

УДК 524.383-33

ФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ CVBS. XII. FIN 350 (HIP 64838)*

© 2017 М. А. Аль-Вардат^{1**}, Х. А. Докобо², А. А. Абушаттал², П. П. Кампо²

¹*Al al-Bayt University, Mafrqa, 25113 Jordan*

²*Обсерватория Р. М. Аллер, университет Сантьяго де Компостела, Сантьяго де Компостела, 15782 Испания*

Поступила в редакцию 24 октября 2016; принята в печать 10 января 2017

Представлено полное астрофизическое и динамическое исследование тесной визуально-двойной системы Finsen 350 (A7V + F0V). Начиная с полного спектрального распределения энергии и разности между величинами субкомпонентов, комплексный метод Аль-Вардата для анализа тесных визуальных двойных систем был применен для обратного построения спектрального распределения энергии отдельных компонентов и системы в целом. Этот метод был использован вместе с аналитическим методом Докобо для вычисления новых орбит. Если принять во внимание близкие значения масс компонентов системы (3.07 и 3.41 M_{\odot}), вероятны как коротко- так и долгопериодическая орбиты (около девяти и восемнадцати лет соответственно). Однако мы подтвердили, что верным является короткий период. Кроме того, приведены другие физические, геометрические и динамические параметры этой системы, такие как эффективные температуры, поверхностные гравитационные ускорения, абсолютные звездные величины, радиусы, динамический параллакс и т.д. Фаза жизни на Главной последовательности для обоих компонентов соответствует звездам с возрастом около 0.79 млрд лет.

Ключевые слова: *двойные: визуально-двойные — звезды: интерферометрические — звезды: фотометрия*

1. ВВЕДЕНИЕ

Большая часть звезд, которые при визуальном наблюдении выглядят, как отдельные объекты в небе, в действительности представляет собой двойные или кратные системы, что было открыто миссией HIPPARCOS [1, 2]. Вообще, двойные системы являются основным источником информации о звездных параметрах, особенно о массах и расстояниях. Что касается субгигантов и звезд нижней части Главной последовательности, то они практически определяют наше понимание физики звезд [3].

Кроме исследования затменных двойных, не существует другого прямого способа измерения физических и геометрических характеристик двойных звездных систем даже с помощью современных методов наблюдения, таких как спеклинтерферометрия и адаптивная оптика. Ситуация несколько усложняется при изучении тесных визуально-двойных систем (Close Visual Binary System, CVBS), особенно субгигантов, которые

в силу своей короткой эволюционной стадии встречаются не так часто [4].

Эта трудность была преодолена путем применения комплексного метода Аль-Вардата для анализа тесных визуально-двойных звезд, который сочетает в себе различные результаты наблюдений и методы анализа, такие как спеклинтерферометрия, спектрофотометрия, моделирование атмосфер и динамический анализ. Этот метод дает точное определение полного набора физических и геометрических параметров, которые включают в себя эффективные температуры, ускорение свободного падения, радиусы, массы, параметры орбит, абсолютные величины, плотности, спектральные классы и классы светимости компонентов тесных визуально-двойных систем. Впервые разработанный и рассмотренный в работах [5, 6], метод был применен при изучении нескольких близких визуально-двойных звезд Главной последовательности, а именно: ADS 11061, COU 1289, COU 1291, HIP 11352, HIP 11253, HIP 70973 и HIP 72479 [5–9], а также к субгигантов CVBS, HD 25811 [10], HD 375 [11] и HD 6009 [12]. Он был также применен при исследовании спектральной тесной двойной системы Gliese 762.1 (статья десятая в данной серии работ).

*Текст был представлен авторами на английском языке.

**E-mail: mwardat@aabu.edu.jo

Таблица 1. Данные о FIN 350 из каталогов SIMBAD, NASA/IPAC, HIPPARCOS и Tycho

Параметр	Значение	Источник
α_{2000}	13 ^h 17 ^m 29 ^s .853	SIMBAD*
δ_{2000}	-00 ^h 40 ^m 33 ^s .83	SIMBAD
m_V	6 ^m 358	SIMBAD
$E(B - V)$	0.026	NASA/IPAC**
A_V	0.128	[14]
$V_{J, \text{HIP}}$	6 ^m 36 ± 0.06	HIP 97 [15]
$(B - V)_{J, \text{HIP}}$	0 ^m 26 ± 0.06	HIP 97
B_T	6 ^m 66 ± 0.004	Tycho [16]
V_T	6 ^m 380 ± 0.004	Tycho
$(B - V)_{J, \text{Tycho}}$	0 ^m 255 ± 0.05	Tycho
$\pi_{\text{HIP}} (\text{new})$	12.28 ± 0.77 mas	HIP 07 [17]
$\pi_{\text{HIP}} (\text{old})$	13.45 ± 0.77 mas	HIP 97

* <http://simbad.u-strasbg.fr>

** <http://irsa.ipac.caltech.edu>

Настоящая статья является двенадцатой в этой серии. В ней дается анализ визуально-двойной звезды FIN 350 (HIP 64838, HD 115488, Tycho 4958-1448-1). В Йельском каталоге ярких звезд (Bright Star Catalogue) и в Каталоге визуально-двойных звезд (Index Catalogue of Visual Double Stars) она представлена как двойная звезда [13]. В таблице 1 содержится основная информация об этой системе из каталогов SIMBAD, NASA/IPAC, HIPPARCOS и Tycho (ESA) [14–17]. Эта звезда наблюдалась впервые в эпоху 1959.47 Финсеном, который обнаружил ее двойственность и измерил величину углового расстояния $\rho = 0''.1$ с позиционным углом θ в 27° . Он также определил, что оба компонента одинаковой яркости — 7^m1 , для чего использовал им же разработанный визуальный интерферометр.

До сих пор непонятно, принадлежат компоненты системы к Главной последовательности или к фазе субгигантов. Маларода [18] отнес систему к спектральному классу F0V МК, тогда как Коули [19] классифицировал ее как A7IV (или умеренный A7m). Таким образом, эта система представляется интересной для изучения, а определение в данной работе ее параметров расширит наши представления о двойных системах в целом и, следовательно,

поможет понять механизмы формирования и эволюции таких систем.

2. ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТЫ

Параметры орбиты этой системы, ранее рассчитанные Бейзом [20]: $P = 8.989$ лет, $a = 86$ миллисекунд дуги; Харткопфом и др. [21]: $P = 9.046$ лет, $a = 79.7$ миллисекунды дуги; и более поздние, рассчитанные Хорчем и др. [22]: $P = 9.156$ лет, $a = 80.8$ миллисекунды дуги.

Последние спекл-наблюдения наводят на мысль о пересмотре ранее принятых результатов и, принимая во внимание небольшую разницу звездных величин компонентов, мы решили рассчитать не только короткопериодическую (примерно девять лет), но и долгопериодическую (около восемнадцати лет) орбиты, отражая некоторые измерения на 180° (см. рис. 1 и 2). Точнее, орбита, полученная Хорчем и др. [22], дает следующие ошибки измерений θ для эпох 2007.329, 2009.260 и 2009.446 (три наблюдения в данной последней эпохе), которые находятся вблизи периастра: $+4^\circ7$, $+3^\circ0$, $+4^\circ0$, $+5^\circ8$ и $+5^\circ4$. Более того, Хорч сам предоставил нам неопубликованные данные наблюдений, выполненных в 2013.4026. Аналитический метод Докобо [23, 24] был использован для вычислений новых орбит.

В первом столбце таблицы 2 дана дата наблюдений. Столбцы (2), (3), (4) и (5) содержат значения позиционного угла и углового расстояния с соответствующими стандартными ошибками. В столбцах (6) и (7) показана наблюдаемая разница звездных величин компонентов, при этом столбцы (8) и (9) включают в себя длину волны и стандартную ошибку наблюдений. Размер зеркала телескопа, на котором были выполнены наблюдения, указан в столбце (10). И наконец столбцы (11), (12) и (13) содержат ссылки на публикации, в которых были представлены измерения, используемые методы и вес, присвоенный наблюдениям.

Элементы орбиты и массы компонентов, определенные в настоящей работе, так же как и их стандартные ошибки, приведены в таблице 3.

Таблица 4 содержит среднеквадратические ошибки и ошибки среднего для позиционных углов и расстояния между компонентами для орбит, вычисленных в данной работе, а также для ранее определенных орбит. В таблице 5 представлены эфемериды для каждой орбиты в период между 2014 и 2020 гг. Рассматривая эфемериды обоих решений, в самом ближайшем будущем можно будет увидеть различие между двумя рассчитанными орбитами.

Таблица 2. Наблюдательные данные для Finsen 350

Дата	θ , deg	$\sigma\theta$, deg	ρ , arcsec	$\sigma\rho$, arcsec	δt , mas	$\sigma\delta t$	Фильтр λ , нм	$\delta\lambda$	Размер зеркала, м	Ссылка*	Метод*	Вес*
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1959.47	27.1	—	0.131	—	0.0	—	-	-	0.7	Fin1959b	J	5
1960.55	29.2	—	0.126	—	0.1	—	-	-	0.7	Fin1961	J	5
1964.530	162.5	—	0.104	—	0.0	—	-	-	0.7	Fin1965a	J	5
1965.545	186.3	—	0.126	—	0.0	—	-	-	0.7	Fin1966a	J	5
1966.520	201.5	—	—	—	—	—	-	-	0.7	Fin1967a	J	0
1966.527	203.2	—	0.134	—	0.0	—	-	-	0.7	Fin1967a	J	5
1967.5447	208.4	—	0.140	—	0.0	—	-	-	0.7	Fin1969a	J	5
1968.545	200.8	—	0.137	—	0.0	—	-	-	0.7	Fin1969a	J	5
1976.2959	12.5	0.7	0.131	0.001	—	—	552	20	3.8	McA1978b	Sc	15
1976.3697	13.9	—	0.114	—	—	—	552	20	2.1	McA1982b	Sc	10
1976.4570	15.0	0.4	0.129	0.001	—	—	552	20	3.8	McA1978b	Sc	15
1977.0877	18.6	0.6	0.131	0.001	—	—	552	20	3.8	McA1979a	Sc	15
1977.1751	15.9	—	0.120	—	—	—	552	20	2.1	McA1982b	Sc	10
1977.3280	19.9	—	0.119	—	—	—	552	20	2.1	McA1982b	Sc	10
1978.1499	26.9	0.5	0.118	0.001	—	—	470	-	3.8	McA1980b	Sc	15
1978.3109	32.3	—	0.112	—	—	—	470	-	2.1	McA1984b	Sc	10
1979.3622	38.3	—	0.085	—	—	—	470	-	3.8	McA1982d	Sc	15
1983.0701	350.3	—	0.080	—	—	—	549	22	3.8	McA1987b	Sc	15
1983.4332	355.4	—	0.093	—	—	—	549	22	3.8	McA1987b	Sc	15
1984.0532	1.1	—	0.125	—	—	—	549	22	3.8	McA1987b	Sc	15
1984.3752	5.6	—	0.115	—	—	—	549	22	3.8	McA1987b	Sc	15
1984.3807	5.3	—	0.116	—	—	—	549	22	3.8	McA1987b	Sc	15
1984.3835	5.9	—	0.116	—	—	—	549	22	3.8	McA1987b	Sc	15
1985.1805	13.0	—	0.117	—	—	—	600	14	6.0	Bag1987	S	20
1985.2438	14.0	2.9	0.126	0.013	—	—	625	75	1.9	Bnu1986	S	10
1985.3389	10.5	—	0.129	—	—	—	549	22	3.0	Hrt2000a	Sc	15
1985.4840	13.8	—	0.126	—	—	—	549	22	3.8	McA1987b	Sc	15
1986.4067	20.3	—	0.127	—	—	—	549	22	3.8	McA1989	Sc	15
1987.2642	26.2	—	0.117	—	—	—	549	22	3.8	McA1989	Sc	15
1987.3800	27.5	—	0.108	—	—	—	-	-	6.0	Bag1989a	S	20
1987.3800	27.5	—	0.108	—	—	—	-	-	6.0	Bag1991b	S	20
1988.1655	35.5	—	0.088	—	—	—	549	22	3.6	McA1993	Sc	15
1988.2524	36.8	—	0.080	—	—	—	549	22	3.8	McA1989	Sc	15
1990.2759	33.8	—	0.053	—	—	—	467	16	3.8	Hrt1992b	Sc	15
1991.3186	331.0	—	0.059	—	—	—	549	22	3.8	Hrt1994	Sc	15

Таблица 2. (Продолжение)

Дата	θ , deg	$\sigma\theta$, deg	ρ , arcsec	$\sigma\rho$, arcsec	δm , mas	$\sigma\delta m$	Фильтр λ , нм	$\delta\lambda$	Телескоп размер, м	Ссылка*	Метод*	Вес*
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1992.3098	352.8	—	0.085	—	—	—	549	22	3.8	Hrt1994	Sc	15
1992.4572	353.9	—	0.093	—	—	—	549	22	4.0	Hrt1996a	Sc	15
1993.0905	1.5	—	0.105	—	—	—	549	22	4.0	Hrt1996a	Sc	15
1993.1973	1.6	—	0.114	—	—	—	549	22	3.8	Hrt1994	Sc	15
1995.1495	17.8	—	0.120	—	—	—	549	22	2.5	Hrt1997	Sc	10
1995.3109	17.2	—	0.121	—	—	—	549	22	2.5	Hrt1997	Sc	10
1996.1840	24.2	—	0.116	—	—	—	549	22	4.0	Hrt2000a	Sc	15
2001.2708	350.3	0.8	0.078	0.003	—	—	550	14	6.0	Bag2006b	S	20
2001.2708	350.2	0.6	0.079	0.003	—	—	600	30	6.0	Bag2006b	S	20
2001.2708	350.3	0.7	0.078	0.003	—	—	750	35	6.0	Bag2006b	S	20
2002.3224	1.8	—	0.100	—	0.62	—	550	40	3.5	Hor2008	S	15
2002.3224	3.1	—	0.106	—	0.48	—	754	44	3.5	Hor2008	S	15
2004.1960	11.8	0.7	0.141	0.002	—	—	550	24	1.55	Hrt2008	Su	10
2006.1915	32.1	—	0.092	—	—	—	550	24	4.0	Msn2009	Su	15
2007.0105	222.2	—	0.0716	—	0.99	—	550	40	3.5	Hor2011b	S	15
2007.3286	238.8	—	0.0456	—	0.58	—	550	40	3.5	Hor2011b	S	15
2007.3286	—	—	—	—	1.63	—	698	40	3.5	Hor2011b	S	0
2009.2601	305.5	0.7	0.0383	0.0002	0.4	—	551	22	4.1	Tok2010	S	15
2009.4462	320.8	—	0.0318	—	0.46	—	562	40	3.5	Hor2011b	S	15
2009.4462	—	—	—	—	0.31	—	692	40	3.5	Hor2011b	S	0
2009.4462	322.6	3.2	0.044	0.003	0.45	0.12	562	40	3.5	Hor2012a	S	15
2009.4462	322.2	3.2	0.044	0.003	0.31	0.12	692	40	3.5	Hor2012a	S	15
2012.1843	8.0	0.0	0.1214	0.0002	0.6	—	543	22	4.1	Tok2012b	S	15
2013.4026	16.5	—	0.1258	—	0.36	—	692	40	3.5	Hor**	S	15
2013.4026	16.7	—	0.1264	—	0.35	—	880	50	3.5	Hor**	S	15
2014.3005	23.0	0.0	0.1204	0.0002	0.6	—	534	22	4.2	Tok2015c	St	15

* Сокращения и веса даны в соответствии с Четвертым каталогом интерферометрических измерений двойных звезд (Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars)[25]

<http://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/wds/int4>.

** Неопубликованные измерения.

Сходство значений параллакса HIPPARCOS (12.28 ± 0.77 миллисекунды дуги) и динамических параллаксов, полученных для каждой орбиты (короткий период: 13.12 ± 0.31 миллисекунды дуги и длинный период: 13.38 ± 0.46 миллисекунды дуги) демонстрирует надежность первого; этим обусловлено его использование в качестве опорного значения в этой работе.

Мы пришли к выводу, что истинной орбитой является короткопериодическая, так как долгопериодическая орбита дает неприемлемые отклонения позиционного угла для наблюдений 1990.2759 и 2007.0105. Даже если мы считаем нулевым вес этих наблюдений, среднеквадратическая ошибка

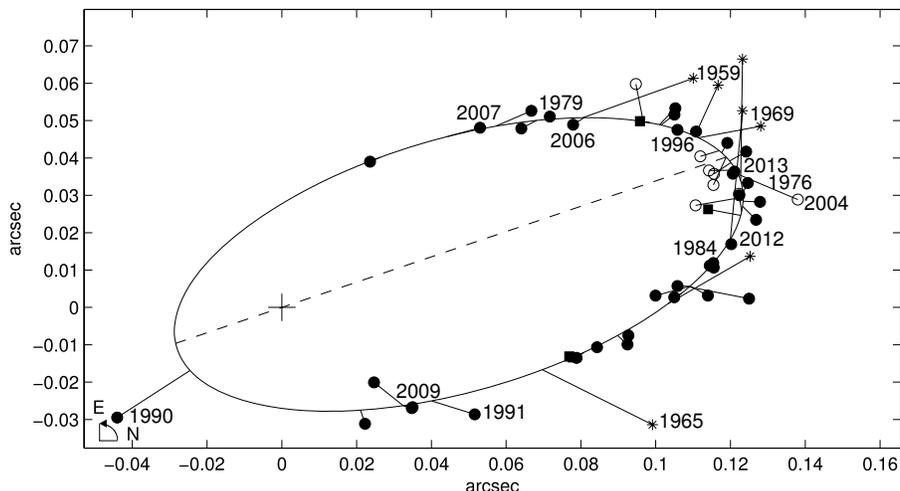


Рис. 1. Видимая короткопериодическая орбита ($P \sim 9$ лет). Звездочками отмечены измерения, выполненные Финсеном; незакрашенные кружки, точки и прямоугольники — измерения, выполненные соответственно на 1–2-м, 3–4-м и 6-м телескопах. Даны даты некоторых наблюдений (с округлением до ближайшего целого числа).

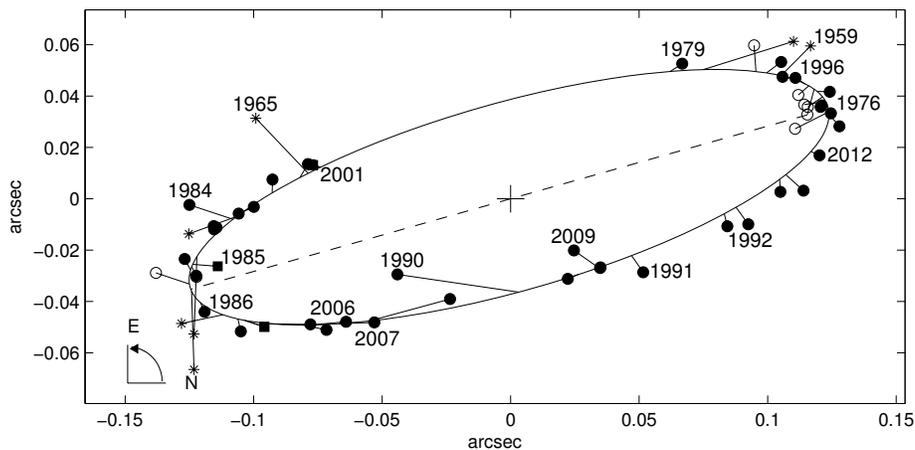


Рис. 2. Видимая долгопериодическая орбита ($P \sim 18$ лет). Обозначения те же, что и на рис. 1.

позиционного угла больше у долгопериодического решения (см. таблицу 6).

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

Для оценки физических и геометрических параметров отдельных компонентов мы применяем комплексный метод Аль-Вардата для анализа тесных визуально-двойных систем [8]. В методе используется измеренная разность звездных величин компонентов Δm , их совокупная видимая звездная величина m_V и параллакс системы для расчета предварительных входных параметров для последующего моделирования атмосфер отдельных компонентов. Модели атмосфер используются далее для расчета распределений энергии в спектре (Spectral Energy Distribution, SED), которые

затем суммируются (в соответствии с определенными критериями) для построения полного синтетического спектрального распределения энергии системы. Наблюдаемое SED берется в качестве опорного для синтетического SED; для достижения наилучшего соответствия между ними производятся итерации вышеупомянутых шагов с различными входными параметрами.

Разница величин двух компонентов $\Delta m = m_B - m_A = 0^m.59$ принята как среднее значение всех измерений в фильтрах 550/40, 551/22, 562/40, 543/22 и 534/22 (даны в таблице 2), которые являются ближайшими к фильтру в V -полосе. Эта разница величин вместе с фотометрией системы $m_V = 6^m.358$ (таблица 1) была использована в качестве входных данных в следующих уравнениях:

$$m_A = m_V + 2.5 \lg(1 + 10^{-0.4\Delta m}), \quad (1)$$

Таблица 3. Расчетные элементы орбиты и массы системы со стандартными ошибками

Параметры	Короткий период	Длинный период
Период P , лет	9.130 ± 0.030	18.442 ± 0.200
Эпоха периастра T_0	2017.487 ± 0.050	2009.328 ± 0.900
Эксцентриситет e	0.622 ± 0.007	0.021 ± 0.007
Большая полуось a , секунды дуги	0.0795 ± 0.002	0.129 ± 0.002
Наклон i , град.	57.0 ± 0.5	73.5 ± 0.5
Позиционный угол узлов Ω , град.	18.8 ± 1.5	15.8 ± 1.0
Аргумент периастра ω , град.	170.8 ± 3.5	279.3 ± 18.0
Сумма масс* $\Sigma M_{A,B}, M_{\odot}$	3.255 ± 0.332	3.408 ± 0.311
Сумма масс** $\Sigma M_{A,B}, M_{\odot}$	3.173 ± 0.152	3.146 ± 0.149
Сумма масс*** $\Sigma M_{A,B}, M_{\odot}$	2.665 ± 0.125	2.637 ± 0.122

* С использованием параллакса HIPPARCOS: 12.28 миллисекунды дуги.

** С использованием динамических параллаксов: 12.39 ± 0.31 миллисекунды дуги (короткий период) и 12.61 ± 0.36 миллисекунды дуги (длинный период) и калибровки для звезд Главной последовательности.

*** С использованием динамических параллаксов: 13.13 ± 0.43 миллисекунды дуги (короткий период) и 13.38 ± 0.46 миллисекунды дуги (длинный период) и калибровки для субгигантов, данных в [26].

Таблица 4. Среднеквадратическая ошибка и ошибка среднего для старых и новых значений орбит

RMS		Ошибка среднего		Источник
$\Delta\theta$	$\Delta\rho$	$\Delta\theta$	$\Delta\rho$	
2.208	0.008	0.003	0.001	Данная работа, $P=9$ лет
9.289	0.009	-0.938	0.000	Данная работа, $P=18$ лет
12.136	0.011	-0.085	0.004	Бейз [20]
6.191	0.009	-2.062	-0.001	Харткопф и др. [21]
2.673	0.008	-0.031	-0.001	Хорч и др. [22]

$$m_B = m_A + \Delta m, \quad (2)$$

для расчета видимых звездных величин отдельных компонентов: $m_A = 6^m 87$ и $m_B = 7^m 42$.

Эти отдельные значения видимых звездных величин наряду с соответствующими зависимостями для Главной последовательности и стандартными значениями [14, 27]

$$M_V = m_V + 5 - 5 \lg d - A_V, \quad (3)$$

$$\lg(R/R_{\odot}) = 0.5 \lg(L/L_{\odot}) - 2 \lg(T/T_{\odot}), \quad (4)$$

Таблица 5. Эфемериды для вычисленных орбит с 2016 по 2020 гг.

Эпоха	Короткий период		Длинный период	
	θ	ρ	θ	ρ
2016.0	42.6	0.070	35.4	0.087
2017.0	110.6	0.024	54.1	0.057
2018.0	259.6	0.027	102.3	0.037
2019.0	338.9	0.059	154.2	0.054
2020.0	357.1	0.095	174.8	0.084

$$\lg g = \lg(M/M_{\odot}) - 2 \lg(R/R_{\odot}) + 4.43 \quad (5)$$

были использованы в расчетах входных параметров (эффективной температуры и ускорения поверхностной силы тяжести), необходимых для построения моделей атмосфер отдельных компонентов. Мы использовали болометрические поправки из [14] и $T_{\odot} = 5777$ К, а также экстинкцию A_V из таблицы 1 от NASA/IPAC.

Далее расчетные величины были взяты в качестве входных параметров для построения модели атмосферы каждого компонента с использованием

Таблица 6. Ошибки орбит

Дата	Длинный период		Короткий период		Дата	Длинный период		Короткий период	
	$\Delta\theta$, deg	$\Delta\rho$, arcsec	$\Delta\theta$, deg	$\Delta\rho$, arcsec		$\Delta\theta$, deg	$\Delta\rho$, arcsec	$\Delta\theta$, deg	$\Delta\rho$, arcsec
1959.47	2.5	0.015	4.4	0.011	1987.3800	2.9	-0.006	0.7	-0.003
1960.55	-4.8	0.036	-3.2	0.030	1988.1655	4.2	-0.007	0.3	-0.000
1964.530	-10.4	0.025	-4.2	0.032	1988.2524	4.6	-0.012	0.4	-0.005
1965.545	2.5	0.019	5.6	0.022	1990.2759	-61.2	0.017	-0.8	0.023
1966.520	11.1	-0.124	12.8	-0.122	1991.3186	-3.8	0.007	2.8	0.011
1966.527	12.7	0.010	14.4	0.012	1992.3098	-3.2	0.002	-0.5	-0.001
1967.5447	12.2	0.011	12.8	0.012	1992.4572	-4.0	0.005	-1.4	0.002
1968.545	-1.2	0.016	-1.5	0.016	1993.0905	-2.7	0.000	-0.6	-0.003
1976.2959	-2.4	0.003	-0.6	0.004	1993.1973	-3.4	0.007	-1.5	0.004
1976.3697	-1.5	-0.014	0.3	-0.014	1995.1495	0.6	-0.008	0.9	-0.008
1976.4570	-0.8	0.000	0.8	0.001	1995.3109	-0.9	-0.007	-0.8	-0.006
1977.0877	-0.8	0.005	0.3	0.004	1996.1840	0.8	-0.003	0.1	-0.001
1977.1751	-4.0	-0.006	-2.9	-0.006	2001.2708	-0.3	0.003	-0.4	-0.002
1977.3280	-0.9	-0.005	0.0	-0.006	2001.2708	-0.4	0.004	-0.5	-0.001
1978.1499	0.6	0.007	0.9	0.005	2001.2708	-0.3	0.003	-0.4	-0.002
1978.3109	4.8	0.004	4.9	0.003	2002.3224	-1.0	-0.004	-1.2	-0.010
1979.3622	-0.4	0.006	-2.1	0.009	2002.3224	0.3	0.002	0.1	-0.004
1983.0701	-3.9	-0.002	-1.4	-0.002	2004.1960	-3.1	0.012	-4.6	0.013
1983.4332	-3.2	0.000	-1.3	-0.001	2006.1915	4.7	-0.014	-0.1	-0.004
1984.0532	-3.2	0.017	-1.9	0.015	2007.0105	6.2	-0.011	-3.8	0.007
1984.3752	-1.0	0.000	-0.1	-0.001	2007.3286	18.0	-0.027	2.0	-0.003
1984.3807	-1.4	0.001	-0.4	0.000	2009.2601	-6.4	-0.001	-2.0	0.003
1984.3835	-0.8	0.001	0.2	0.000	2009.4462	-1.1	-0.012	-0.3	-0.010
1985.1805	1.3	-0.009	1.5	-0.009	2009.4462	0.7	0.001	1.5	0.002
1985.2438	1.9	-0.001	2.1	0.000	2009.4462	0.3	0.001	1.1	0.002
1985.3389	-2.1	0.001	-2.0	0.002	2012.1843	-0.9	0.003	-0.8	-0.001
1985.4840	0.4	-0.002	0.3	-0.002	2013.4026	0.4	-0.003	-0.4	-0.002
1986.4067	1.8	0.000	0.8	0.001	2013.4026	0.6	-0.002	-0.2	-0.001
1987.2642	2.4	0.001	0.4	0.004	2014.3005	1.7	-0.003	-0.0	0.001
1987.3800	2.9	-0.006	0.7	-0.003					

сеток моделей Куруца с учетом эффектов бланкирования (ATLAS9) [28]. Мы использовали модели атмосферы с солнечным содержанием элементов, учитывающие эффекты бланкирования, для построения спектрального распределения энергии для каждого компонента.

Общий поток энергии от двойной звезды рассчитывается в зависимости индивидуальных светимостей компонентов А и В, расположенных на расстоянии d от Земли. Это иллюстрирует следующее

уравнение [5]:

$$F_{\lambda}d^2 = H_{\lambda}^A R_A^2 + H_{\lambda}^B R_B^2 \quad (6)$$

где H_{λ}^A и H_{λ}^B — потоки энергии от единичной поверхности соответствующего компонента, а F_{λ} представляет собой общее SED системы.

Теперь цель состоит в том, чтобы достичь наилучшего соответствия вычисленного SED с наблюдаемым. Для того чтобы добиться этого соответствия, десятки различных наборов параметров бы-

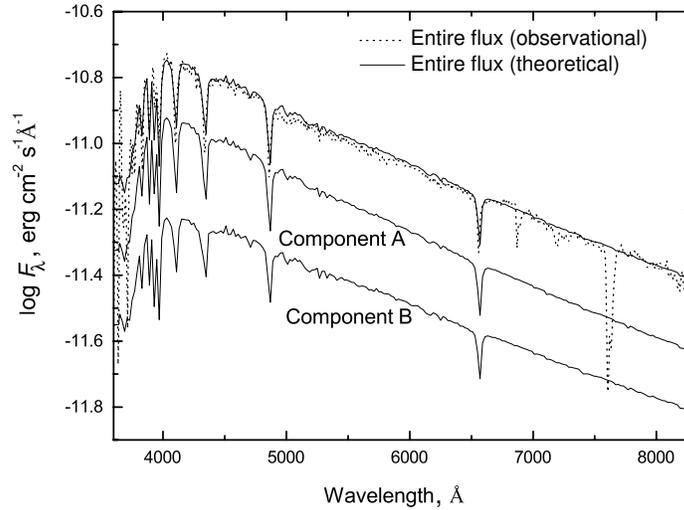


Рис. 3. Сравнение полного наблюдательного, взятого из работы [29], и суммарного синтетического спектрального распределения энергии системы, построенного в этой работе. На рисунке также показаны SED отдельных компонентов, построенные с использованием параметров, приведенных в конце раздела 3.

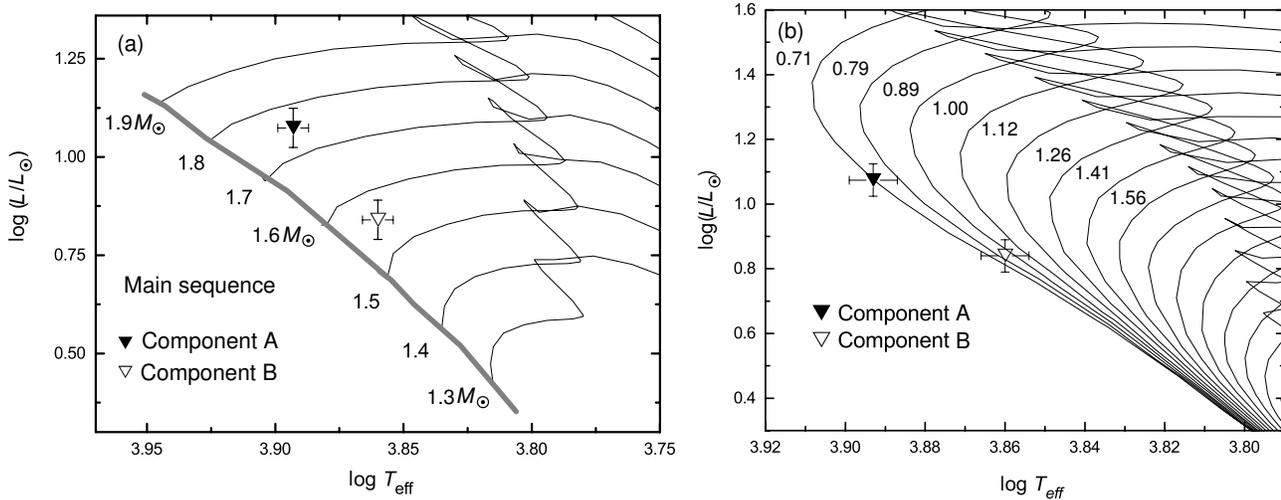


Рис. 4. Компоненты двойной системы на эволюционных треках для звезд малых и промежуточных масс (a) и на изохронах звезд малых и промежуточных масс и звезд с солнечным содержанием элементов $[Z = 0.019, Y = 0.273]$ из [31], возрасты даны в млрд лет (b).

ли протестированы различными способами; первый способ — прямое соответствие — показан на рис. 3, где сравниваются максимальные значения абсолютного потока, форма континуума, а также профили линий поглощения. Второй способ заключается в сравнении синтетических и наблюдаемых величин и показателей цвета (см. таблицу 7).

Здесь стоит отметить, что два входных параметра одинаковым образом влияют на максимальные значения абсолютного потока. Согласно уравнению (6), это радиус компонентов и параллакс системы. Поэтому радиусы обоих компонентов были изменены в соответствии с параллаксами из различных источников. В таблице 8 приведены эти

радиусы со следующими параметрами атмосферы:

$$T_{\text{eff}}^A = 7820 \pm 75 \text{ K}, \quad T_{\text{eff}}^B = 7250 \pm 75 \text{ K},$$

$$\lg g_A = 4.10 \pm 0.40, \quad \lg g_B = 4.25 \pm 0.40.$$

Теперь необходимо ответить на вопрос о том, какой параллакс лучше представляет реальную систему. Как представлено в таблице 8, параллакс, рассчитанный по старым данным миссии HIPPARCOS, дает самые высокие радиусы и светимости. Это означает (при условии верности значения параллакса), что оба компонента находятся в начале фазы субгигантов. Сравнивая массы, вычисленные с помощью орбитального ана-

Таблица 7. Сравнение наблюдательных и синтетических звездных величин всей системы

Величина	Набл.	Синтетич. (данная работа)
V_J	6.36	6.36
V_T	6.66	6.68
V_T	6.38	6.40
$(B - V)_J$	0.26	0.252
Δm	0.543	0.548
$b - y$	0.164*	0.16

* Данцигер и Фабер [30].

лиза ($\Sigma M_{A,B}(M_\odot) = 3.173 \pm 0.152$ для пары звезд Главной последовательности с коротким периодом и $\Sigma M_{A,B}(M_\odot) = 2.66 \pm 0.125$ для пары субгигантов, таблица 3), с положениями обоих компонентов на эволюционных треках (рис. 4) находим, что короткопериодическая орбита с соответствующим динамическим параллаксом является наилучшим решением для этой системы.

Следовательно, наилучшее соответствие между полным наблюдаемым и синтетическим спектральным распределением, как видно на рис. 3, было достигнуто с помощью параметров, перечисленных в таблице 9, с динамическим параллаксом $\pi = 12.39 \pm 0.31$ миллисекунды дуги.

3.1. Синтетическая фотометрия

В дополнение к тому, что видимые звездные величины и показатели цвета отдельных компонентов и всей системы являются одними из главнейших описательных параметров, они также играют важную роль в определении наилучшего соответствия между синтетическими и наблюдательными SED, как уже упоминалось выше.

Для того чтобы вычислить синтетические звездные величины, мы использовали следующее соотношение [33, 34]:

$$m_p[F_{\lambda,s}(\lambda)] = -2.5 \lg \frac{\int P_p(\lambda) F_{\lambda,s}(\lambda) \lambda d\lambda}{\int P_p(\lambda) F_{\lambda,r}(\lambda) \lambda d\lambda} + ZP_p, \quad (7)$$

где m_p является синтетической звездной величиной в фильтре p , $P_p(\lambda)$ — безразмерная функция чувствительности фильтра p , $F_{\lambda,r}(\lambda)$ — это синтетическое SED объекта и опорной звезды (Vega). Мы взяли нуль-пункты (ZP_p) из работы [34] и ссылок в ней.

Звездные величины и показатели цвета в различных фотометрических системах, суммарные и для отдельных компонентов, приведены в таблице 10.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблицах 3, 9 и 10 показаны расчетные физические и геометрические параметры системы, которые достаточно точно представляют ее. Рисунок 3 показывает хорошее соответствие между синтетическими и наблюдательными SED.

Анализ орбиты системы дает два результата: короткую орбиту с периодом в 9.130 лет с суммой масс $3.255 M_\odot$ и долгопериодическую — с периодом 18.442 лет и суммой масс $3.408 M_\odot$ (при использовании параллакса HIPPARCOS 12.28 миллисекунды дуги). Для сравнения, в работе [35] было получено, что $\Sigma M = 2.869 M_\odot \pm 0.684$, $M_A = 1.616 M_\odot \pm 0.422$ и $M_B = 1.253 M_\odot \pm 0.345$ с использованием $\Delta m = 0.010 \pm 0.15$ и $\pi = 12.92 \pm 0.95$ миллисекунды дуги.

Полученные с помощью атмосферного анализа суммарные массы $\Sigma M = 3.30 M_\odot$, $M_A = 1.75 M_\odot$ и $M_B = 1.55 M_\odot$ (таблица 9) подтверждают короткопериодическую орбиту с $3.255 M_\odot$.

Сравнение наблюдательных и синтетических величин всей системы (таблица 7) служит свидетельством надежности комплексного метода Аль-Вардата для анализа тесных визуальных двойных систем.

На рисунке 4 показаны положения двух компонентов на эволюционных треках и изохронах для звезд малых и промежуточных масс из [31]. Усы погрешности на рисунке определяются ошибками оценки параллакса и радиуса объектов.

Учитывая расчетные параметры компонентов, а также положение звезд на эволюционных треках возрастом около 0.79 млрд лет (рис. 4), фрагментация является наиболее вероятным процессом формирования такой системы. Боннелл [36] пришел к выводу о том, что фрагментация диска, вращающегося вокруг зарождающейся центральной протозвезды, возможна до тех пор пока продолжается падение вещества, а Циннекер и Матье [37] указали на то, что иерархическая фрагментация во время гравитационного сжатия при вращении может быть ответственна за рождение двойных и кратных систем.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для анализа спекл-интерферометрической тесной визуально-двойной системы FIN 350 (WDS 13175-0041, HIP 64838 и HD 115488) применялись комплексный метод Аль-Вардата и аналитический метод расчета орбиты Докобо. Физические и геометрические параметры компонентов системы оценивались в зависимости от полученных орбитальных элементов системы и наилучшего соответствия между полным наблюдаемым спектральным распределением энергии

Таблица 8. Радиус и светимость отдельных компонентов в соответствии с различными параллаксами

Источник параллакса	π , мсд	$R_a \pm 0.07$	$R_b \pm 0.07$	L_a/L_\odot	L_b/L_\odot
HIPPARCOS (новые) [17]	12.28	1.92	1.71	12.38	7.25
Динамический параллакс (короткий период, ГП)	12.39	1.88	1.67	11.87	6.92
Динамический параллакс (длинный период, ГП)	12.61	1.86	1.65	11.62	6.75
Динамический параллакс (короткий период, субгигант)	13.13	1.79	1.60	10.76	6.35
Динамический параллакс (длинный период, субгигант)	13.38	1.76	1.57	10.40	6.11
HIPPARCOS (старые)	13.45	1.75	1.56	10.28	6.04

Таблица 9. Параметры компонентов системы

Компонент	A	B
$T_{\text{эфф}}, \text{K}$	7820 ± 75	7250 ± 75
Радиус, R_\odot	1.88 ± 0.07	1.67 ± 0.07
$\lg g$	4.10 ± 0.40	4.25 ± 0.40
L, L_\odot	11.87 ± 1.20	6.92 ± 0.70
M_V	2.19 ± 0.26	2.78 ± 0.30
Масса, M_\odot^*	1.75 ± 0.18	1.55 ± 0.16
Сп. класс**	$A7V \pm F0V$	

* В зависимости от положения компонентов на эволюционных треках из [31].

** В зависимости от таблиц из [14, 32].

и синтетическим, построенным с использованием моделей атмосфер.

В качестве параллакса системы был принят динамический параллакс $\pi = 12.39 \pm 0.31$ миллисекунды дуги в промежутке между старыми и новыми измерениями HIPPARCOS, дающий наилучшее совпадение между комплексным анализом Аль-Вардата и аналитическим решением Докобо для этой системы.

Мы рассчитали новые элементы орбиты системы (коротко- и долгопериодические). Короткий период в 9.130 лет уточняет полученные ранее орбиты, в то время как долгопериодическое решение в 18.442 лет было получено впервые. Тем не менее, в данной работе показано, что короткий период орбиты лучше согласуется с наблюдениями.

Синтетические звездные величины и показатели цвета всей системы и отдельных ее компонентов были вычислены для различных фотометрических систем (см. таблицу 10). В дополнение к своей

Таблица 10. Звездные величины и показатели цвета синтетических спектров системы

Система	Фильтр	Полная	Комп. А	Комп. В
Johnson–Cousins	U	6.67	7.15	7.78
	B	6.61	7.07	7.76
	V	6.36	6.85	7.44
	R	6.22	6.74	7.27
	$U - B$	0.06	0.08	0.02
	$B - V$	0.25	0.22	0.32
	$V - R$	0.14	0.12	0.18
	Strömgren	u	7.95	8.45
v		6.82	7.28	8.00
b		6.49	6.97	7.62
y		6.34	6.83	7.42
$u - v$		1.12	1.18	1.02
$v - b$		0.33	0.31	0.37
$b - y$		0.16	0.13	0.20
Tycho		B_T	6.68	7.14
	V_T	6.39	6.89	7.49
	$B_T - V_T$	0.29	0.25	0.35

значимости в качестве параметров эти синтетические величины и цвета указывают на правильность метода.

Спектральные типы и классы светимостей компонентов системы были определены как A7V для компонента А и F0V для компонента В, что подтвердило положение обоих компонентов на стадии Главной последовательности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Эллиота Хорча за предоставление двух неопубликованных спекл-интерферометрических измерений, использованных для подтверждения вычисленной орбиты. Они также благодарят Сухаила Масда из Йенского астрофизического института и университетской обсерватории за помощь в некоторых расчетах, анонимного рецензента за ценные замечания и г-жу Асмаа Рамадан за помощь в редактировании. Кроме того, это исследование было поддержано в рамках проекта АYA2011-26429, финансируемого Министерством экономики и конкурентоспособности Испании. В этой работе авторы использовали Четвертый каталог интерферометрических измерений (Fourth Interferometric Catalogue), базы данных SIMBAD и программу CHORIZOS для фотометрического и спектрофотометрического анализа данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. I. Balega, Y. Y. Balega, K.-H. Hofmann, et al., *Astron. and Astrophys.* **385**, 87 (2002).
2. N. I. Shatskii and A. A. Tokovinin, *Astronomy Letters* **24**, 673 (1998).
3. J. A. Docobo, V. S. Tamazian, Y. Y. Balega, et al., *Astron. and Astrophys.* **366**, 868 (2001).
4. M. Salaris and S. Cassisi, *Evolution of Stars and Stellar Populations* (Wiley, Chichester, 2005).
5. M. A. Al-Wardat, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 51 (2002).
6. M. A. Al-Wardat, *Astronomische Nachrichten* **328**, 63 (2007).
7. M. A. Al-Wardat, *Astronomische Nachrichten* **330**, 385 (2009).
8. M. A. Al-Wardat, *Publ. Astron. Soc. Australia* **29**, 523 (2012).
9. M. A. Al-Wardat and H. Widyana, *Astrophysical Bulletin* **64**, 365 (2009).
10. M. A. Al-Wardat, H. S. Widyana, and A. Al-Thyabat, *Publ. Astron. Soc. Australia* **31**, e005 (2014).
11. M. A. Al-Wardat, Y. Y. Balega, V. V. Leushin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 58 (2014).
12. M. A. Al-Wardat, *Astrophysical Bulletin* **69**, 454 (2014).
13. H. M. Jeffers, W. H. van den Bos, and F. M. Greeby, *Index Catalogue of Visual Double Stars, 1961.0*, Vol. 21 (Lick Observatory, Mount Hamilton, 1963).
14. D. F. Gray, *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres*, 3rd ed. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2005).
15. M. A. C. Perryman, L. Lindegren, J. Kovalevsky, et al., *Astron. and Astrophys.* **323**, L49 (1997).
16. E. Høg, C. Fabricius, V. V. Makarov, et al., *Astron. and Astrophys.* **355**, L27 (2000).
17. F. van Leeuwen, *Astron. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
18. S. Malaroda, *Astron. J.* **80**, 637 (1975).
19. A. P. Cowley, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **88**, 95 (1976).
20. P. Baize, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **74**, 507 (1988).
21. W. I. Hartkopf, B. D. Mason, and H. A. McAlister, *Astron. J.* **111**, 370 (1996).
22. E. P. Horch, W. F. van Altena, S. B. Howell, et al., *Astron. J.* **141**, 180 (2011).
23. J. A. Docobo, *Celestial Mechanics* **36**, 143 (1985).
24. J. A. Docobo, in *Proc. Workshop on Orbital Couples: Pas de Deux in the Solar System and the Milky Way, Obs. Paris, 2011*, Ed. by F. Arenou and D. Hestroffer (2012), pp. 119–123.
25. W. I. Hartkopf, H. A. McAlister, and B. D. Mason, *Astron. J.* **122**, 3480 (2001).
26. J. Docobo and M. Andrade, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **428**, 321 (2013).
27. K. R. Lang, *Astrophysical Data I. Planets and Stars*. (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1992).
28. R. Kurucz, CD-ROM No. 19 (Smithsonian Astrophys. Obs., Cambridge, MA, 1994).
29. M. A. Al-Wardat, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 58 (2002).
30. I. J. Danziger and S. M. Faber, *Astron. and Astrophys.* **18**, 428 (1972).
31. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).
32. M. P. Fitzgerald, *Astron. and Astrophys.* **4**, 234 (1970).
33. J. M. Apellaniz, *Astron. J.* **131**, 1184 (2006).
34. J. Maíz-Apellániz, *ASP Conf. Ser.* **364**, 227 (2007).
35. C. Martin and F. Mignard, *Astron. and Astrophys.* **330**, 585 (1998).
36. I. A. Bonnell, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **269**, 837 (1994).
37. H. Zinnecker and R. Mathieu, *IAU Symp.*, **200** (2001).

Перевод Н. Обориной

Physical and Geometrical Parameters of CVBS. XII. FIN 350 (HIP 64838)**M. A. Al-Wardat, J. A. Docobo, A. A. Abushattal, and P. P. Campo**

A complete astrophysical and dynamical study of the close visual binary system (CVBS) Finsen 350 (A7V + F0V), is presented. Beginning with the entire observational spectral energy distribution (SED) and the magnitude difference between the subcomponents, Al-Wardat's complex method for analyzing CVBS was applied as a reverse method of building the individual and entire synthetic SEDs of the system. This was combined with Docobo's analytic method to calculate the new orbits. Although possible short (approximately 9 years) and long period (of about 18 years) orbits could be considered taking into account the similar results of the stellar masses obtained for each of them (3.07 and 3.41 M_{\odot} , respectively), we confirmed that the short solution is correct. In addition, other physical, geometrical and dynamical parameters of this system such as the effective temperatures, surface gravity accelerations, absolute magnitudes, radii, the dynamical parallax, etc., are reported. The main sequence phase of both components with age around 0.79 Gyr is approved.

Keywords: *stars: binaries: visual—stars: interferometric binaries—stars: photometry*