престон (Preston G.) // *Astrophys. J.* 1972. V. 175. P. 465.
- Романюк (Romanyuk I.I.) // *Magnetic stars*. Eds: Yu.V. Glagolevskij, D.O. Kudryavtsev, I.I. Romanyuk: Nizhnij Arkhyz. 2004. P. 33.
- Романюк И.И. и др. (Romanyuk I.I., Elkin V.G., Kudryavtsev D.O., Landstreet J., Wade G.) // *Bull. SАО*. 1998. V. 45. P. 93
- Хохлова В.Л. // *Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ*. 1983.