

УДК 524.33

Скорости вращения некоторых пульсирующих звезд

Л. П. Зайкова, С. Н. Удовиченко

По спектрограммам с дисперсией 0.9 нм/мм, полученным на 2-й камере ОЗСП 6-м телескопа САО АН СССР, построены редуцированные зависимости полуширины линий Mg II λ 448.1 нм и Fe I λ 447.6 нм от скорости вращения для стандартных звезд. По этим зависимостям определены скорости вращения переменных звезд RR Lyr, V474 Mon, X Ari, TU Cas, VW Dra.

THE ROTATIONAL VELOCITIES OF SOME PULSATING STARS, by Zajkova L. P., Udovichenko S. N. — The reduction relations of Mg II λ 448.1 nm and Fe I λ 447.6 nm lines half-widths versus rotational velocities of standard stars are found from the spectrograms obtained with the 6 m telescope. The rotational velocities of the variable stars RR Lyr, V474 Mon, X Ari, TU Cas and VW Dra are determined using these relations.

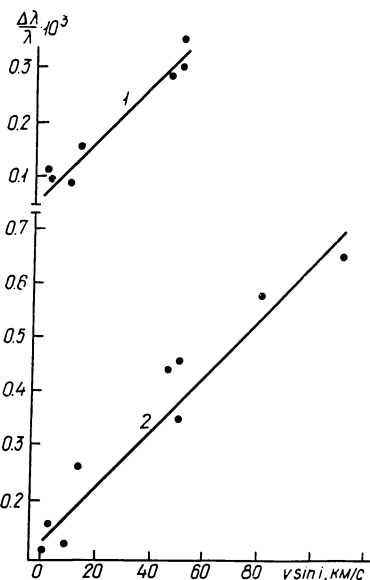
Введение. В настоящее время в результате многочисленных исследований переменных звезд удалось выявить механизм, ответственный за пульсации большинства типов переменных звезд. Он связан с ионизацией гелия и водорода в оболочке звезды на некоторой критической глубине под ее поверхностью, что вызывает изменение потока лучистой энергии. Области с критической ионизацией накапливают энергию в фазах наибольшего сжатия и отдают ее в фазах наибольшего расширения. Известно, что красная (низкотемпературная) граница полосы неустойчивости на диаграмме Герцшпрунга — Рассела связана с возникновением конвекции для спектральных классов позднее G0, вследствие которой зона критической ионизации разрушается и пульсационные движения подавляются [3].

При наличии осевого вращения на звезду кроме сил газового давления и тяготения действуют еще две силы: центробежная и Кориолиса. Под действием этих сил в оболочке звезды начинаются сложные движения: крупномасштабная меридиональная циркуляция и турбулентные течения. Быстрое вращение способно также значительно ослабить или подавить полностью пульсационную устойчивость. В связи с изложенным представляет интерес исследование скоростей вращения пульсирующих звезд.

В [9] высказано предположение о существовании критической скорости вращения пульсирующих звезд, которая оценена на основе наблюдения небольшой группы переменных звезд, включающей классические цефеиды, звезды типов RR Lyr и δ Sct. Согласно [9], критическая скорость составляет 20—30 км/с. Для RR Lyr в [9] принята скорость вращения более 13 км/с. С тех пор исследовались скорости вращения цефеид [8] и звезд типа δ Sct [6], но вопрос о скоростях вращения звезд типа RR Lyr практически не затрагивался.

Наблюдения. Для определения скорости вращения использованы 16 спектрограмм пяти переменных и 13 спектрограмм девяти стандартных звезд. Спектрограммы получены Ю. С. Романовым и С. Н. Удовиченко на 2-й камере ОЗСП 6-м телескопа САО АН СССР (дисперсия 0.9 нм/мм) в период с 1977 по 1984 г. Для уменьшения длительности экспозиций применялась гиперсенсibilизация фотоэмульсии Kodak 103a-0 водородом. В результате временное разрешение составило 4—35 мин, за исключением X Ari (разрешение 50—80 мин). На регист-

программах измерены полуширины спектральных линий Mg II λ 448.1 нм и Fe I λ 447.6 нм, которые предложены в работах [2, 5, 11] как наилучшие индикаторы осевого вращения в исследуемом интервале спек-



ральных классов: Mg II — для В8—F0 и Fe I — для F0—F2. Для оценки ширины инструментального профиля использовались слабые линии спектра сравнения, их полуширина составляет 0.02 нм. Результаты измерений для стандартных звезд приведены в табл. 1. Величины $(\Delta\lambda/\lambda) \times 10^3$ усреднены по нескольким измерениям (ошибка ± 0.018). Значения $v \sin i$ взяты из указанных в таблице литературных источников. Эти данные мы использовали для построения редуцированных графиков (рисунок). Несмотря на общий нелинейный характер зависимости полуширины спектральной линии от $v \sin i$ [2] и небольшое число исполь-

Редуцированные зависимости полуширин линий Fe I λ 447.6 нм (1) и Mg II λ 448.1 нм (2) от скорости вращения звезды

зованных стандартных звезд, мы сочли возможным провести калибровочные прямые для Mg II и Fe I. Их уравнения:

$$\text{Mg II: } (\Delta\lambda/\lambda) \cdot 10^3 = 0.130 + 0.005v \sin i, \quad \sigma_0 = 0.043, \quad (1)$$

$$\text{Fe I: } (\Delta\lambda/\lambda) \cdot 10^3 = 0.071 + 0.005v \sin i, \quad \sigma_0 = 0.021, \quad (2)$$

где σ_0 — средняя квадратичная ошибка одного определения. По калибровочным зависимостям ошибка определения $v \sin i$ в нашей системе составляет примерно 4 км/с по линии Fe I и 7 км/с по линии Mg II.

В [11] предложена система стандартных звезд с уверенными определениями $v \sin i$ для вычисления скорости вращения исследуемой звезды. В этой работе использованы спектрограммы с дисперсией 0.9 нм/мм и спектральным разрешением 0.025 нм, что соответствует нашему спектральному материалу. В табл. 2 приведены результаты сравнения полученных нами и авторами [11] полуширин линии Fe I λ 447.6 нм для общих четырех звезд. Сравнимые полуширины хорошо согласуются

Таблица 1. Скорости вращения стандартных звезд

Звезда	HD	Спектральный класс [12]	Число спектрограмм	$(\Delta\lambda/\lambda) \cdot 10^3$		$v \sin i$, км/с	Литературный источник
				Mg II	Fe I		
β Cas	432	F2 IV	1	0.344	0.297	50	[11]
	2454	F2 IV	1	0.116	0.089	8	[1, 12]
θ Cas	6961	A7 V	2	0.570	—	110	[1, 12]
ρ Psc	8723	F2 V	2	0.453	0.344	50	[1, 12]
μ Cet	17 094	F0 IV	2	0.438	0.280	45	[12]
η Lep	40 136	F0 IV—V	2	0.258	0.156	13	[12]
α CMi	61 421	F5 IV—V	1	0.143	0.087	2.8	[7]
σ Boo	128 167	F2 V	1	0.109	0.109	0	[12]
ν CrB	146 738	A3 III	1	0.578	—	80	[12]

между собой. Для определения скорости вращения RR Lyr отобраны спектрограммы, полученные в фазах основного колебания 0.3—0.5^P, где невелико влияние ударно-волновых эффектов, а изменение лучевой скорости меньше, чем в других фазах. Для остальных переменных звезд использованы все имеющиеся спектрограммы. В табл. 3 представлены данные об исследуемых переменных звездах. Фазы получены по элементам, взятым из [4]. Юлианские даты наблюдений и фазы соответствуют середине экспозиции, в графе 4 показана длительность экспозиции.

В табл. 4 приведены определенные нами полуширины линий Mg II λ 448.1 нм и Fe I λ 447.6 нм, усредненные по имеющимся наблюдениям, а также полученные с помощью (1) и (2) значения $v \sin i$ для исследуемых переменных звезд. Значения вида <9 км/с — верхний предел оценки скорости вращения при данной дисперсии, согласно [5]. Значение $v \sin i$ для X Ari представлено как неуверенное, так как спектрограммы для этой звезды получены в фазах, когда ударно-волновые эффекты могут оказывать существенное влияние на полуширину спектральной линии.

Таблица 2. Сравнение результатов, полученных нами и другими авторами

Звезда	$\Delta\lambda$, нм	
	[11]	Настоящая работа
β Cas	0.122	0.133
μ Cet	0.100	0.126
σ Boo	0.036	0.049
α CMi	0.037	0.039

Таблица 3. Данные о переменных звездах

Звезда	<i>J.D. hel</i>	Фаза	Δt	Эпоха	Период
RR Lyr	2 445 200+			2 442 995.405 ^d	0.566 867 ^d
	40.328	0.23 ^P	20 ^m		
	.351	0.27	25		
	.377	0.31	22		
	.405	0.37	30		
	.441	0.42	35		
V474 Mon	2 445 200+			2 441 661.1668	0.136 126 0
	40.537	0.53	5		
	.550	0.63	5		
	.557	0.68	6		
	.564	0.74	4		
	41.573	0.14	11		
X Ari	2 445 200+			2 437 583.570	0.651 142 6
	40.474	0.18	80		
	38.559	0.24	50		
TU Cas	2 443 700+			2 441 704.839	2.139 298
	41.566	0.05	17		
	42.563	0.52	21		
VW Dra	2 443 700+			—	—
	59.450	—	10		
	2 443 300+			—	—
	80.403	—	10		

Обсуждение результатов. В настоящее время нет достаточно уверенных методов отделения уширения спектральной линии за счет осевого вращения звезды от других довольно мощных механизмов уширения, например макротурбуленции [11]. Кроме того, доплеровское уширение спектральной линии вследствие вращения зависит от ориентации оси вращения по отношению к лучу зрения. Как показывают многочисленные исследования [2], оси вращения звезд, по-видимому, ориентированы в пространстве случайно, и уверенно получить экваториальную скорость вращения по $v \sin i$ очень сложно.

В [8] отмечено, что уширение линий вследствие макротурбуленции в спектрах цефеид может достигать $v_T \approx (2/3)v \sin i$. Возможно, что и для других типов пульсирующих звезд (например, для звезд типа

Таблица 4. Скорости вращения пульсирующих звезд

Звезда	Тип	$(\Delta\lambda/\lambda) \cdot 10^3$		$v \sin i$, км/с		Число спектрограмм
		Mg II	Fe I	Mg II	Fe I	
RR Lyr	RRab	0,143	0,117	<9	<9	5
X Ari	RRab	0,210	—	12:	—	2
V474 Mon	δ Sct	0,178	0,121	11	10	5
VW Dra	SRD:	0,126	0,092	<9	<9	2
TU Cas	Cep(B)	0,127	0,109	<9	<9	2

RR Lyr) основной вклад в уширение спектральной линии вносит не вращение, а макротурбуленция (это предположение высказано также в [9]). Таким образом, данные определения являются верхним пределом $v \sin i$ из-за влияния макротурбуленции.

Для TU Cas и VW Dra значения $v \sin i$ определены впервые. Их можно рассматривать как верхний предел.

Для V474 Mon ранее приводились значения $v \sin i = 25$ км/с [1, 12]; близкое к нашему значение $v \sin i \approx 10-15$ км/с по спектрограммам с дисперсией 1 нм/мм получено в [6].

Для RR Lyr наше значение $v \sin i$ меньше, чем оценка в [9] (более 13 км/с). В [10] использованы спектрограммы переменных звезд с дисперсией 1,6 нм/мм, и верхний предел определения $v \sin i$ составлял 20 км/с. Это различие можно объяснить тем, что временное разрешение использованных нами спектрограмм выше (табл. 3).

В заключение авторы благодарят Ю. С. Романова за поддержку работы и Т. В. Мишенину за участие в обсуждении.

1. Боярчук А. А., Копылов И. М. Сводный каталог скоростей вращения 2558 звезд // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1964.— 31.— С. 44—99.
2. Грей Д. Наблюдения и анализ звездных фотосфер.— М.: Мир, 1980.— 496 с.
3. Кокс Дж. П. Теория звездных пульсаций.— М.: Мир, 1983.— 326 с.
4. Холопов П. Н., Самусь Н. Н., Горанский В. П. и др. Общий каталог переменных звезд: В 5 т.— М.: Наука, 1985.— Т. 1.— 376 с.; Т. 2.— 360 с.
5. Bernacca P. L., Perinotto M. A catalogue of stellar rotational velocities. I, II // Contrib. Osserv. astrofis. Univ. Padova Asiago.— 1970.— N 239.— P. 1—73.
6. Danziger I. J., Dickens R. J. Spectrophotometry of new short-period variable stars // Astrophys. J.— 1967.— 149, N 1.— P. 55—72.
7. Gray D. A Fourier analysis of the spectral lines of Procyon // Ibid.— 1981.— 251, N 1.— P. 152—154.
8. Kraft R. P. Stellar rotation and stellar evolution among Cepheids and other luminous stars in the Hertzsprung gap // Ibid.— 1966.— 144, N 3.— P. 1008—1015.
9. Preston G. W. The effect of rotation on pulsation in the Hertzsprung gap // Kleine Veröff. Reims-Sternwarte Bamberg.— 1965.— 4, N 40.— P. 155—162.
10. Preston G. W., Smak J., Paczynski B. Atmospheric phenomena in the RR Lyrae stars. II. The 41-day cycle of RR Lyrae // Astrophys. J. Suppl. Ser.— 1965.— 12, N 104.— P. 99—161.
11. Slettebak A., Collins G. W., Boyce B. P. et al. A system of standard stars for rotational velocity determinations // Ibid.— 1975.— 29, N 281.— P. 137—159.
12. Uesugi A., Fukuda I. Catalogue of stellar rotational velocities // Contribs Inst. Astrophys. and Kwasan Observ. Univ. Kyoto.— 1970.— N 189.— P. 1—250.