

УДК 524.384-323.8/33

ОРБИТАЛЬНЫЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРАЛЬНО-ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ HD 37737

© 2013 С. А. Алексеева¹, А. М. Соболев², С. Ю. Горда², М. В. Юшкин³, V. McSwain⁴¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия²Коуровская астрономическая обсерватория, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000 Россия³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия⁴Lehigh University, Bethlehem, PA 18015 USA

Поступила в редакцию 29 октября 2012 года; принята в печать 28 февраля 2013 года

В работе определены орбитальные и физические параметры видимого компонента спектрально-двойной звезды HD 37737 ($m_V = 8.03$). Наблюдения проводились на 1.2-м телескопе Коуровской астрономической обсерватории УрФУ в 2012 г. и на 6-м БТА САО РАН в 2007 и 2009 гг. Лучевые скорости измерялись отдельно по каждой спектральной линии списка методом кросс-корреляции с синтетическим спектром. Последний был рассчитан с использованием сетки не-ЛТР моделей атмосфер с солнечным химсоставом. Значительная разница в эпохах наблюдений (2005–2012 гг.) позволила уточнить орбитальный период звезды ($7^d 84705$) и элементы орбиты двойной системы. Получена оценка функции масс $f(m) = 0.23 \pm 0.02 M_\odot$. Наилучшее согласие между синтетическими и наблюдаемыми спектрами достигается при $T_{\text{eff}} = 30\,000$ К и $\log g = 3.50$ по данным наблюдений на обоих инструментах. Полученные значения параметров соответствуют звезде спектрального класса O9.5 III, масса которой оценивается в $26 \pm 2 M_\odot$. Оценка минимальной массы второго компонента двойной системы равна $6.2 \pm 0.5 M_\odot$. Обнаружен факт различия скоростей, полученных по разным спектральным линиям, что является характерным для звезд-гигантов. Привлекая дополнительные спектры, полученные в 2005 г. на 2.1-м телескопе КРНО, было исследовано влияние данного факта на оценку скорости центра масс системы. Отличие в скоростях различных линий приблизительно одинаково в спектрах, полученных на всех трех использованных инструментах. Полученные соотношения говорят о том, что более глубокие слои атмосферы звезды движутся с большей скоростью, чем наружные. В зависимости от линии, оценка гелиоцентрической скорости центра масс двойной звезды для различных линий варьируется в пределах от -11 до 1 км/с.

Ключевые слова: двойные: спектрально-двойные—звёзды: массивные—звёзды: индивидуальные: HD 37737

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезда HD 37737 является центральной звездой туманности Sh2-232, расположенной в рукаве Персея. Особый интерес к этой звезде вызван тем, что вследствие ее высокой пространственной скорости $V_{\text{pec}} = 28.6 \pm 14.3$ км/с она является кандидатом в звезды-беглецы (runaway stars). Gies и Bolton обнаружили, что звезда является спектрально-двойной и представили первое решение ее орбиты. Видимый компонент системы имеет спектральный класс O9.5 III и величину $m_V = 8.03$ [1]. По результатам последующих наблюдений McSwain et al. [2] уточнили значение периода $7^d 84$, величину полуамплитуды кривой луче-

вой скорости, элементы орбиты и оценили скорость центра масс системы. Был отмечен факт различия скоростей, определенных по различным линиям. Это явление известно для ряда звезд. Например, в атмосфере сверхгигантов различие в скоростях, определенных по разным линиям, может достигать величины 140 км/с [3].

Данная работа была основана на результатах новых наблюдений, проведенных на новом 1.2-м телескопе Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета и 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук. Целью было уточнение физических параметров и параметров орбиты спектрально-двойной системы HD 37737.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

В работе использовались спектры, полученные в 2005–2012 гг. на инструментах трех обсерваторий: Коуровской астрономической обсерватории, Специальной астрофизической обсерватории и Kitt Peak National Observatory (KPNO, США). Общие характеристики спектров, полученных на российских инструментах, приведены в Таблице 1. Наблюдения, выполненные в KPNO, описаны в работе [2]. Во всех полученных спектрах, как и в ранее опубликованных данных, просматриваются линии только одного компонента спектрально-двойной звезды.

2.1. Наблюдения на 1.2-м телескопе КАО УрФУ

Наблюдения HD 37737 на 1.2-м телескопе ($D = 1.21$ м, $F = 12.0$ м) Коуровской астрономической обсерватории УрФУ [4] с использованием оптоволоконного эшелле-спектрографа [5] были проведены в январе–феврале 2012 г. Было получено девять эшелле-спектров со спектральным разрешением $R = 30\,000$. В качестве светоприемного устройства использовалась ПЗС-камера, изготовленная в отделе перспективных разработок САО РАН, оснащенная ПЗС-чипом E2V 40-42 (2048×2048 px, размер пикселя 13.5 мкм), охлаждаемым до температуры порядка -130°C с помощью системы замкнутого цикла CRYOTIGER. На матрице одновременно регистрировалось 60 спектральных порядков, охватывающих область $\lambda\lambda 4000\text{--}7800 \text{ \AA}$. В процессе получения каждого ПЗС-кадра спектра звезды производилось ручное гидирование, осуществляемое движением телескопа на малой скорости и контролируемое на экране монитора по изображению, выдаваемому камерой подсмотра фокального поля телескопа. Экспозиция каждого кадра составляла 20 минут. За один цикл наблюдений получали не менее трех спектров звезды. Непосредственно перед и после съемки каждой триады производилась съемка спектров торий-аргоновой лампы. Впоследствии серия из трех экспозиций суммировалась, что позволяло удалить следы космических частиц и увеличить отношение сигнала к шуму (S/N). Таким образом, эффективная экспозиция каждого используемого при дальнейшей работе спектра составляла 1 час. Отношение S/N в полученных спектрах было не менее 20, что, в сочетании с указанным разрешением, позволяло с хорошей точностью измерить положения линий, описать форму профилей и вычислить лучевую скорость методом кросс-корреляции.

Первичная обработка ПЗС-изображений, проведенная в контексте ECHELLE системы MIDAS включала:

Таблица 1. Общее описание наблюдений

№	JD	Спектр. диапазон, \AA	$n \times t_{\text{exp}}$, мин	R	$\langle S/N \rangle$
БТА, 6 м					
1	375.374	5210–6690	1×60	60 000	200
2	1141.381	4000–5450	1×60	60 000	120
3	1141.422	4000–5450	1×60	60 000	120
4	1141.464	4000–5450	1×60	60 000	80
5	1141.506	4000–5450	1×60	60 000	80
6	1141.584	4000–5450	1×60	60 000	260
КАО, 1.2 м					
7	1945.369	4000–7800	3×20	30 000	36
8	1946.411	4000–7800	3×20	30 000	36
9	1952.178	4000–7800	3×20	30 000	20
10	1952.448	4000–7800	3×20	30 000	20
11	1953.411	4000–7800	4×20	30 000	20
12	1953.451	4000–7800	3×20	30 000	25
13	1973.447	4000–7800	3×20	30 000	20
14	1978.384	4000–7800	3×20	30 000	36
15	1978.260	4000–7800	4×20	30 000	36

1) усреднение кадров bias с последующим вычитанием их из остальных кадров, полученных в процессе наблюдений;

2) вычитание рассеянного света;

3) редукцию за плоское поле;

4) экстракцию порядков спектра;

5) построение дисперсионных кривых по спектрам лампы с полым катодом (ThAr) для перехода от отсчетов в длины волн.

Окончательная обработка выполнена с помощью специализированной программы DECHfits [6], которая, в частности, позволяет произвести:

1) проведение континуума;

2) сглаживание спектра медианным фильтром;

3) измерение лучевых скоростей методом кросс-корреляции.

В спектрах наиболее сильны линии гелия He I, II, а также линии бальмеровской серии водо-

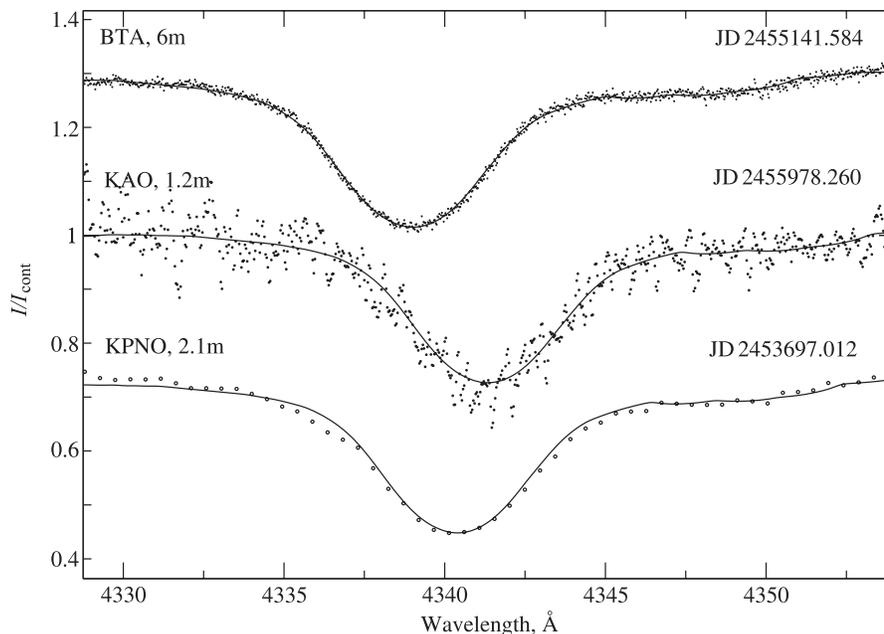


Рис. 1. Нормированные на континуум профили линии $H\gamma$ по данным на разных инструментах. Непрерывной линией показан теоретический спектр. Линии сдвинуты относительно среднего профиля на 0.28.

рода. При достигнутом отношении S/N остальные линии не просматриваются.

2.2. Наблюдения на 6-м БТА САО РАН

Наблюдения на 6-м телескопе БТА САО с использованием спектрографа НЭС [7] были проведены в 2007 г. и 2009 г. В октябре 2007 г. был получен один спектр с часовой экспозицией в области $\lambda\lambda 5210\text{--}6690 \text{ \AA}$, и пять спектров были получены в ноябре 2009 г. с экспозицией 1 час каждый в области $\lambda\lambda 4000\text{--}5450 \text{ \AA}$. Все эшелле-спектры получены со спектральным разрешением $R = 60\,000$. Первичная обработка ПЗС-изображений была проведена в контексте ESHELLE системы MIDAS.

В спектрах, полученных на БТА, отношение S/N достигает 260. Уверенно выделяются линии бальмеровской серии водорода, гелия He I, II, а также линии тяжелых элементов N II, III, O II, Si III, IV, S III, Ne II, Al III, Mg II, S III. Кроме того, хорошо просматриваются межзвездные линии поглощения Ca I $\lambda 4226.73 \text{ \AA}$, CH+ $\lambda 4232.54 \text{ \AA}$, CH $\lambda 4300.32 \text{ \AA}$ и Na I $\lambda\lambda 5889.95, 5895.92 \text{ \AA}$.

2.3. Данные наблюдений на 2.1-м телескопе KPNO

В работе были использованы файлы с готовыми, прошедшими первичную обработку 15 спектрами HD 37737. Они были получены в октябре и ноябре

2005 г. на 2.1-м телескопе KPNO в диапазоне $\lambda\lambda 4050\text{--}4950 \text{ \AA}$ с высоким отношением S/N и спектральным разрешением $R = 3000$, обработаны в системе IRAF. Более подробное описание наблюдений приведено в работе [2]. Сравнение контуров линии $H\gamma$, полученных на разных инструментах, показано на Рис. 1.

3. ОРБИТАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ

3.1. Лучевые скорости

Определение лучевых скоростей выполнялось в пакете DECHfits методом кросс-корреляции профилей линий полученных спектров и синтетического спектра с параметрами и способом вычисления, описанными в Разделе 4.2. В Таблицах 2 и 3 приведены значения гелиоцентрических лучевых скоростей различных линий. Ошибки измерения лучевых скоростей оценивались по формуле:

$$\sigma_{v_r} = \frac{3\omega}{8(1+f)}, \quad (1)$$

где ω — FWHM корреляционной функции, f — отношение высоты корреляционного максимума к амплитуде антисимметричного шума [8].

Поскольку вследствие орбитального движения звезды скорости изменяются с фазой, для дальнейшего анализа значения скоростей по отдельным линиям были приведены к относительным величинам — остаточным скоростям. Для этого из

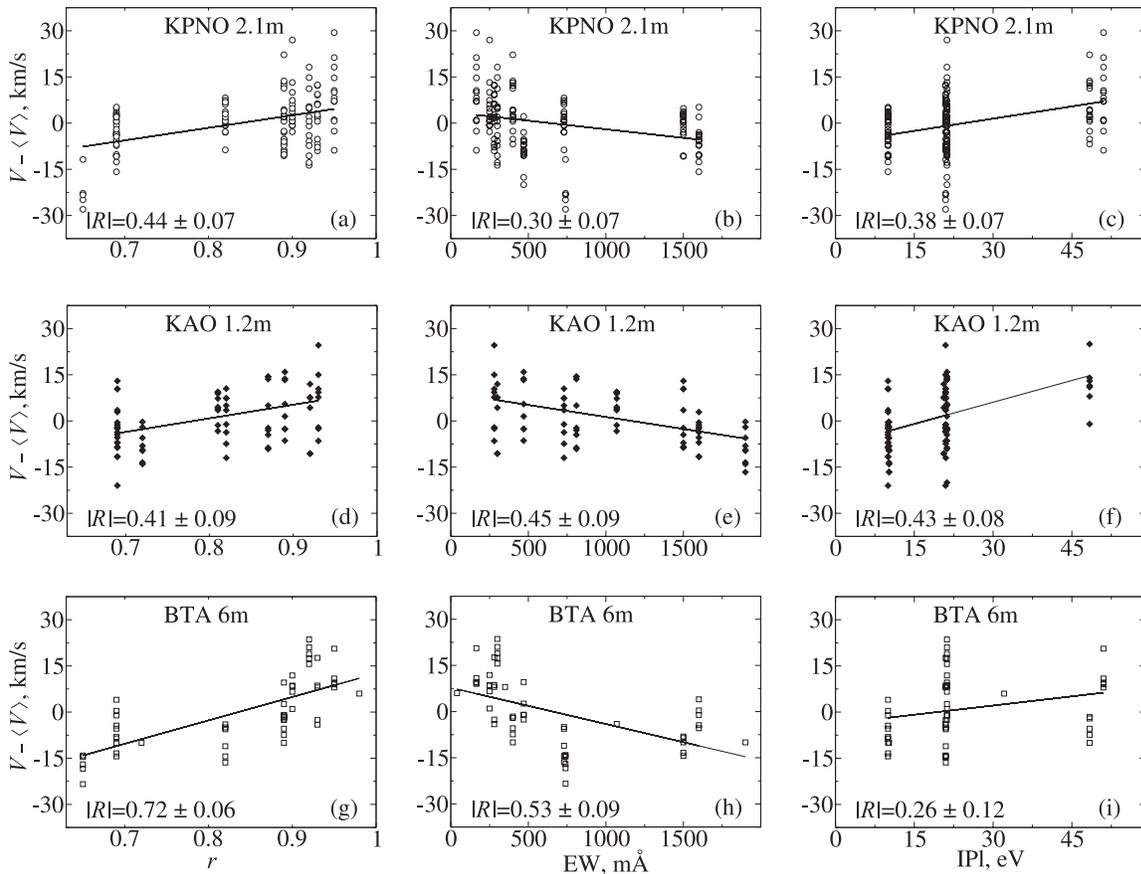


Рис. 2. Зависимости остаточной скорости линий (отличие скорости данной линии от средней по набору линий) от остаточной интенсивности (слева), эквивалентной ширины (по центру) и потенциала возбуждения (справа) по данным, полученным на разных инструментах. Линейные регрессии показывают общие тенденции. Все зависимости отличаются от константы. Это свидетельствует о существовании градиента скорости в атмосфере звезды.

измеренной скорости вычиталась средняя скорость на данный момент наблюдений, усредненная по линиям из списка, приведенного в Таблицах 2 и 3.

Были рассмотрены зависимости остаточных скоростей от остаточной интенсивности (r), эквивалентной ширины (EW) и потенциала возбуждения нижнего уровня линии (IPI) (см. Рис. 2). Для оценки тесноты связи между величинами вычислялся линейный коэффициент корреляции для каждого набора зависимостей (см. в левом нижнем углу каждой части Рис. 2). Во всех случаях, кроме (i), абсолютное значение коэффициента корреляции более чем в три раза превышает его среднеквадратичную ошибку, что подтверждает его значимость. По данным на всех инструментах характер зависимости совпадает: наблюдается общее увеличение остаточной скорости с ростом остаточной интенсивности и потенциала возбуждения нижнего уровня линии, и уменьшение скорости с ростом эквивалентной ширины линии. Показанные на Рис. 2 линии регрессии имеют значимый наклон, что свидетельствует о том, что

линии, формирующиеся в разных слоях атмосферы, показывают различные доплеровские сдвиги. По всей видимости, в атмосфере звезды существует градиент скорости, что является общепризнанным фактом для гигантов. Остаточная интенсивность линии поглощения падает с увеличением оптической толщины, поэтому линии с большими остаточными интенсивностями формируются в более глубоких слоях атмосферы, чем линии с малыми остаточными интенсивностями. Следовательно, увеличение скорости с увеличением остаточной интенсивности означает, что более глубокие слои атмосферы звезды движутся от нас с большей скоростью, чем наружные. Увеличение остаточной скорости с потенциалом возбуждения и ее падение с ростом эквивалентной ширины поддерживают эту гипотезу.

3.2. Кривая лучевых скоростей

Из ранее опубликованных работ следует, что орбита HD 37737 имеет значительный эксцентриситет. В этом случае теоретическая кривая лучевых

Таблица 2. Лучевые скорости, полученные по результатам наблюдений на 6-м БТА. Столбцы лучевых скоростей расположены в порядке номеров спектров от 1 до 6 из Таблицы 1

Line	r	V_r , км/с					
		1	2	3	4	5	6
H β 4861 Å	0.69		-62 ± 2	-60 ± 3	-57 ± 3	-65 ± 2	-78 ± 2
H γ 4341 Å	0.69		-69 ± 2	-69 ± 3	-71 ± 3	-74 ± 2	-87 ± 2
H α 6563 Å	0.72	4 ± 2					
He I 5876 Å	0.81	10 ± 2					
He I 4471 Å	0.82		-72 ± 2	-66 ± 3	-66 ± 3	-77 ± 3	-87 ± 3
He II 4686 Å	0.89		-63 ± 2	-62 ± 2	-71 ± 2	-68 ± 1	-78 ± 2
He I 4922 Å	0.89		-62 ± 3	-63 ± 3	-62 ± 3	-58 ± 3	-63 ± 3
He I 4388 Å	0.90		-49 ± 3	-52 ± 3	-60 ± 3	-52 ± 2	-66 ± 2
He I 4143 Å	0.92		-42 ± 3	-43 ± 3	-40 ± 2	-45 ± 2	-49 ± 2
He I 4713 Å	0.93		-65 ± 3	-63 ± 3	-53 ± 3	-43 ± 3	-64 ± 3
He II 4541 Å	0.95		-50 ± 3	-51 ± 4	-52 ± 4	-40 ± 3	-63 ± 3
He II 5411 Å	0.95	22 ± 3					
C III 5695 Å	0.98	20 ± 4					
Mean	—	14 ± 3	-61 ± 3	-60 ± 3	-61 ± 3	-61 ± 3	-73 ± 3

Таблица 3. Лучевые скорости, полученные по результатам наблюдений на 1.2-м телескопе Коуровской астрономической обсерватории УрФУ. Столбцы лучевых скоростей расположены в порядке номеров спектров от 7 до 15 из Таблицы 1

Line	r	V_r , км/с								
		7	8	9	10	11	12	13	14	15
H β 4861 Å	0.69	14 ± 5	34 ± 5	-1 ± 6	1 ± 6	23 ± 6	11 ± 6	-72 ± 6	30 ± 5	40 ± 5
H γ 4341 Å	0.69	9 ± 5	24 ± 5	14 ± 6	0 ± 6	19 ± 6	33 ± 6	-86 ± 6	27 ± 5	41 ± 4
H α 6563 Å	0.72	8 ± 4	23 ± 4	-1 ± 4	2 ± 4	10 ± 4	6 ± 4	-79 ± 4	26 ± 4	27 ± 4
He I 5876 Å	0.81	25 ± 4	40 ± 4	-20 ± 4	-1 ± 4	28 ± 4	32 ± 4	-61 ± 4	34 ± 4	34 ± 4
He I 4471 Å	0.82	14 ± 5	30 ± 4	6 ± 5	-24 ± 5	27 ± 5	30 ± 5	-77 ± 4	28 ± 4	20 ± 4
He I 6678 Å	0.87	9 ± 6	22 ± 6	6 ± 6			37 ± 6	-68 ± 6	49 ± 5	28 ± 5
He I 4922 Å	0.89	31 ± 7	47 ± 7	-19 ± 7	16 ± 7	29 ± 7	20 ± 6	-27 ± 7	29 ± 7	27 ± 7
He I 5015 Å	0.92	22 ± 7		13 ± 8	10 ± 8	31 ± 8	12 ± 8			
He I 4713 Å	0.93	27 ± 8	29 ± 8	11 ± 9	10 ± 8	21 ± 9		-50 ± 8	60 ± 9	25 ± 8
Mean	—	18 ± 6	31 ± 6	1 ± 6	2 ± 6	24 ± 6	23 ± 6	-65 ± 6	35 ± 6	30 ± 6

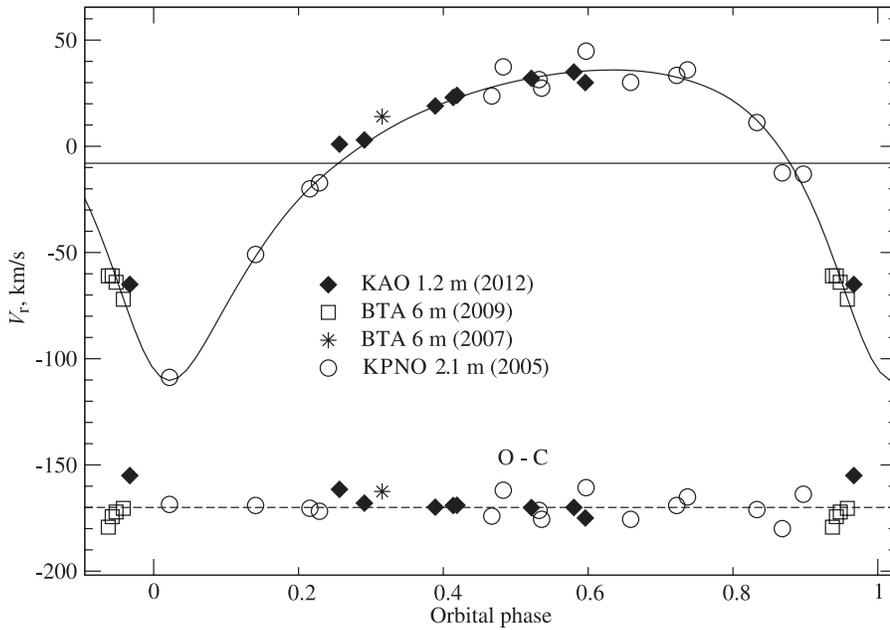


Рис. 3. Кривая лучевых скоростей HD 37737, построенная по усредненным значениям скоростей, приведенных в Таблицах 2 и 3. Горизонтальная линия на -8 км/с соответствует скорости центра масс системы. Линия O–C сдвинута произвольно на -170 км/с [2].

скоростей описывается следующим соотношением:

$$V_r(\theta) = V_{cm} + K_1(\cos(\theta + \omega) + e \cos \omega), \quad (2)$$

где V_{cm} — гелиоцентрическая лучевая скорость центра масс системы; θ — истинная аномалия; ω — долгота периастра; e — эксцентриситет орбиты; K_1 — полуамплитуда кривой лучевых скоростей. Поскольку в нашем случае орбита имеет значительный эксцентриситет, для более точного вычисления величины истинной аномалии вместо итерационного решения уравнения Кеплера было использовано разложение истинной аномалии по степеням эксцентриситета с точностью до седьмой степени e из работы [9]:

$$\begin{aligned} \theta = M + & \left(2e - 0.25e^3 + \frac{5}{96}e^5 + \frac{107}{4608}e^7 \right) \sin M \\ & + \left(\frac{5}{4}e^2 - \frac{11}{24}e^4 + \frac{17}{192}e^6 \right) \sin 2M \\ & + \left(\frac{13}{12}e^3 - \frac{43}{64}e^5 + \frac{95}{512}e^7 \right) \sin 3M \\ & + \left(\frac{103}{96}e^4 - \frac{451}{480}e^6 \right) \sin 4M \\ & + \left(\frac{1097}{960}e^5 - \frac{5957}{4608}e^7 \right) \sin 5M \\ & + \frac{1223}{960}e^6 \sin 6M + \frac{47273}{32257}e^7 \sin 7M, \end{aligned} \quad (3)$$

где M — средняя аномалия, которая выражается как:

$$M = \frac{2\pi}{P}(T - T_0). \quad (4)$$

Поиск оптимальных значений независимых параметров проводился с использованием нелинейного метода наименьших квадратов Марквардта. Помимо параметров, явно указанных в соотношении (2), в процессе аппроксимации варьировалась величина периода системы. Начальные значения параметров брались из работы [2]. Первоначально для поиска параметров и построения кривой лучевых скоростей использовались усредненные лучевые скорости, полученные по списку спектральных линий. Усреднение значений скоростей проводилось отдельно по данным, полученным на каждом инструменте (см. Таблицы 2 и 3). В результате аппроксимации нам удалось уточнить величину орбитального периода и предложить новые эфемериды:

$$JD_{\odot}(I_{min}) = 2453690.23246 + 7^d 84705 E. \quad (5)$$

Новая кривая лучевых скоростей, построенная с использованием новых эфемерид представлена на Рис. 3.

Наличие градиента скорости в атмосфере звезды вносит неопределенность в значение скорости центра масс системы V_{cm} . Для оценки этой неопределенности были построены кривые лучевых скоростей по отдельным линиям, и по ним вычислены новые параметры кривых. Результаты

Таблица 4. Параметры орбиты, полученные по кривым лучевых скоростей по разным линиям, расположенные в порядке возрастания оптической глубины формирования линии. Для слабых линий He II λ 4686 Å, He I λ 4388 Å, He II λ 4541 Å применялись данные только с 6-м БТА и 2.1-м KPNO. Указанные неопределенности соответствуют ошибке в 1σ . Последняя строка (Mean) содержит параметры, определённые по средней кривой лучевых скоростей (Рис. 3)

Line	$\log \tau_{\text{Ross}}$	e	ω , rad	K_1 , км/с	V_{cm} , км/с	$f(m)$, M_{\odot}	rms, км/с	Amount of lines
H α 6563 Å	-6.75	0.46 ± 0.04	2.85 ± 0.08	60.6 ± 4.5	-11 ± 2	0.13 ± 0.03	5.6	БТА (1), КАО (9)
H β 4861 Å	-6.51	0.44 ± 0.02	2.82 ± 0.03	70.4 ± 2.7	-9 ± 2	0.21 ± 0.02	7.8	БТА (5), КАО (9), KPNO (14)
H γ 4341 Å	-6.29	0.43 ± 0.02	2.80 ± 0.03	75.1 ± 2.6	-11 ± 2	0.25 ± 0.03	7.2	БТА (5), КАО (9), KPNO (14)
He I 5876 Å	-2.39	0.44 ± 0.03	2.74 ± 0.04	74.2 ± 3.2	-8 ± 2	0.24 ± 0.03	8.2	БТА (1), КАО (9)
He I 4471 Å	-1.99	0.43 ± 0.02	2.79 ± 0.03	74.9 ± 3.1	-9 ± 2	0.25 ± 0.03	8.9	БТА (5), КАО (9), KPNO (14)
He I 4922 Å	-1.58	0.44 ± 0.05	2.77 ± 0.06	65.5 ± 5.0	-8 ± 2	0.17 ± 0.04	14.7	БТА (5), КАО (9), KPNO (14)
He II 4686 Å	-1.38	0.43 ± 0.03	2.84 ± 0.05	72.4 ± 4.3	-3 ± 2	0.23 ± 0.04	12.4	БТА (5), KPNO (13)
He I 4388 Å	-1.18	0.44 ± 0.03	2.83 ± 0.04	64.6 ± 5.0	-3 ± 2	0.16 ± 0.04	9.2	БТА (5), KPNO (13)
He II 4541 Å	-0.59	0.43 ± 0.03	2.86 ± 0.04	76.1 ± 3.4	1 ± 2	0.26 ± 0.04	8.5	БТА (5), KPNO (13)
Mean	-	0.44 ± 0.01	2.76 ± 0.02	73.1 ± 1.7	-8 ± 2	0.23 ± 0.02	5.8	БТА (6), КАО (9), KPNO (14)

расчетов представлены в Таблице 4 в порядке возрастания оптической глубины ($\log \tau_{\text{Ross}}$) спектральной линии. Указанные неопределенности соответствуют ошибке в 1σ . Вероятно существует зависимость скорости центра масс V_{cm} от значения оптической глубины, на которой формируется линия. Эта зависимость является спорной, поскольку подкрепляется данными всего по трем линиями гелия. Некоторая, более слабая, зависимость от оптической глубины, вероятно, прослеживается и в значениях полуамплитуды K_1 . Это может быть связано с несимметричностью атмосферы. Для более подробного исследования требуется проведение дополнительных наблюдений с высоким спектральным разрешением и отношением S/N . Как можно видеть, оценка гелиоцентрической лучевой скорости центра масс, вычисленная по скоростям отдельных линий, изменяется в пределах от -11 до 1 км/с.

Последняя строка в Таблице 4 (Mean) содержит параметры, определённые по средней кривой лучевых скоростей (Рис. 3). Видно, что все величины совпадают в пределах ошибок измерений.

4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

4.1. Спектральный класс и класс светимости

Визуальное сравнение со спектром из атласа Walborn и Fitzpatrick [10] позволяет определить

спектральный класс звезды как O9.5 III, что согласуется с полученной ранее оценкой [11]. Кроме того, были использованы количественные критерии, описанные в работах [12, 13] для O-звезд поздних спектральных классов. Эти критерии основаны на отношении эквивалентных ширин линий He I λ 4471 Å и He II λ 4542 Å. Измеренная по спектрам HD 37737 величина

$$\log(W_{\lambda 4471 \text{ Å}}/W_{\lambda 4542 \text{ Å}}) = 0.52 \pm 0.04$$

соответствует спектральному классу O9.5.

Определение класса светимости основано на значении отношения эквивалентных ширин линий Si IV λ 4089 Å и He I λ 4143 Å. Измеренная величина

$$\log(W_{\lambda 4089 \text{ Å}}/W_{\lambda 4143 \text{ Å}}) = 0.22 \pm 0.04$$

соответствует классу светимости III. Дополнительно была измерена величина

$$\log(W_{\lambda 4388 \text{ Å}} \times W_{\lambda 4686 \text{ Å}}) = 5.2 \pm 0.03,$$

которая, согласно [13], также говорит о классе светимости III. В работе [2] было получено значение $\log g$, которое, согласно калибровке [14], соответствует классу светимости V, а не III.

4.2. T_{eff} и $\log g$

С целью разрешить указанное выше несоответствие основные параметры атмосферы звезд

ды HD 37737 были уточнены на основе анализа спектров БТА, имеющих существенно более высокое спектральное разрешение и отношение S/N , чем в спектрах [2]. При выполнении Фурье-преобразования наблюдаемых профилей линий О II $\lambda\lambda 5592, 4185 \text{ \AA}$ и He I $\lambda\lambda 6678, 5876, 5015, 4922, 4471, 4143 \text{ \AA}$ при нахождении первого нуля была определена проекция скорости вращения звезды $v \sin i = 182 \text{ км/с}$ по методу Кэрролла, приведенному в монографии Сахибуллина [15]. Полученная величина совпадает с полученной в работе [2].

Физические параметры атмосферы звезды HD 37737 (эффективная температура T_{eff} и сила тяжести на поверхности $\log g$) находились с использованием сетки не-ЛТР моделей атмосфер звезд солнечного химического состава OSTAR grid [16]. Шаги по температуре и $\log g$ составляли 2500 К и 0.25 соответственно. Скорость микротурбулентности была принята равной $V_{\text{mic}} = 10 \text{ км/с}$. Дополнительное исследование показало, что увеличение V_{mic} до 23 км/с не приводит к заметным изменениям найденных значений параметров атмосферы. Синтетические спектры вычислялись с использованием кода SYNSPEC48 [17]. Свертка с профилем вращения и инструментальным профилем при расчете данного набора спектров производилась с помощью программы ROTIN3. Наилучшим считалось сочетание модельных параметров, при котором реализовывалось минимальное отклонение профилей линий в синтетических спектрах от профилей, полученных из наблюдений. В анализе использовались линии водорода ($H\alpha, H\beta, H\gamma, H\delta$) и гелия (He I $\lambda\lambda 4388, 4471, 4922 \text{ \AA}$, He II $\lambda\lambda 4200, 4541, 4686, 5411 \text{ \AA}$). Величина отклонения вычислялась по формуле:

$$\chi^2 = \frac{1}{n_{\text{lines}}} \sum_{i=0}^{n_{\text{lines}}} \frac{w_i}{n_\nu} \sum_{j=1}^{n_\nu} \left(\frac{y_j^i - y_{j \text{ obs}}^i}{\sigma^i} \right)^2 \quad (6)$$

где n_ν — число точек на профиле в спектральной линии i ; n_{lines} — число спектральных линий, которые использовались при анализе; $y_{j \text{ obs}}^i$ — остаточная интенсивность в j -ой точке спектральной линии i в спектре, полученном из наблюдений; y_j^i — остаточная интенсивность в линии синтетического спектра; w_i — вес, соответствующий спектральной линии i ; $\sigma^i = (S/N)^{-1}$ учитывает отношение S/N для линии i . Для всех линий принимались веса равные единице. Исследуемая область значений T_{eff} (27 500–35 000 К) и $\log g$ (2.75–4.50) была выбрана в соответствии со спектральным классом звезды.

Вышеописанный метод был применен к спектрам высокого спектрального разрешения, полученным на 6-м и 1.2-м телескопах. В обоих случаях

минимальное значение χ^2 соответствовало модели атмосферы с $T_{\text{eff}} = 30\,000 \text{ К}$ и $\log g = 3.50$. Эти значения, полученные с использованием наиболее точных в настоящее время методов и наблюдательных данных, соответствуют звезде спектрального класса O9.5 III.

4.3. Массы компонентов

Для определения массы звезды была использована методика, описанная в работе [14]. Согласно калибровке абсолютная звездная величина для звезд спектрального класса O9.5 III равна $M_V = -5.174$. Боллометрическая поправка для звезды с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 30\,000 \text{ К}$ составляет, соответственно, $BC = -2.864$. Полученное значение абсолютной звездной величины соответствует радиусу звезды $R = 13.4 \pm 0.9 R_\odot$. Далее, используя соотношения между фундаментальными параметрами звезды и параметрами атмосферы, по значениям $T_{\text{eff}} = 30\,000 \text{ К}$ и $\log g = 3.50$ получаем оценку массы первичного компонента HD 37737 — $M_1 = 26 \pm 2 M_\odot$. Полученная масса первичного компонента в комбинации с функцией масс $f(m) = 0.23 \pm 0.02 M_\odot$ (см. Таблицу 4) позволяет оценить массу вторичного компонента двойной системы — $M_2 > 6.2 \pm 0.5 M_\odot$. Таким образом, первичный компонент двойной системы HD 37737 является массивной звездой, а вторичный — звездой промежуточной или большой массы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Е. Л. Ченцова и С. Ю. Парфёнова за помощь в работе. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.” (госконтракт 14.518.11.7064). М. В. Юшкин благодарит Российский Фонд Фундаментальных Исследований за частичную финансовую поддержку настоящей работы (грант РФФИ 12-07-00739). Наблюдения на 6-м телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракты 14.518.11.7070 и 16.518.11.7073).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. R. Gies and C. T. Bolton, *Astrophys. J. Suppl.* **61**, 419 (1986).
2. V. McSwain, T. S. Boyajian, E. D. Grundstrom, et al., *Astrophys. J.* **655**, 473 (2007).
3. E. L. Chentsov and A. N. Sarkisyan, *Astrophysical Bulletin* **62**, 257 (2007).

4. С. Ю. Горда, П. Е. Захарова, В. В. Крушинский, Э. Д. Кузнецов в *Трудах 38-ой международной студенческой научной конференции "Физика космоса"* (Издательство УрГУ, Екатеринбург, 2009), с. 110.
5. V.E. Ranchuk, M. V. Yushkin, and M. V. Yakorov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 355 (2011).
6. Г. А. Галазутдинов, Препринт САО No. 92 (САО РАН, Нижний Архыз, 1992).
7. V. E. Ranchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Naidenov, *J. Opt. Tech.* **76**, 87 (2009).
8. M. J. Kurtz, D. J. Mink, W. F. Wyatt, et al., *ASP Conf. Ser.* **25**, 432 (1992).
9. Д. Брауэр, Д. Клеменс, *Методы небесной механики* (Мир, Москва, 1964).
10. N. R. Walborn and E. L. Fitzpatrick, *PASP* **102**, 379 (1990).
11. C. Cruz-Gonzalez, E. Recillas-Cruz, R. Costero, et al., *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* **1**, 211 (1974).
12. P. S. Conti and W. R. Alschuler, *Astrophys. J.* **170**, 325 (1971).
13. G. Mathys, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **76**, 427 (1988).
14. F. Martins, D. Schaerer, and D. J. Hillier, *Astronom. and Astrophys.* **436**, 1049 (2005).
15. Н. А. Сахибуллин, *Методы моделирования в астрофизике*, Том 2 (Фэн, Казань, 2003).
16. T. Lanz and I. Hubeny, *Astrophys. J. Suppl.* **147**, 225 (2003).
17. I. Hubeny and T. Lanz, *Astrophys. J. Suppl.* **262**, 501 (1992).

Orbital and Physical Parameters of the Spectroscopic Binary HD 37737

S. A. Alexeeva, A. M. Sobolev, S. Yu. Gorda, M. V. Yushkin, V. McSwain

We report the physical and orbital parameters of the visible component of the spectroscopic binary HD 37737 ($m_V = 8.03$). The observations were performed with the UFU Kourvka Astronomical Observatory 1.2-m telescope in 2012 and the 6-m BTA telescope of the SAO RAS in 2007 and 2009. Radial velocities were measured separately from each spectral line of the list by the cross-correlation method with a synthetic spectrum. The latter was calculated using the grids of non-LTE model atmospheres with solar chemical compositions. A significant difference in the epochs of observations (2005–2012) allowed to refine the orbital period of the star ($7^d.84705$) and the orbital elements of the binary system. We obtained an estimate of the mass function $f(m) = 0.23 \pm 0.02 M_\odot$. The best agreement between the synthetic and observed spectra is achieved at $T_{\text{eff}} = 30\,000$ K and $\log g = 3.50$ according to the observations on both instruments. The obtained parameters correspond to a star of spectral type O9.5 III, with mass estimated at $26 \pm 2 M_\odot$. The minimum mass estimate of the secondary component of the binary is $6.2 \pm 0.5 M_\odot$. We have discovered a fact that the velocities, obtained from different spectral lines, differ, which is typical for giant stars. Engaging additional spectra, obtained in 2005 with the 2.1-m KPNO telescope, we investigated the effect of this fact on the estimate of the speed of the system's center of mass. The difference in the velocities of various lines is approximately the same in the spectra, obtained at all the three instruments. The obtained ratios suggest that the deeper layers of the atmosphere of the star are moving with a greater velocity than the outer layers. Depending on the line, the estimate of the heliocentric velocity of the binary's center of mass varies in the range from -11 to 1 km/s.

Keywords: *binaries: spectroscopic—stars: massive—stars: individual: HD 37737*