

УДК: 524.3

## НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕДЛЕННОГО ВРАЩЕНИЯ СР-ЗВЕЗД

Ю.В. ГЛАГОЛЕВСКИЙ

Поступила 30 декабря 2004

Принята к печати 30 января 2005

Рассмотрены некоторые трудности объяснения медленного вращения СР-звезд. Наиболее вероятные гипотезы: 1) потеря момента вращения с участием магнитного поля на фазах эволюции "до Главной последовательности" и 2) медленное вращение было с самого начала рождения звезд. В пользу гипотезы торможения говорит только одно свойство СР-звезд - чем меньше масса звезды, тем больше отличие ее средней скорости вращения  $\omega_{\text{ср}}$  от нормальных звезд. С другой стороны, имеется другое свойство - чем меньше скорость вращения СР-звезд, тем больше их доля среди нормальных звезд. Последнее свойство поддерживает гипотезу, что чем меньше начальная скорость вращения звезды при ее рождении, тем больше вероятность стать химически пекулярной. Это свойство присуще как химически пекулярным звездам с магнитным полем, так и без поля. Высказано предположение, что причину медленного вращения СР-звезд следует искать в самых начальных фазах формирования, а также причину разделения на химически пекулярные магнитные, химически пекулярные немагнитные и нормальные.

1. *Введение.* Медленное вращение химически пекулярных звезд СР является одним из их основных свойств. Все авторы отмечают трудности объяснения очень больших периодов холодных СР-звезд,  $P > 25^d$ . Большое количество работ посвящено проблеме потери момента вращения с участием магнитного поля. В работе [1] отмечаются четыре возможных причины потери момента вращения СР-звезд:

- 1) медленное вращение передалось уже от межзвездных облаков, из которых образовались СР-звезды;
- 2) потеря момента вращения происходит на ранних фазах коллапса звезды;
- 3) медленные ротаторы появляются на интенсивной стадии коллапса, момент вращения они теряют в фазе "до-ГП";
- 4) потеря момента вращения происходит на ГП.

В настоящее время установилось достаточно твердое мнение, что магнитное поле химически пекулярных (СР) звезд имеет реликтовую природу (см., например, [2]), поэтому надо рассматривать возможности торможения с участием магнитного поля уже на самых первых этапах рождения звезд из намагниченных протозвездных облаков.

Считается, что звезды со средними массами  $M > 1.5 - 2 M_{\odot}$ , к которым относятся магнитные СР-звезды, на ранних стадиях эволюции, вплоть до Главной последовательности, остаются конвективно устойчивыми [3],

так что, в принципе, нет факторов, разрушающих магнитное поле, кроме аккреции. Звезды с большими массами имеют конвективные ядра и радиативную оболочку (только очень слабые конвективные зоны вследствие наличия одно- и двукратной ионизации гелия), звезды с  $M < 1.5 - 2 M_{\odot}$  имеют радиативные ядра и конвективные оболочки. У таких звезд реликтовое магнитное поле в верхних слоях должно полностью разрушиться. Если посмотреть на эволюционные треки, то видно, что самые холодные CP-звезды SrCrEu типа в прошлом могли пройти полностью конвективную фазу. В течение конвективной фазы реликтовое поле должно быть у них разрушено, а если оно заменилось на "поле-динамо", то, вероятно, среди CP-звезд должны появиться два типа звезд с разными свойствами магнитного поля: часть с реликтовым полем и часть с динамо-полем. Одна из проблем магнитных звезд состоит в том, что неизвестно, какова должна быть структура динамо-поля, если оно генерировалось у поздних CP-звезд. Ясно только, что величина динамо-поля  $V$  должна быть пропорциональна угловой скорости  $\Omega$ . Действительно, такая слабая зависимость была найдена [4,5] и ее следовало бы исследовать внимательно.

Другая проблема обсуждается в работе [2] и она заключается в следующем. Обычно считают, что магнитное поле сжимается вместе с намагниченным протозвездным облаком, и таким образом мы наблюдаем остаточное магнитное поле. Звезда внутри себя сохраняет направление магнитного поля облака. Но в настоящее время считается, что молодые звезды возникают с массами  $M \approx 0.1 M_{\odot}$  с небольшой конвективной оболочкой, которая быстро исчезает, и затем звезда становится радиативной. На нее происходит мощная аккреция, вызывающая ударные волны и зоны неустойчивости, в условиях которых трудно ожидать сохранность реликтового (из протозвездных облаков) магнитного поля. Аккреция происходит вплоть до выхода звезды на Главную последовательность. Эта ситуация плохо изучена.

Предположение наличия реликтового поля у молодых звезд обычно используют для объяснения низких скоростей вращения CP-звезд с помощью механизмов "магнитного" торможения. Слабо изучены возможные механизмы разделения звезд на магнитные и нормальные.

2. *О механизмах магнитного торможения.* Магнитное поле всегда существует в родительских облаках и его влияние на процессы эволюции молодых звезд несомненно. Если поле магнитных звезд реликтовое, то совершенно ясно, что все звезды, и те, которые в будущем стали магнитными, и те, которые впоследствии оказались нормальными, на ранних стадиях эволюции были намагниченными в той или иной степени. Проблема состоит в том, что неизвестен механизм их разделения. Если потеря момента вращения происходила с участием

магнитного поля, то торможение произошло после разделения.

Рассматривалось несколько механизмов потери момента вращения. Основные из них следующие.

Эффект потери момента с участием ветра и магнитного поля был изучен в [6-8] и др. Фактор потери массы имеет большое значение в фазе эволюции "до ГП" [9]. Шкала времени для магнитного торможения слабо зависит от начального углового момента и от плотности межзвездного вещества. Потеря момента происходит потому, что магнитное поле поддерживает вращение ветра до расстояния  $R$ , на котором скорость ветра достигает альвеновской скорости. В пределах зоны ветра дипольное поле достаточно сильно, чтобы заставлять поток следовать за полем и вращаться вместе со звездой. По ту сторону от этой границы газовый поток увлекает поле вместе с собой и каждый элемент уносит (сохраняет) его угловой момент. Уменьшение углового момента имеет порядок  $M \times \Omega R^2$ , где  $M$  - темп потери массы,  $\Omega$  - угловая скорость. Основные факторы торможения - это время торможения и величина магнитного поля. Оценки показывают [10], что массивные СР-звезды затормозятся за время  $10^7$  лет, а маломассивные за  $10^8$  лет. Особенно сильно этот эффект может играть роль у поздних звезд, имеющих сильно развитую конвективную оболочку, в которой предполагается генерация магнитного поля. Она вырабатывает горячую корону, дающую термический ветер. Не исключено, что этот механизм обеспечивает резкий спад скоростей вращения у звезд, холоднее 7000 К (см. далее). К сожалению, в этом механизме не совсем ясна роль ориентации магнитного поля в звезде.

Аккреционный механизм разработан в [7,11,12] и др. Взаимодействие аккрецирующего вещества с магнитным полем способно также затормозить звезду до наблюдаемых значений. Сильное магнитное поле должно останавливать аккрецию на расстоянии  $r$ , на котором плотность магнитной энергии сравнима с кинетической энергией падающего вещества. На этой границе межзвездное вещество поддерживается магнитным полем, а под границей область лишена газа. Оказывается, что такая ситуация нестабильна, и газ проникает в область магнитосферы посредством эффекта нестабильности Релея-Тейлора. Внутри рассматриваемой границы газ вовлекается во вращение, двигаясь вдоль силовых линий к экватору, если центробежная сила превышает силы гравитации ( $\Omega^2 r > GM$ ). В конце концов газ освобождается от силовых линий, покидает магнитосферу, унося момент вращения. В этой модели тоже главный фактор - это время торможения и величина поля [7]. К сожалению, в этом механизме также не совсем ясна роль ориентации магнитного поля в звезде.

Флэк [13] рассматривает вращающуюся звезду с сильным дипольным полем  $B_p$  с осью диполя, наклоненной на угол  $\beta$  к оси вращения,

находящуюся в однородном межзвездном магнитном поле. Вращение звезды с угловой скоростью  $\Omega$  будет генерировать тороидальное магнитное поле  $B_\phi$ , и сопровождающиеся магнитные напряжения производят общий вращающий момент  $\tau$ , тормозящий звезду. Индуцированное вращением тороидальное магнитное поле может рассматриваться как возмущение полоидального поля звезды. Эти возмущения, по существу, это петли полоидальных силовых линий, которые распространяются как альвеновские волны в окружающее пространство, перенося энергию и угловой момент. Только те силовые линии, которые выходят из магнитных полярных областей и которые соединяют дипольное поле звезды с межзвездным полем, эффективны в переносе углового момента от звезды с фоновым межзвездным пространством. На низких магнитных широтах силовые линии возвращаются к звезде как замкнутые петли, создавая "мертвую зону", которая не переносит никакого углового момента. Время торможения  $2.5 \cdot 10^9$  лет для звезд с диполем, параллельным оси вращения, и  $3.4 \cdot 10^6$  лет для перпендикулярного случая.

Степиень [1] рассмотрел влияние аккреции из диска вдоль магнитных силовых линий, взаимодействие поля с диском и намагниченный ветер в фазах эволюции "до ГП". Влияние диска способно затормозить звезду до нескольких дней. Влияние ветра в отсутствие диска может затормозить звезду уже до более длительных периодов. Степиень и Ландстрит [14] приводят аргументы в пользу предположения, что диск на стадии "до ГП" исчезает раньше, чем звезда достигнет ZAMS, вследствие чего возникают условия для значительной потери момента вращения некоторыми магнитными звездами с участием ветра, в отсутствие влияния диска. Длительность существования диска зависит от ориентации магнитного поля звезды по отношению к плоскости диска. Чем ближе ось диполя к оси вращения звезды, тем быстрее диск исчезает. Поэтому большие периоды должны наблюдаться у звезд с близкими осями. Причем, такие свойства возможны только у звезд с массами, меньше  $3M_\odot$  вследствие достаточной длительности процесса торможения.

Интересно, что все эти механизмы не имели возражений в научной литературе и, по-видимому, в самом деле должны иметь место. В то же время каждый из авторов приводит веские аргументы в пользу того, что каждый из механизмов может привести к достаточной потере момента вращения для объяснения наблюдаемых значений. Никто не пытался осмыслить действие всех механизмов одновременно. Возможно, для этого достаточно тех слабых (вследствие разрушения аккрецией) поверхностных магнитных полей, которые возможны у молодых звезд.

*3. Трудности гипотезы торможения Степиена и Ландстрита.*  
Большая роль ориентации магнитного поля в звезде достаточно подробно

описана только в механизмах Флэка, Степиена и Ландстрита. Трудность последней гипотезы состоит в том, что современные измерения не подтверждают преобладание малых углов между осью вращения и осью диполя  $\beta$  у самых медленных ротаторов. Это видно из табл.1. Среднее значение  $\beta = 57^\circ$  для звезд с большими периодами, что близко статистическому среднему значению при произвольной ориентации диполей  $\beta = 63^\circ$  и близко значению для быстровращающихся звезд. Из этой же таблицы видно, что ориентация диполей в быстровращающихся звездах тоже

Таблица 1

## ОРИЕНТАЦИЯ ДИПОЛЕЙ ВНУТРИ ЗВЕЗД С РАЗНЫМИ ПЕРИОДАМИ ВРАЩЕНИЯ

Звезда	$P$	$\beta$	$i$	Модель
$P < 25^d$				
4778	2.6	$65^\circ$	$70^\circ$	Диполь (1)
24712	12.5	33	49	Диполь (1)
37776	1.5	0	90	Смещенный диполь (2)
62140	4.3	87	90	Диполь (1)
65339	8.0	82	62	Смещенный диполь (3)
		$75^\circ$	70	Диполь (1)
71866	6.8	90	70	Диполь (1)
80316	2.1	35	60	Диполь (1)
98088	5.9	80	85	Диполь (1)
108662	5.1	60	55	Диполь (1)
112185	2.9	82	51	Диполь (4)
112413	5.5	87	45	Диполь+квадруполь (5)
		79	50	Диполь (2)
115708	5.1	87	55	Диполь (6)
		75	50	Диполь (1)
118022	3.7	60	25	Диполь (1)
119419	2.6	5	89	Смещенный диполь (6)
124224	0.5	87	60	Смещенный диполь (7)
137909	18.5	90	15	Квадруполь (8)
		80	20	Диполь (1)
147010	3.9	23	67	Диполь+квадруполь (4)
152104	3.9	40	15	Диполь (1)
192678	6.4	70	8	Смещенный диполь (9)
		60	10	Диполь (1)
Среднее		63	53	
$P > 25^d$				
2453	521	80	14	Диполь (10)
12288	34	66	24	Диполь (10)
116458	148	12	75	Смещенный диполь (13)
126515	130	86	22	Смещенный диполь (13)
165474	23	80	80	Диполь (1)
188041	224	20	20	Диполь (1)
200311	52	86	30	Смещенный диполь (10,11)
201601	-70 лет	50	77	Диполь+квадруполь (12)
Среднее		60	43	

## Литература к табл.1.

1. *J.L.Leroy*, in: Stellar magnetic fields, eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, Moscow, p.30, 1997.
2. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, in: Magnetic Fields Across the HR Diagram, eds. G.Mathys, S.K.Solentci, D.T.Wickramasinghe, ASP Conf. Ser., p.158, 2001.
3. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij, G.Scholz*, in: Magnetic Fields of Chemically Peculiar Stars, eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, M., p.158, 2000.
4. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, Bull. Spec. Astrophys. Observ., 46, 123, 1999.
5. *E.Gerth, Yu.V.Glagolevskij, G.Hildebrandt, H.Lehman, G.Scholz*, Astron. Astrophys., 351, 133, 1999.
6. *Yu.V.Glagolevskij*, Astrophysics, 44, 123, 2001.
7. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, Astron. Astrophys., 382, 935, 2002.
8. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, in: Magnetic stars., eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, D.O.Kudryavtsev, 2004 (in press).
9. *Yu.V.Glagolevskij*, Bull. Spec. Astrophys. Observ., 50, 7, 2000.
10. *Yu.V.Glagolevskij*, Bull. Spec. Astrophys. Observ., 58, 2004, (in press).
11. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, in: Magnetic Fields of Chemically Peculiar Stars, eds. Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk, M., p.161, 2000.
12. *G.Scholz, G.Hildebrandt, H.Lehman, Yu.V.Glagolevskij*, Astron. Astrophys., 325, 529, 1997.
13. *Ю.В.Глаголевский*, Астрон. ж., 2005, (в печати).

нормальная. Поскольку теоретически ориентация диполей относительно оси вращения играет, как можно предполагать, большую роль в процессе торможения и ветром, и аккрецией, следует признать что одинаковая ориентация быстрых и медленных ротаторов также противоречит предположению о влиянии магнитного поля на скорости вращения СР-звезд.

Ранее [15] мы уже обращали внимание на то, что маломассивные СР-звезды могли на ранних стадиях эволюции пройти через конвективную фазу. Если часть маломассивных СР-звезд прошла конвективную фазу и испытала дополнительное магнитное торможение вследствие термического ветра, а более массивные звезды нет, то должна быть какая-то граница в свойствах. До сих пор не было замечено такой границы. Если СР-звезды проходили конвективную фазу и динамо-поле заменило реликтовое поле, то величина поля и его конфигурация должны отличаться от того, что наблюдается у остальных СР-звезд. Этого тоже не замечено, кроме экстремально больших периодов вращения у 12% СР-звезд. В работе [15] мы показали, что для самых медленных ротаторов намечается слабая зависимость  $P \propto 1/B_p$ , противоречащая механизму "магнитного" торможения. Необходимы усилия по моделированию конфигураций поля, которые могли бы продемонстрировать различие структур динамо и реликтового полей.

#### 4. О потере момента вращения на Главной последовательности.

Одна из главных проблем - где происходит торможение, на ГП или до ГП. Если до ГП, то следует ожидать корреляцию между  $\sin i$  и  $T_p$ , потому что горячие звезды эволюционируют быстрее. Если потеря момента происходит на ГП, то  $\sin i$  должна коррелировать с возрастом, а не с  $T_p$ . В работах [16-18] показано, что на Главной последовательности торможение СР-звезд не происходит. Приведем дополнительный аргумент. Если замедление происходило на ГП, то должна наблюдаться зависимость - чем дальше отходит звезда от линии нулевого возраста (ZAMS) и чем больше ее относительный радиус  $R/R_z$ , тем больше период вращения  $P$

( $R/R_z \propto \log g$ ,  $R$  - радиус звезды в настоящее время,  $R_z$  - ее радиус на ZAMS). На рис.1 представлена такая зависимость, построенная по данным для 75 звезд. Прямая это линейная регрессия, имеющая вид  $\log P = (1.44 \pm 0.34) - (0.32 \pm 0.21) \cdot R/R_z$ . Периоды взяты из каталога [19], относительные радиусы из [20]. Итак, предполагаемая зависимость не существует, так как угловой коэффициент меньше  $3\sigma$ , из чего можно сделать вывод,

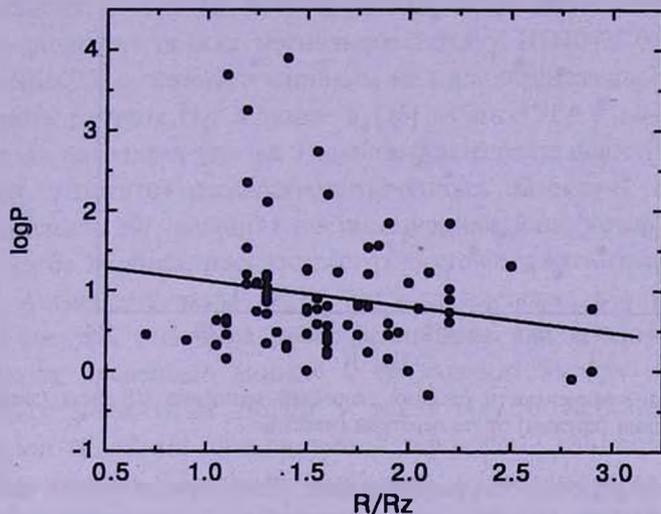


Рис.1. Изменение периода вращения при эволюционном движении звезд поперек полосы Главной последовательности. Угол наклона зависимости незначим.

что на Главной последовательности торможение СР-звезд не происходит. Для построения зависимости использованы данные только для звезд SrCrEu типа, среди которых имеется много объектов с экстремально большими периодами вращения. Более того, самые медленные ротаторы находятся на диаграмме Г-Р не в верхней части полосы Главной последовательности, где они скорее всего находились бы при торможении на Главной последовательности, а между ZAMS и звездами V класса светимости. Рассмотренная зависимость еще раз подтверждает мнение, что потеря момента вращения произошла в период эволюции "до ГП".

**5. Потеря момента "до Главной последовательности".** Рассмотрим третий пункт. Одним из важных факторов, влияющих на потерю момента вращения, является время замедления и величина магнитного поля. Время замедления тем больше, чем дольше звезда эволюционирует. В работе [21] показано, что время жизни звезд "до ГП" для  $2 M_{\odot}$  составляет  $10^7$  лет, а для  $5 M_{\odot}$   $10^5$  лет. Следовательно можно ожидать, что массивные СР-звезды замедлены меньше, чем маломассивные. На рис.2 точками обозначены средние значения  $\sin i$  для нормальных звезд V класса светимости, а звездочками - для СР-звезд. Хорошо видно, что,

как и ожидается, массивные CP-звезды имеют такие же скорости вращения как у нормальных звезд, а скорости маломассивных звезд

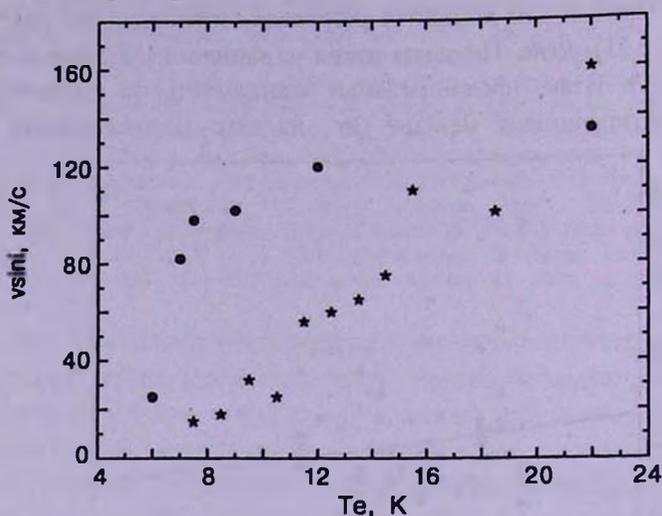


Рис.2. Сравнение зависимости средних скоростей вращения CP-звезд (звездочки) с нормальными звездами (кружки) от температуры (массы).

значительно отличаются от нормальных. Это лучше всего видно на рис.3, где даны отношения  $v \sin i$  для CP-звезд к нормальным звездам. Этот факт является сильным аргументом в пользу гипотезы торможения звезд в период эволюции "до ГП". Однако это свойство является необходимым, но недостаточным для доказательства наличия торможения. (Для построения зависимости использованы данные для  $v \sin i$  из каталога [22], а температуры из каталога [20].

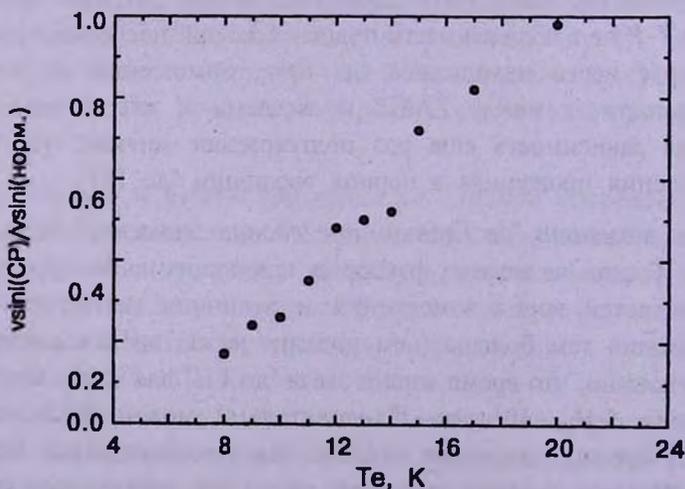


Рис.3. Отношение зависимостей, данных на рис.2, показывающее плавное уменьшение скоростей вращения CP-звезд по сравнению с нормальными звездами.

Против предположения о "магнитном" торможении СР-звезд имеется серьезное возражение, заключающееся в том, что не найдено сильных, более нескольких сотен Гаусс, дипольных магнитных полей у звезд Ae/Ве Хербига [23]. Для увеличения вероятности обнаружения поля в этой работе были изучены только те звезды, которые вращаются со скоростью  $v \sin i < 100$  км/с. Измерение поля осуществлялось по линиям, которые, как считается, являются фотосферными, а не оболочечными. Положительный результат поиска магнитного поля у HD104237 был получен в [24] - около 25 Гс, который слишком мал для эффективного торможения, если учесть расчеты [1], а также в [25]  $-450 \pm 93$  Гс у звезды HD139614. (Эта звезда находится уже на Главной последовательности ( $\log g = 4.5$ ) и, очевидно, относится к слабонамагниченным объектам). В соответствии с утверждением [7], внешняя нестационарная зона, которая наблюдается у звезд Ae/Ве Хербига, препятствует реликтовому магнитному полю выход наружу. Активность звезд Ae/Ве Хербига изучалась в ультрафиолетовой области спектра, она была интерпретирована как хромосферная [26,27]. Существуют косвенные данные о возможном выходе на поверхность локальных магнитных полей у звезд Ae/Ве Хербига. В крыльях спектральных линий фиксируются эффекты, свидетельствующие о кратковременных струйных выбросах в звездном ветре, которые, возможно, управляются локальными магнитными полями [28]. Однако эпизодическое появление магнитного поля вряд ли может сильно повлиять на торможение звезды.

Второе возражение против "магнитного" торможения СР-звезд заключается в следующем. Если торможение происходило с участием магнитного поля, то должна существовать зависимость - чем больше поверхностное поле, тем больше период вращения. Особенно следует ожидать наличие такой зависимости для звезд с экстремально большими периодами вращения, например, с  $P > 25^d$ , на что разные авторы делают особый акцент. На самом деле такая зависимость не наблюдается (рис.4), и даже скорее существует корреляция, обратная ожидаемой,  $B_s = (9.76 \pm 1.85) - (1.53 \pm 0.66) \cdot \log P$  (зависимость построена для звезд с  $P > 25^d$  по данным из [19,29]). У звезд с меньшими периодами вращения такая зависимость тоже отсутствует, как это видно из рис.5. Линейная регрессия для них имеет вид  $B_s = (9.52 \pm 3.64) - (0.18 \pm 0.32) \cdot P$ . Следовательно, третий пункт также имеет серьезные возражения.

Момент вращения мог быть потерян с участием магнитного поля, вероятно, только в самых начальных фазах рождения звезд - до периода стадии Ae/Ве Хербига, но после разделения звезд на магнитные и нормальные.

## 6. Зависимость относительного количества СР-звезд от

скорости вращения. Рассмотрим первый и второй пункты. В работе [5] показано, что чем меньше скорость вращения СР-звезд, тем больше их относительное количество. На рис.6 приведены такие зависимости для

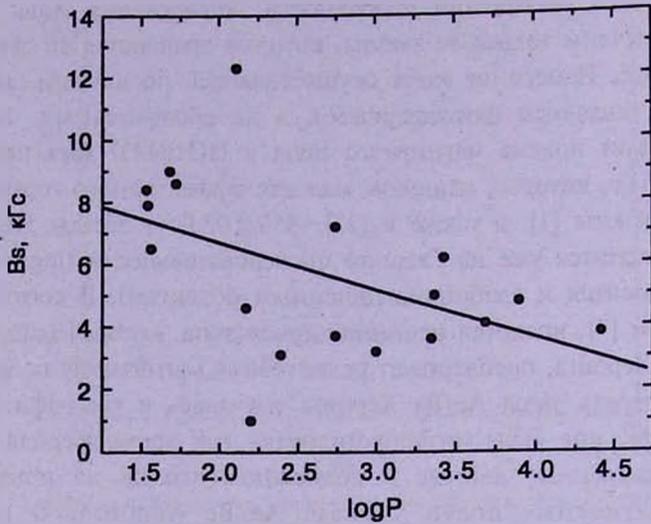


Рис.4. Зависимость среднего поверхностного поля для медленновращающихся звезд ( $P > 25^d$ ) от периода вращения.

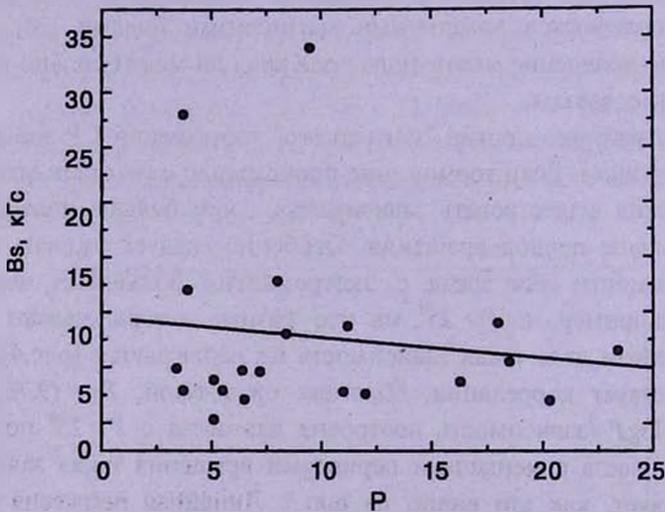


Рис.5. Зависимость среднего поверхностного поля для быстро вращающихся звезд ( $P < 25^d$ ) от периода вращения.

магнитных и немагнитных СР-звезд (значения по оси ординат даны относительно имевшихся в нашем распоряжении нормальных звезд V класса светимости), из которого хорошо видно, что они одинаковые. На основании этого рисунка можно сделать два важных предварительных вывода:

1) чем медленнее вращается молодая звезда на ранних стадиях эволюции,

тем больше вероятность для нее стать химически пекулярной звездой;

2) характерное распределение СР-звезд по  $v \sin i$  не зависит от того, есть сильное магнитное поле на ее поверхности или нет.

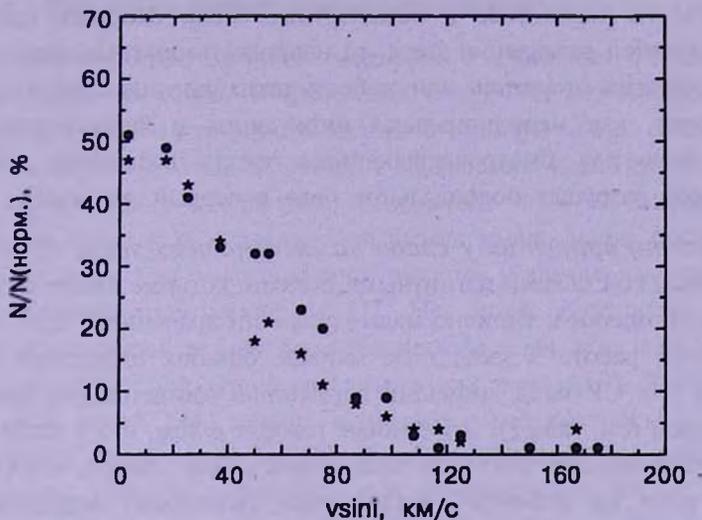


Рис.6. Относительное количество звезд с магнитным полем (кружки) и звезд без магнитного поля (звездочки). Масштаб по оси ординат условный.

Таким образом, во-первых, снова ставится под сомнение факт торможения с участием магнитного поля и, во-вторых, обращается внимание на тот важный эффект, что происхождение СР-звезд может быть связано с их начальным вращением. В работе [30] также отмечается, что спектральные пекулярности возникают в звездах, имеющих  $v \sin i < 90$  км/с. В работе [31] делается вывод, что именно медленное вращение является причиной образования СР-звезд. А в [32] отмечается важная роль, которую в образовании звезд играет вращение. Если угловой момент вращения облака  $l < 3 \cdot 10^{20} (M/M_{\odot})^{5/6} \text{ см}^2/\text{с}$ , то центральная часть облака не разделится и в итоге двойная система не образуется. Дефицит двойных систем среди СР-звезд также подтверждает малый угловой момент протозвездных облаков, из которых они образовались. (Однако трудность этого предположения встречается при объяснении большой доли двойных среди Атп-звезд). Следует отметить также, что магнитное поле эффективно участвует в потере момента вращения облаков [2], и не исключено, что сильно намагниченные облака, из которых образовались магнитные звезды, имели слабое вращение вследствие этого.

Если магнитное поле не влияло на момент вращения молодых звезд, то наиболее вероятным оказывается первый пункт, т.е. медленное вращение возникает изначально из "хвоста" распределения моментов вращения облаков. Однако с этой точки зрения становится непонятным

происхождение зависимости на рис.2 и 3. Очевидно, ответ на этот вопрос может быть дан после детального изучения начальных фаз эволюции звезд (пункты 1 и 2). Отдельная проблема - это разделение химически пекулярных звезд на магнитные и немагнитные. Если скорость вращения является причиной разделения звезд, то наиболее вероятным механизмом разделения является отсутствие или слабость таких разрушающих магнитное поле факторов, как меридиональная циркуляция и дифференциальное вращение. Вероятно, быстровращающиеся звезды вследствие действия этих факторов разрушат полоидальное поле в первый же момент.

7. Скорости вращения у слабо намагниченных звезд. Существует много CP-звезд со слабыми магнитными полями, которые имеют типичные химические аномалии и типично малые скорости вращения [32]. У приведенных в этой работе 9 звезд поле меньше ошибок определения, хотя характерные для CP-звезд аномалии параметров соответствуют звездам с сильным полем (см. табл.2). Эти данные говорят о том, что у исследованных звезд поле меньше 100 Гс. В этой работе сделан вывод, что сильное магнитное поле не является обязательным свойством, определяющим химические аномалии и медленное вращение. В работе [34] утверждается, что все звезды с химическими аномалиями имеют магнитные поля. В ряде случаев CP-звезды имеют очень слабое поле ( $Be < 100$  Гс). У звезды HD10221, например, в этой работе найдено поле  $Be = 93 \pm 32$  Гс. В некоторых случаях даже современная техника не позволяет измерить надежно слабые поля. Приведенные данные о магнитном поле двух металлических звезд свидетельствуют о том, что поле у них меньше

Таблица 2

### ОЦЕНКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НЕКОТОРЫХ СЛАБОНАМАГНИЧЕННЫХ CP-ЗВЕЗД

Звезда HD	Sp	$V_{\text{ini}}$ , км/с	$Be \pm \sigma$
10221	SiSrCrEu	10	24 30
			34 38
			93* 32
23408	He-w	38	-40 50
35912	He-r	32	-80 120
60179	SrEu	19	26 13
108945	Sr	65	109 44
116656A	Am	30	28 16
116656B	Am	37	-13 13
148112	Cr	35	-81 47
148330	SiSr	10	52 37
212454	He-w	40	130 64
			112 61

\* по [34].

50 Гс. В любом случае для нас важно то, что химически пекулярные звезды имеют типично малые скорости вращения даже при предельно слабом поле, и эта ситуация представляет собой проблему с точки зрения объяснения потери момента вращения.

8. *Заключение.* Причины медленного вращения СР-звезд все еще не выяснены до конца. В настоящей статье мы перечислили основные проблемы. Основная трудность состоит в том, что неясна роль магнитного поля. Наиболее вероятные причины медленного вращения это 1) потеря момента вращения с участием магнитного поля на начальных фазах эволюции звезд и 2) медленное вращение имело место с самого начала рождения звезд. Как было показано, имеются убедительные данные против предположения торможения на ГП. Нет также признаков зависимости скорости вращения от величины магнитного поля даже для экстремально медленных ротаторов. Отсутствие у молодых звезд Ae/Be Хербига сильных магнитных полей [23] создает дополнительные трудности для гипотезы "магнитного" торможения до ГП. В пользу гипотезы торможения имеется только одно свойство СР-звезд - чем меньше масса звезды, тем больше отличие (в сторону уменьшения) их средней скорости вращения  $v \sin i$  от нормальных звезд (рис.2). Проблема, однако, состоит в том, что у нормальных звезд позднего типа скорости вращения тоже обратно пропорциональны массе. Принято считать, что это свойство является следствием "магнитного" торможения, хотя все попытки найти магнитное поле у нормальных звезд приводили к отрицательным выводам. Действительно, этот фактор является необходимым условием для подтверждения гипотезы торможения. С другой стороны, имеется другое свойство - чем меньше скорость вращения СР-звезд, тем больше их доля среди нормальных звезд. Это свойство наводит на мысль, что чем *меньше* начальная скорость вращения звезды, тем *больше* вероятность стать магнитной химически пекулярной, и магнитное поле в торможении не участвует. Именно малая скорость вращения приводит к сохранению магнитного поля и формированию химически пекулярных звезд. К такому же выводу пришли авторы работы [31]. Противоречие между этими двумя свойствами значительно. Ответ может быть дан путем исследования распределения вращения у протозвездных облаков. Правильный механизм должен объяснить оба эти свойства. Все эти трудности дают основание обратить внимание на самые начальные фазы образования звезд. В работе [35] промоделированы условия начального коллапса вращающихся молекулярных облаков в присутствии и без магнитного поля. Их результат показывает большую эффективность торможения вращения протозвезды. Вероятно, в этих фазах следует искать причины малых скоростей вращения СР-звезд и причины разделения на химически пекулярные, магнитные и нормальные.

В очень длительном интерферометрическом обзоре молекулярного облака  $\rho$  Ori в работе [36] исследовали радиоэмиссию от нескольких явно молодых объектов и сделали заключение, что реликтовое магнитное поле имеет большое влияние на эволюцию звезд на ранних стадиях. Однако ударные волны, которые предполагают [9] при аккреции в начальных фазах, должны разрушать поле. Это создает трудность для гипотезы реликтового поля.

Представляет собой проблему механизм появления поля на поверхности магнитных звезд после выхода их на ГП. У молодых звезд в процессе аккреции верхние слои находятся в нестационарном состоянии, в таких условиях магнитное поле на поверхности, очевидно, разрушается так же, как и конвекцией. Можно предположить, что только после прекращения аккреции и выхода звезды на ГП сохранившееся в глубоких слоях магнитное поле всплывает на поверхность.

Отдельная проблема - это разделение химически пекулярных звезд на магнитные и немагнитные. Если скорость вращения является причиной разделения звезд, то наиболее вероятным механизмом разделения является отсутствие или наличие таких разрушающих поле факторов, как меридиональная циркуляция и дифференциальное вращение, возникновение которых сильно зависит от скорости вращения.

Если была конвективная фаза на ранних стадиях эволюции маломассивных CP-звезд, то в этот момент реликтовое поле было спрятано в глубину конвекцией [7] и не могло участвовать в торможении. Но могло участвовать поле, генерированное динамо. Существует проблема исследования свойств CP-звезд и звезд T Tau на границе между ними.

Выше было сказано, что маломассивные CP-звезды должны были пройти полностью конвективную фазу [9] и магнитное поле могло замеситься динамо-полем [1]. Однако замена поля могла произойти лишь в том случае, если звезда имеет достаточно сильное дифференциальное вращение, что маловероятно в присутствии сильного реликтового поля. Кроме того, должно наблюдаться различие по свойствам поля между теми звездами, у которых заменилось поле, и теми, у которых осталось реликтовое поле. Только звезды SrCrEu типа могут относиться к таким объектам. Верхняя граница по температуре, до которой встречаются звезды этого типа, находится на  $T_e \approx 9500 - 10000$  К. Зависимость величины магнитного поля от эффективной температуры, представленная на рис. 7, показывает, что значительной разницы по средней величине  $Be(\max)$  справа и слева от этой границы нет. Величины  $Be(\max)$  у SrCrEu звезд в среднем немного меньше ( $1.46 \pm 0.13$ ), чем у более горячих ( $1.76 \pm 0.15$ ), но это различие находится в пределах  $\sigma$ . Случайное совпадение реликтовых и динамо-полей по средней величине кажется маловероятным. Следовательно, реальность действия динамо в прошлом или сохранение его поля

до настоящего времени кажется сомнительным. Кроме этого, сравнивая структуру магнитного поля СР-звезд со структурой поля у звезд типа Т Тау, мы видим, что она различна. У звезд типа Т Тау магнитные поля сосредоточены в холодных пятнах типа солнечных [37], у СР-звезд

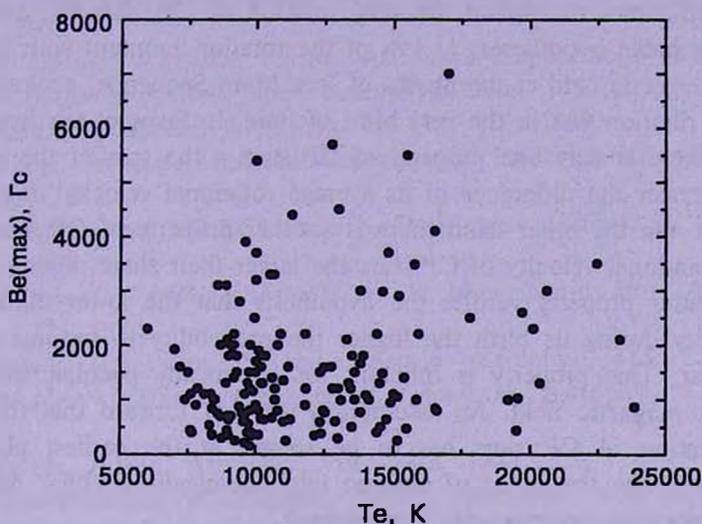


Рис.7. Зависимость эффективных значений магнитного поля СР-звезд от температуры (массы).

холодных пятен нет и поле имеет преимущественно дипольную структуру. Следовательно, СР-звезды сохранили реликтовое поле, а не приобрели динамо-поле.

Если конвекция на ранних стадиях эволюции занимала наружный слой звезды, то реликтовое поле могло сохраниться в глубоких слоях [7]. Скорее всего, реликтовое магнитное поле после окончания конвективной стадии всплыло наружу в момент выхода звезд на ZAMS. Решение этой проблемы может быть приближено путем сравнения структур магнитного поля массивных и маломассивных СР-звезд.

Одной из основных задач ближайшего времени является исследование магнитного поля у звезд "до Главной последовательности", в частности, надо понять, как сохраняется полоидальная структура поля звезд: звезда не коллапсирует однородно, это вращающееся жидкое тело, на поверхности происходят ударные волны от аккреции, перемешивание из-за турбулентции, имеются сильные перепады плотности. Почему в результате наблюдается правильная дипольная структура поля?

В заключение автор выражает благодарность А.В.Тутукову за полезное обсуждение и ценные советы по данной работе.

Работа выполнена при поддержке Грантов "Астрономия" и ОФН.

## SOME PROBLEMS OF SLOW ROTATION OF CP STARS

Ju.V.GLAGOLEVSKY

Some difficulties to explain the slow rotation of CP stars are discussed. The most probable hypotheses; 1) loss of the rotation moment with involvement of a magnetic field at the phases of "pre Main Sequence" evolution and 2) the slow rotation was in the very birth of stars. In favor of the hypothesis of braking there is only one property of CP stars - the smaller the mass of a star the greater the difference of its average rotational velocity  $v \sin i$  from normal stars. On the other hand there is another property of CP stars - the lower the rotational velocity of CP stars the larger their share among normal stars. The latter property verifies the hypothesis that the lower initial rotational velocity during its birth the higher the probability to become chemically peculiar. This property is inherent for chemically peculiar stars with and without magnetic field. An assumption was put forward that the cause of slow rotation of CP stars has to be sought at the earliest phases of formation and also the cause of division into chemically peculiar magnetic, chemically peculiar nonmagnetic and normal.

Key words: *stars: rotation: CP stars*

## ЛИТЕРАТУРА

1. K.Steppen, *Astron. Astrophys.*, **353**, 227, 2000.
2. А.Е.Дудоров, А.В.Тутуков, *Астрон. ж.*, **67**, 342, 1990.
3. F.Palla, S.W.Stahler, in: *The Nature and Evolutionary Status of Herbig Ae/Be Stars*, ASP. Conf. Ser., **62**, 1994, p.391.
4. S.Hubrig, P.North, G.Mathys, *Astrophys. J.*, **539**, 352, 2000.
5. Ю.В.Глаголевский, *Астрофизика*, **46**, 399, 2003.
6. P.A.Strittmatter, J.Norris, *Astron. Astrophys.*, **15**, 239, 1971.
7. L.Mestel, *Mem. Roy. Soc. Sci. Liege*, **8**, 79, 1975.
8. L.Mestel, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **138**, 359, 1968.
9. S.W.Stahler, *Astrophys. J.*, **332**, 804, 1988.
10. S.C.Wolff, *Astrophys. J.*, **244**, 221, 1981.
11. O.Havnes, P.S.Conti, *Astron. Astrophys.*, **14**, 1, 1971.
12. L.Mestel, in: *Stellar Evolution*, Eds. H.Y.Chui, A.Muriel, Cambridge MIT Press, 1972, p.643.
13. R.C.Fleck, in: *Upper main seq. CP Stars*, Inst. d'Astrophysique Universite de Liege, 1981, p.341.

14. *K.Stepien, J.D.Landstreet*, *Astron. Astrophys.*, **384**, 554, 2002.
15. *Ю.В.Глазголевский*, *Астрофизика*, **46**, 319, 2003.
16. *V.G.Klochkova, I.M.Kopylov*, *Astron. J.*, **65**, 947, 1985.
17. *S.C.Wolff, T.Simon*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **109**, 759, 1997.
18. *Yu.V.Glagolevskij, G.A.Chountonov*, *Bull. Spec. Astrophys. Observ.*, **51**, 88, 2001.
19. *F.A.Catalano, P.Renson*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **127**, 42, 1998.
20. *Yu.V.Glagolevskij*, *Bull. Spec. Astrophys. Observ.*, **53**, 33, 2002.
21. *F.Palla, S.W.Stahler*, *Astrophys. J.*, **418**, 414, 1993.
22. *A.Uesugi, I.Fucuda*, *Revised Catalogue of Stellar Rotational Velocities*, Kyoto, 1982.
23. *Yu.V.Glagolevskij, G.A.Chountonov*, *Bull. Apec. Astrophys. Observ.*, **45**, 105, 1998.
24. *J.-F.Donati, G.A.Wade, J.Babel et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **326**, 126, 2001.
25. *S.Hubrig, M.Scholler, R.V.Yudin*, *Astron. Astrophys.*, **428**, L1, 2004.
26. *F.Praderie, N.Simon, C.Catala, A.M.Boesgard*, *Astrophys. J.*, **303**, 311, 1986.
27. *C.Catala*, *Astron. Astrophys.*, **193**, 222, 1988.
28. *N.G.Beskrovnaya, M.A.Pogodin*, *Astron. Astrophys.*, **414**, 955, 2004.
29. *Yu.V.Glagolevskij, E.Gerth*, *Bull. Spec. Astrophys. Observ.*, **58**, 16, 2004.
30. *S.C.Wolff, R.J.Wolff*, *Astrophys. J.*, **194**, 65, 1974.
31. *А.В.Тутуков*, *Письма в Астрон. ж.*, **9**, 160, 1983.
32. *H.A.Abt, N.I.Morrell*, *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, **99**, 135, 1995.
33. *Ю.В.Глазголевский, Г.А.Чунтонов*, *Астрофизика*, **45**, 499, 2002.
34. *M.Aurriere, J.Silvester, G.A.Wade et al.*, *Peculiar Newsletter*, **39**, 4, 2003.
35. *J.G.Hosking, A.P.Whitworth*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **347**, 1001, 2004.
36. *P.Andre, B.D.Deebey, R.B.Philips, J.-F.Lestrade*, *Astrophys. J.*, **401**, 667, 1992.
37. *P.P.Petrov, V.A.Shcherbakov, N.Berdyugina et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **107**, 9, 1994.