

## Ротационные скорости металлических звезд\*

В. Добричев

### I. Введение

Еще с первых наблюдений металлических ( $A_m$ ) звезд отмечалась относительная резкость абсорбционных линий в их спектрах, что указывает на низкую скорость ротации. Для 20  $A_m$  звезд Слеттебак (1955) получил среднее значение проектированной ротационной скорости  $V \sin i = 54$  km/s, в то время как для нормальных А звезд среднее  $V \sin i = 155$  km/s. Поэтому была высказана гипотеза, что  $A_m$  звезды, может быть, наблюдаются со стороны полюса. Абт (1961), однако, показал, что почти все  $A_m$  звезды являются двойными системами. Медленную ротацию, по крайней мере в тесных двойных, Абт объяснял взаимодействием компонентов, которое приводит к синхронизации орбитального периода и периода осевого вращения. Этим сразу выявилась несостоятельность „полюсной“ гипотезы — при приблизительном совпадении экваториальной плоскости с орбитальной  $A_m$  звезды не были бы открываемы как спектрально-двойные. Данные наблюдений (Абт, Худсон, 1971; Абт, 1975) показывают, что при периодах меньше 5 дней синхронизация почти полная. При периодах меньше 1—2 дней она уже приводит к увеличению ротационной скорости ( $V = 2\pi R_*/P$ ).

Хотя быстрое вращение и маскирует спектральные аномалии, нельзя считать, что малая ротационная скорость  $A_m$  звезд является результатом наблюдательной селекции, так как слабость CaII К-линии можно установить вплоть до  $V \sin i \sim 150$  km/s. Свойственно медленная ротация как фактор, обуславливающий металлизм, является основным предположением в диффузной теории [см., напр., Уотсон (1970), Кобаяши, Осаки (1973), Смит (1973)]. У медленно вращающихся звезд нет меридиональной циркуляции, верхние слои относительно спокойны и создаются условия для диффузного разделения элементов. Поэтому  $A_m$  звезды с большей ротационной скоростью показывали бы более умеренные аномалии. Наблюдения затменных и почти затменных систем ( $\sin i \approx 1$ ) дали бы возможность прямой проверки этого факта. К сожалению, данных о таких системах очень мало — известно всего лишь несколько затменных  $A_m$  звезд. Поэтому для выявления влияния ротационной скорости на аномалии звезд приходится идти косвенным путем, используя наблюдаемые  $V \sin i$ .

\* В этой статье используется астрофизическая единица длин волн ангстрем;  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ .

В настоящей работе мы определили единой методикой ротационные скорости  $V \sin i$  81 звезды типа  $A_m$ ,  $\delta$  Scuti и стандартных, по однородному наблюдательному материалу — спектрам с дисперсией 15 Å/mm, полученным нами в Крымской астрофизической обсерватории на 1,22-метровом телескопе.

## 2. Метод определения $V \sin i$

Для определения ротационных скоростей  $V \sin i$  мы подсчитали сетку расширенных вращением профилей, исходя из наблюдаемых профилей „невращающихся“ (медленно вращающихся) звезд. Для дисперсии наших спектров этот метод достаточно точен, а также практичен, так как все спектры получены при одних и тех же условиях (не нужно, например, учитывать инструментальный профиль). Таким образом в какой-то мере учитывается и турбуленция. Основы метода следующие.

Известно, что линии в спектрах звезд расширены разными эффектами. Доплеровское расширение, обусловленное вращением, является только одной составляющей полного расширения, т. е.

$$(1) \quad \Delta\lambda = \Delta\lambda_{\text{rot}} + \Delta\lambda',$$

где  $\Delta\lambda'$  — расширение профиля, вызванное всеми другими причинами, кроме ротации. Здесь удобно все разности длин волн выражать в долях  $t$  максимального смещения  $b$ , обусловленного вращением

$$(2) \quad b = \frac{\lambda}{c} V \sin i$$

и

$$(3) \quad t = \frac{\Delta\lambda}{b} \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \frac{c}{V \sin i},$$

где  $V$  — ротационная скорость на экваторе.

Если  $R(t)$  есть наблюдаемый контур линии с всего диска (выраженный в глубинах), а  $R(t-x)$  — контур, который дал бы только один элемент диска, то

$$(4) \quad \overline{R(t)} = \int_{-1}^1 R(t-x)A(x)dx,$$

где  $x = \frac{\Delta\lambda}{b}$  обозначает смещение линии как целого из-за ротации и поэтому изменяется от одного элемента поверхности к другому. Ясно, что  $|x| \leq 1$ . Сама функция  $R$  считается одинаковой для всех элементов поверхности диска звезды.  $A(x)$  есть функция уширения линии вследствие ротации, для которой известно достаточно точное выражение (Унзольд, 1955)

$$(5) \quad A(x) = \frac{3}{3+2\beta} \left[ \frac{2}{\pi} \sqrt{1-x^2} + \frac{\beta}{2} (1-x^2) \right],$$

где  $\beta$  — коэффициент потемнения диска к краю в непрерывном спектре.  $A(x)$  слабо зависит от  $\beta$  даже для экстремальных значений  $(0, \infty)$ , поэтому мы приняли  $\beta = 4/\pi$  (значение, близкое к найденному экспериментально для Солнца).

За функцию  $R$  в (4) мы приняли наблюдаемые профили линий в спектрах „невращающихся“ (очень медленно вращающихся) звезд главной последовательности в спектральном диапазоне металлических звезд A0—F5: HD 17 581 (HR 839), HD 40 932 ( $\mu$ Ori), HD 48 915 ( $\alpha$ CMa), HD 61 421 ( $\alpha$ CMi),

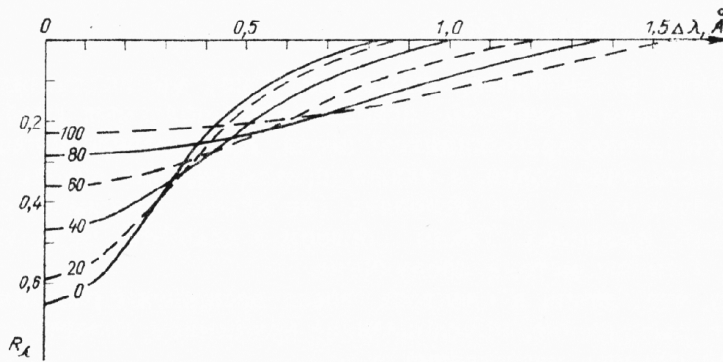


Рис. 1

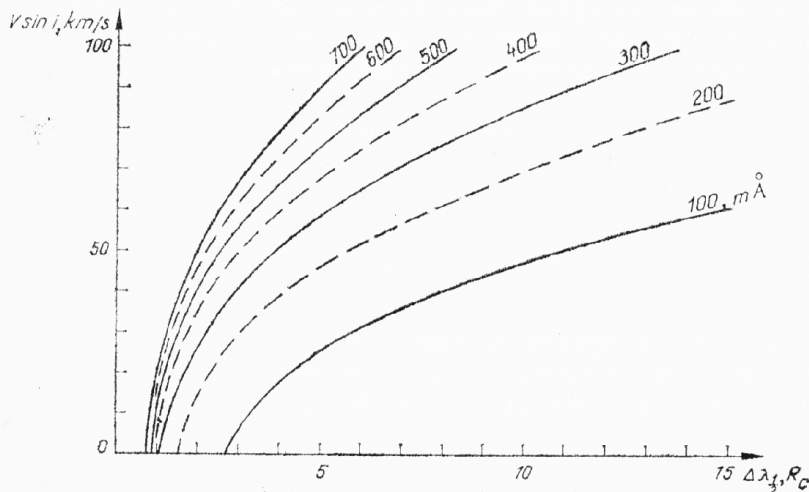


Рис. 2

HD 107 169 (8 Com) и HD 128 167 ( $\sigma$  Boo). Здесь мы делаем обычные предположения, что линии в спектрах исследуемых звезд имели бы те же профили  $R$ , если бы звезды не вращались или если мы наблюдали их со стороны полюсов. Для  $A_m$  звезд интенсивность линий при данной температуре меняется от звезды к звезде, и во всех случаях надо учитывать зависимость профиля как от температуры, так и от интенсивности линии. Для этого мы сравнили профили линий приблизительно одинаковых эквивалентных ширин и близких длин волн в спектрах „невращающихся“ звезд различных температур. Это сравнение показало, что в температурном диапазоне, где находятся  $A_m$  звезды, и при использованной нами дисперсии профиль слабо зависит от температуры, и его вид ( $R$ ) определяется главным образом интенсивностью линии и, конечно, вращением. Дальше при известном  $R$  по формуле (4) вычислялся результирующий профиль  $\bar{R}$ , который следует сравнивать с наблюдениями.

Мы использовали линии FeI 4045 Å и SrII 4215 Å, которые сравнительно неблендированы, хорошо очерчены и измеримы у звезд указанного выше спектрального диапазона даже при относительно быстром вращении (до ~100 km/s). Для иллюстрации мы приводим на рис. 1 наблюдаемый

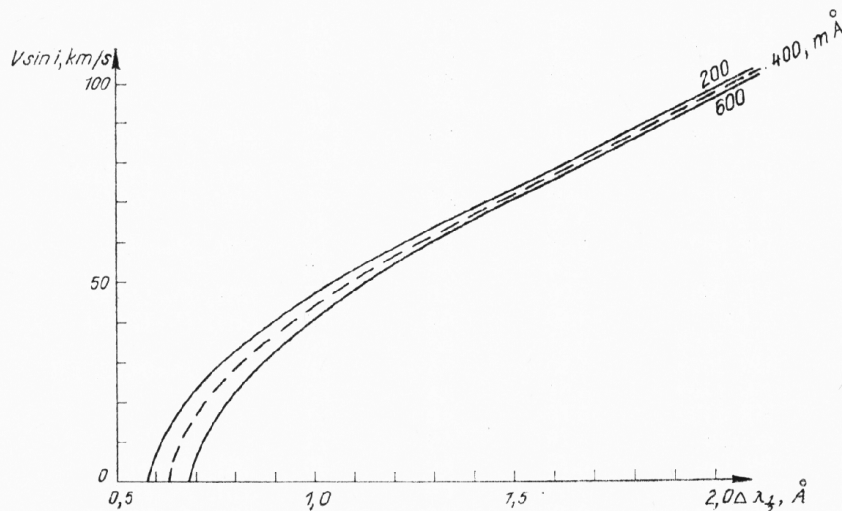


Рис. 3

контур линии FeI 4045 Å у типичной  $A_m$  звезды 8Com, использованной нами как „невращающаяся“ звезда, и соответственно вычисленные профили при  $V \sin i = 20, 40, 60, 80$  и  $100$  km/s (при большом масштабе по оси длин волн). Все эквивалентные ширины равны, так как функция уширения  $A(x)$  в (4) нормирована к единице

$$(6) \quad \int_{-\infty}^{+\infty} A(x) dx = 1.$$

Из рис. 1 сразу видно, что при данной эквивалентной ширине центральная глубина и ширина линии являются самыми чувствительными индикаторами ротации. Поэтому для точного определения  $V \sin i$ , кроме прямого сравнения наблюдаемого профиля с сеткой вычисленных профилей, удобнее всего использовать приведенную на рис. 2 зависимость  $V \sin i$  от отношения полуширины и центральной глубины линии  $\Delta\lambda/R_c$  для различных значений эквивалентной ширины. Полуширина линии, однако, слабее зависит от эквивалентной ширины, что видно из рис. 3 (тоже очень растянутого по оси длин волн). Из рис. 1, 2 и 3 видно, что малые скорости вращения ( $V \sin i < 15$  km/s) трудно определить по профилям, что указывает и на слабую зависимость контура  $\overline{R(t)}$  от точного вида  $R(t-x)$ . Напомним, что зависимости на рис. 1, 2 и 3 относятся конкретно к использованным нами спектрам.

Из сказанного видно, что подходящей для определения ротационной скорости является линия, которая: 1) хорошо очерчена на записи спектра; 2) имеет ненасыщенное ядро; 3) ее интенсивность слабо зависит от температуры.

### 3. Результаты

Определенные описанным методом ротационные скорости для 81 звезды —  $A_m$ , нескольких стандартных и типа  $\delta$ Sct даны в табл. 1. В четвертой колонке таблицы мы приводим также водородный спектральный тип, опреде-



Таблица 1

HD	Название	$m_V$	Спектр по водороду	$V \sin i$	Примечание
432	$\beta$ Cas	2,25	F1	73	type $\delta$ Sct
2628	28 And	5,17	A9	20	type $\delta$ Sct?
3883	HR 178	5,93	A9	23:	
5448	$\mu$ And	3,93	A5	67:	
8374	47 And	5,49	A9	{40 40	SB2, $P=35^d,37$
11636	$\beta$ Ari	2,65	A5	75:	SB1, $P=107^d,EB$
12869	$\kappa$ Ari	5,03	A4	34	SB2, $P=15^d,29$
13372	5 Tri	6,15	A5	43	
17581	HR 839	6,38	A4	10	SB1, $P=8^d,25$
18769	49 Ari	5,86	A6	50	
18778	HR 906	5,95	A6	20	SB1, $P=11^d,67$
20320	$\zeta$ Eri	4,80	A8	72	SB1, $P=17^d,92$
21769	HR 1068	6,21	A6	93	
21912	HR 1078	5,80	A5	80	SB1, $P=0^d,92, EB$
23281	HR 1139	5,61	A8	80	
24141	HR 1192	5,76	A6	57	
27045	$\omega$ Tau	4,78	A9	71	
27628	60 Tau	5,72	F0	40	SB1, $P=2^d,14$
27749	63 Tau	5,64	F0	25:	SB1, $P=8^d,42$
27962	68 Tau	4,30	A4	18	SB1, $P=57^d,25$
28355	79 Tau	5,03	A8	103	
29140	88 Tau	4,26	A7	38	SB2, $P=3^d,57$
29479	$\sigma^1$ Tau	5,13	A5	53	SB1, $P=251^d,20$
29573	HR 1483	5,00	A5	30	
30121	4 Cam	5,30	A8	72:	
33204	HR 1670	6,01	A9	45	
33254	16 h Ori	5,43	A8	20:	SB1, $P=155^d,83$
33641	$\mu$ Aur	4,74	A7	84	
40932	$\mu$ Ori	4,12	A7	0	SB1, $P=4^d,45$
44691	RR Lyn	5,64	A8	22	SB2, $P=9^d,95, EB$
47105	$\gamma$ Gem	1,93	A0	10	
61421	$\alpha$ CMi	0,48	F5	0	
63589	HR 3040	6,00	A6	40	
72037	2 UMa	5,40	A7	18	
76756	$\alpha$ Cnc	4,25	A6	70:	
78209	15 f UMa	4,46	A9	45	
78362	$\tau$ UMa	4,65	F1	25:	SB1, $P=1062^d,4$
89021	$\lambda$ UMa	3,45	A1:	48	
90277	30 LMi	4,73	A9	37	
95310	49 UMa	5,07	A9	77	
95608	60 Leo	4,40	A3	13	
97633	0 Leo	3,32	A0	10	
99945	HR 4429	6,13	A8	58	
102660	HR 4535	5,97	A9	47	SB1, $P=2^d,78$
102942	HR 4545	6,11	F0	46	
104827	2 Com	5,70	A9	48	
105702	11 Vir	5,66	F0	33	
106112	HR 4646	4,95	F0	70	SB1, $P=1^d,27$
106251	12 Vir	5,79	A9	46	
107169	8 Com	6,24	A6	0	
108844	74 UMa	5,37	A8	90	
110951	32 d <sup>2</sup> Vir	5,17	F0	53	SB2, $P=38^d,32, A_m + \text{type } \delta \text{ Sct}$
111421	11 CVn	6,27	A7	44	
115604	20 CVn	4,71	F0	27:	type $\delta$ Sct
116657	$\zeta^2$ f UMa	3,95	A5	52	SB1, $P=175^d,55$
130841	$\alpha^2$ Lib	2,75	A6	65	
140232	22 $\tau^7$ Ser	5,72	A7	23	
141675	HR 5887	5,68	A8	43	

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6
141795	$\varepsilon$ Ser	3,71	A6	36	
145570	$\psi$ Sco	4,93	A3	38	
148367	$\nu$ Oph	4,63	A7	18	SB2, $P=27^d, 22$
159541	$\nu^1$ Dra	4,86	A9	68	
159560	$\nu^2$ Dra	4,84	F0	53	SB1, $P=38^d, 60$
166095	HR 6784	6,26	A7	47	
172167	$\alpha$ Lyr	0,06	A0	10	
173648	$\zeta^1$ Lyr A	4,37	A7	40	SB1, $P=4^d, 30$
173654	$\delta$ Aql	5,88	A5	23	
173880	111 Her	4,30	A5	75	
182564	$\pi$ Dra	4,58	A1:	26	
189849	15 Vul	4,67	A7	12	SB1, $P=3606^d$
195217	HR 7833	6,33	A8	65	
195479	HR 7839	5,96	A6	20	
195725	$\theta$ Cep	4,20	A8	55	SB1, $P=840^d, 6$
197461	$\delta$ Del	4,44	F0	26	type $\delta$ Sct
198743	$\mu$ Aqr	4,71	F0	60:	SB1, $P=1782^d$
207098	$\delta$ Cap	2,83	F0	90	SB1, $P=1^d, 02, EB$
209625	$\beta$ Aqr	5,32	A8	20:	SB1, $P=7^d, 83$
209790	$\xi^2$ Cep A	4,28	F1	55	SB2, $P=810^d, 9$
221675	14 Psc	5,88	A9	62	
223461	79 Peg	5,89	A7	55	
224890	+72° 1135	6,48	A7	15	

ленный количественным методом по записям наших спектров. В примечаниях сокращения SB1 и SB2 означают спектрально-двойные соответственно с одним или двумя наблюдаемыми спектрами, а EB — затменные двойные.

По линиям FeI 4045 Å и SrII 4215 Å получались практически совпадающие значения для  $V \sin i$ . Только для отмеченных двумя точками значений разница достигала примерно 10 km/s. Мы оцениваем, что ошибки в  $V \sin i$  в среднем меньше  $\pm 5$  km/s. Отметим, однако, что из-за не всегда известного влияния второго компонента на уширение линий наблюдаемой звезды, приведенные значения  $V \sin i$  следует считать верхним пределом проектированной ротационной скорости. Например, для составного спектра звезды 32d<sup>2</sup> Vir мы определили  $V \sin i = 53$  km/s, в каталоге Уесуги, Фукуда (1970) приводится значение 90 km/s, а Курц и др. (1976) показали, что первый компонент ( $A_m$ ) и второй компонент (типа  $\delta$  Sct) имеют  $V \sin i$  соответственно 24 km/s и 140 km/s. Аналогично для спектрально-двойной с разделенными линиями  $\nu$  Oph в упомянутом каталоге дается  $V \sin i = 60$  km/s, а мы получили 18 km/s. Если это не обычная ошибка, разница в  $V \sin i$  должна быть обусловлена различным влиянием второго компонента на составной спектр в разных фазах наблюдений. Этим можно частично объяснить некоторые расхождения результатов различных авторов. Нам удалось определить  $V \sin i$  каждого из компонентов только для системы 47 And, у которой обе звезды имеют примерно одинаковый блеск.

Специального упоминания требует спектрально-двойная звезда HR 4646, для которой мы определили  $V \sin i = 70$  km/s. У нее короткий период (1,27 дней) и, следовательно, можно ожидать полную синхронизацию орбитального периода и периода осевого вращения. Это подтверждает надежность полученного результата и можно считать, что экваториальная скорость этой звезды  $V \geq 70$  km/s. С другой стороны, HR 4646 одна из экстремальных  $A_m$  звезд и, согласно диффузной теории, должна иметь медленную ротацию, что противоречит наблюдениям.

В дальнейшем будут исследованы зависимости интенсивностей аномальных линий от  $V \sin i$  и температуры, надеясь по ним оценить границы действия диффузного механизма.

## Литература

- Абт (Abt, H. A.). 1961. *Astrophys. J., Suppl.*, **6**, 37.  
Абт (Abt, H. A.). 1975. *Astrophys. J.*, **195**, 405.  
Абт, Худсон (Abt, H. A., K. I. Hudson). 1971. *Astrophys. J.*, **163**, 333.  
Кобаяши, Осаки (Kobayashi, M., Y. Osaki). 1973. *Publ. Astron. Soc. Japan*, **25**, 495.  
Курц и др. (Kurtz, D. W., M. Breger, S. W. Evans, W. H. Sandmann). 1976. *Astrophys. J.*, **207**, 181.  
Слеттебак (Slettebak, A.). 1955. *Astrophys. J.*, **121**, 653.  
Смит (Smith, M. A.). 1973. *Astrophys. J., Suppl.*, **25**, 277.  
Уесуги, Фукуда (Uesugi, A., I. Fukuda). 1970. *Contrib. Inst. Astrophys. Kwasan Obs. Univ. Kyoto*, No 189.  
Унзольд (Unsöld, A.). 1955. *Physik der Sternatmosphären*, Springer, Berlin.  
Уотсон (Watson, W. D.). 1970. *Astrophys. J. (Letters)*, **162**, L45.

## Rotational Velocities of Metallic-Line Stars

*V. Dobrichev*

(Summary)

The rotational velocities ( $V \sin i$ ) of 81  $A_m$  stars have been determined by using spectra of dispersion 15 Å/mm. The profiles of FeI 4045 Å and SrII 4215 Å lines have been compared with the computed ones. The line width and its ratio to the central depth are shown to be most sensitive to the rotational velocity.

In the Table, besides the determined  $V \sin i$ , the hydrogen spectral types obtained from  $H_\gamma$  equivalent width are given. For  $A_m$  stars the tabulated values of  $V \sin i$  are to be considered as an upper limit of the real ones, because of the unknown influence of the companion stars on the line profiles.

The extremal  $A_m$  star HR 4646 has a relatively high rotational velocity  $V \geq 70$  km/s and a more detailed study is desirable as a check of the diffusive separation of elements theory.

*Секция астрономии с Национальной астрономической обсерваторией, Болгарская академия наук*

*Поступила 20. X. 1980 г.*