

УДК 524.382:520.872

СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ ДВОЙНАЯ HD 375 — ДВОЙНАЯ СИСТЕМА СУБГИГАНТОВ?

© 2014 М. А. Аль-Вардат^{1*}, Ю. Ю. Балега^{2,3**}, В. В. Леушин^{2,4},
Н. А. Юсуф⁵, А. А. Таани⁶, К. С. Аль-Вакфи⁵, С. Масда⁵

¹*Al-Hussein Bin Talal University, Ma'an, 71111 Jordan*

²*Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия*

³*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 197101, Россия*

⁴*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 334006 Россия*

⁵*Yarmouk University, Irbid, 21163 Jordan*

⁶*Aqaba University College, Al-Balqa' Applied University, Aqaba, 77110 Jordan*

Поступила в редакцию 1 сентября, 2013; принята в печать 21 сентября, 2013

С использованием моделирования атмосфер строятся теоретические распределения энергии в спектре индивидуальных компонентов спекл-интерферометрической двойной системы HD 375. Эти синтетические распределения комбинируются для системы в целом и сравниваются методом итераций с наблюдаемым распределением для получения наилучшего соответствия. Для построения распределений использовались бланкетированные модели Куруца и измерения разностей блеска. Физические параметры наилучшим образом подходящих синтетических распределений достаточно хорошо описывают свойства системы. Эти параметры следующие: $T_{\text{eff}}^a = 6100 \pm 50$ K, $T_{\text{eff}}^b = 5940 \pm 50$ K, $\log g_a = 4.01 \pm 0.10$, $\log g_b = 3.98 \pm 0.10$, $R_a = 1.93 \pm 0.20 R_{\odot}$, $R_b = 1.83 \pm 0.20 R_{\odot}$, $M_v^a = 3^{\text{m}}26 \pm 0.40$, $M_v^b = 3^{\text{m}}51 \pm 0.50$, $L_a = 4.63 \pm 0.80 L_{\odot}$ и $L_b = 3.74 \pm 0.70 L_{\odot}$, в соответствии с новой оценкой параллакса $\pi = 12.02 \pm 0.60$ mas. Построена модифицированная орбита системы и проведено сравнение с более ранними орбитами, вычисленные массы двух компонентов составляют $M_a = 1.35 M_{\odot}$ и $M_b = 1.25 M_{\odot}$. Исходя из оценки физических и геометрических параметров системы, которые подтверждаются синтетической фотометрией, мы предполагаем, что компоненты являются проэволюционировавшими субгигантами (F8.5 IV и G0 IV) с возрастом 3.5 млрд лет, сформированными фрагментацией.

Ключевые слова: двойные: визуальные—звёзды: фундаментальные параметры—звёзды: индивидуальные: HD 375

1. ВВЕДЕНИЕ

С помощью спутника Hipparcos было обнаружено, что многие ранее известные одиночные звезды на самом деле являются двойными или кратными системами [1]. Большинство этих разрешенных систем — близкие звезды, кажущиеся одиночными даже в самые большие наземные телескопы, за исключением случаев, когда они наблюдаются такими методами высокого разрешения, как спекл-интерферометрия [2, 3] и адаптивная оптика [4, 5]. Отсюда название этих двойных — спекл-интерферометрические двойные.

В целом, изучение двойных звезд является наиболее эффективным прямым методом для сопоставления теоретических моделей звезд с реальными наблюдаемыми параметрами, что сложнее сделать в случае спекл-интерферометрических двойных. Метод позволяет установить связь между определениями масс и другими важными параметрами, такими как радиус, светимость и эффективная температура, и предоставляет базовую проверку теории эволюции и структуры звезд [6]. Он также предоставляет уникальный способ тщательного изучения спектральных классов и классов светимости [7]. Сотни таких систем с периодами порядка 10 лет и меньше регулярно наблюдаются и анализируются вышеупомянутыми методами высокого разрешения. Но, несмотря на это, данные

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

**E-mail: balega@sao.ru

об индивидуальных физических параметрах компонентов систем до сих пор скудны. Единственный способ оценить эти параметры — это косвенный анализ двойных. В методе используются бланкетированные модели Куруца [8] для построения синтетического распределения энергии в спектре отдельно для каждого компонента, а затем для всей системы. Сравнивая путем итераций это полное синтетическое распределение с наблюдаемым для получения наилучшего соответствия между ними, можно определить физические и геометрические параметры индивидуальных компонентов.

Изначально в методе использовались более ранние версии бланкетированных плоскопараллельных теоретических моделей атмосфер для звезд классов F, G и K [9], где при построении распределений энергии в спектре учитывались только непрозрачности линий водорода [10]. Затем использовался ATLAS9 с новыми функциями распределения непрозрачности [11], и метод был успешно применен к некоторым двойным системам, таким как COU 1289, COU 1291, HIP 11352, HIP 11253, HIP 70973 и HIP 72479 [12–15].

Спекл-интерферометрическая двойная HD 375 была впервые проанализирована [10] с применением более ранней версии этого метода. В данной работе представлены уточненные физические и геометрические параметры системы, полученные с использованием модифицированной версии метода, а также уточненная орбита системы, основанная на последних спекл-интерферометрических наблюдениях. Эта информация расширит наши знания о параметрах звезд в целом и, следовательно, поможет в понимании механизмов формирования и эволюции двойных звездных систем.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕР

Таблица 1 содержит основные данные о системе из SIMBAD и NASA/IPAC, а также из каталогов Hipparcos и Tycho [1].

За разность блеска между двумя компонентами была принята величина $\Delta m = 0^m 27 \pm 0.01$, являющаяся средним по всем измерениям Δm в фильтрах 545 nm/30 (см. Таблицу 2), самых близких к оптическому диапазону. Это значение использовалось в следующих уравнениях:

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

$$m_V^b = m_V^a + \Delta m. \quad (2)$$

При суммарном визуальном блеске системы $m_V = 7^m 41$ (см. Таблицу 1) предварительные оценки индивидуальных звездных величин m_V компонентов составляют $m_V^a = 8^m 04$ и $m_V^b = 8^m 31$.

Таблица 1. Данные по HD 375 из SIMBAD и NASA/IPAC, а также из каталогов Hipparcos и Tycho

Параметр	Значение	Источник
α_{2000}	00 ^h 08 ^m 28 ^s .446	SIMBAD
δ_{2000}	+34°56′04″.37	SIMBAD
Сп. класс	F8	SIMBAD
$E(B - V)$	0.057	NASA/IPAC*
A_V	0 ^m 180	NASA/IPAC*
V_J	7 ^m 41	Hipparcos
$(B - V)_J$	0 ^m 606 ± 0.015	Hipparcos
B_T	8 ^m 113 ± 0.009	Tycho
V_T	7 ^m 470 ± 0.007	Tycho
$(B - V)_T$	0 ^m 584 ± 0.009	Tycho
π	12.72 ± 0.86 mas	Hipparcos, old
π	11.69 ± 0.67 mas	Hipparcos, new**
π	4.10 ± 5.20 mas	Tycho

Notes: * <http://irsa.ipac.caltech.edu>
** van Leeuwen [16].

В предположении, что оба компонента — звезды главной последовательности, предварительные индивидуальные абсолютные величины были вычислены по формуле:

$$M_V = m_V + 5 - 5 \log d - A_V. \quad (3)$$

Эти величины использовались для вычисления предварительных входных параметров ($T_{\text{eff}}^a = 6750$ К, $T_{\text{eff}}^b = 6500$ К, $\log g_a = 4.19$ и $\log g_b = 4.21$) для построения моделей атмосфер каждого компонента с помощью сеток бланкетированных моделей Куруца 1994-го года (ATLAS9) [8]. При необходимости использовались уравнения:

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

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

Межзвездное покраснение взято из Таблицы 1, температура Солнца принималась $T_{\odot} = 5777$ К, а болометрические поправки взяты из [24] и [25]. Таким образом построено спектральное распределение энергии для каждого компонента.

Полный поток энергии от двойной звезды создается суммарным блеском компонентов a и b , находящихся на расстоянии d от Земли. Можно записать [13]:

$$F_{\lambda} d^2 = H_{\lambda}^a R_a^2 + H_{\lambda}^b R_b^2, \quad (6)$$

Таблица 2. Разность блеска компонентов системы и соответствующие фильтры использовавшиеся в наблюдениях

Δm	Фильтр ($\lambda/\Delta\lambda$)	Ссылка	Δm	Фильтр ($\lambda/\Delta\lambda$)	Ссылка	Δm	Фильтр ($\lambda/\Delta\lambda$)	Ссылка
$0^m04 \pm 0.39$	$V_{Hp} : 550 \text{ nm}/40$	[1]	0^m01	$745 \text{ nm}/44$	[6]	0^m00	$745 \text{ nm}/44$	[6]
$0^m28 \pm 0.05$	$545 \text{ nm}/30$	[17]	0^m41	$550 \text{ nm}/40$	[6]	0^m04	$550 \text{ nm}/40$	[20]
$0^m31 \pm 0.05$	$545 \text{ nm}/30$	[2]	0^m15	$541 \text{ nm}/88$	[6]	0^m88	$550 \text{ nm}/39$	[20]
$0^m03 \pm 0.15$	$648 \text{ nm}/41$	[18]	0^m55	$698 \text{ nm}/39$	[6]	0^m71	$698 \text{ nm}/39$	[20]
$0^m22 \pm 0.24$	$2115 \text{ nm}/214$	[2]	0^m47	$650 \text{ nm}/38$	[6]	0^m00	$745 \text{ nm}/44$	[21]
$0^m02 \pm 0.15$	$503 \text{ nm}/40$	[18]	0^m41	$650 \text{ nm}/38$	[6]	0^m48	$550 \text{ nm}/40$	[21]
$0^m00 \pm 0.15$	$701 \text{ nm}/12$	[18]	0^m49	$698 \text{ nm}/39$	[6]	0^m43	$692 \text{ nm}/40$	[23]
$0^m20 \pm 0.15$	$648 \text{ nm}/41$	[18]	0^m54	$745 \text{ nm}/44$	[6]	0^m52	$562 \text{ nm}/40$	[23]
$0^m20 \pm 0.15$	$600 \text{ nm}/30$	[22]	0^m29	$550 \text{ nm}/40$	[6]	0^m38	$692 \text{ nm}/40$	[23]
0^m81	$698 \text{ nm}/39$	[6]	$0^m20 \pm 0.04$	$600 \text{ nm}/30$	[19]	0^m48	$447 \text{ nm}/60$	[23]
$0^m23 \pm 0.06$	$545 \text{ nm}/30$	[22]	0^m01	$550 \text{ nm}/40$	[6]			
$0^m22 \pm 0.03$	$600 \text{ nm}/30$	[22]	0^m07	$745 \text{ nm}/44$	[6]			

откуда

$$F_\lambda = (R_a/d)^2 (H_\lambda^a + H_\lambda^b (R_b/R_a)^2), \quad (7)$$

где H_λ^a и H_λ^b — потоки от единицы поверхности соответствующих компонентов, а F_λ представляет полное распределение энергии в спектре системы.

Полученное в результате полное синтетическое распределение, построенное с использованием предварительных входных параметров, не совпадает с наблюдаемым. Оно демонстрирует более низкий показатель цвета ($B - V$), что означает, что температуры звезд должны быть ниже.

Для достижения наилучшего соответствия между синтетическим распределением энергии в спектре и наблюдаемым было сделано большое количество итераций. Предварительно вычисленные параметры использовались как начальные значения. Наилучшее соответствие оценивалось по следующим параметрам.

- (1) Максимальное соответствие между значениями абсолютного потока, представленными видимой звездной величиной, и вычисленными с помощью синтетической фотометрии).
- (2) Наклон спектра (представленный показателями цвета ($U - B$), ($B - V$) и ($v - b$)).
- (3) Разность блеска компонентов (Δm).
- (4) Профили линий поглощения.

Тогда как последние три критерия зависят в основном от T_{eff} и $\log g$ и выполняются при следу-

ющих значениях:

$$T_{\text{eff}}^a = 6100 \pm 50 \text{ K}, \quad T_{\text{eff}}^b = 5940 \pm 50 \text{ K},$$

$$\log g_a = 4.00 \pm 0.10, \quad \log g_b = 3.99 \pm 0.10,$$

первый критерий зависит от параллакса системы и радиусов компонентов (см. уравнение (7)). Оцененные по параллаксу Hipparcos и радиусам [25] синтетические суммарные визуальные величины (в предположении, что оба компонента — звезды главной последовательности) выше (т.е., абсолютный поток ниже) наблюдаемых. Это означает, что либо параллакс системы неверен и система находится ближе к Земле, либо компоненты системы более не являются звездами главной последовательности, а проэволюционировали и имеют большие радиусы.

Сомнения в параллаксах, измеренных Hipparcos, были представлены в [27]. Авторы отметили, что в некоторых случаях измерения параллаксов Hipparcos искажены орбитальным движением компонентов двойной системы. Следовательно, пользоваться этими измерениями нужно с осторожностью.

Поэтому чтобы добиться точного соответствия с наблюдаемым абсолютным потоком (Рис. 1), выбираем параллакс следующими двумя способами:

- (1) Фиксируем параллакс $\pi = 11.69 \pm 0.67 \text{ mas}$ [16], соответствующий модифицированным данными Hipparcos, и варьируем радиусы, пока не будет

Таблица 3. Позиционные измерения системы из Четвертого интерферометрического каталога и из [32]

Эпоха	θ , deg	ρ , arcsec	Ссылка	Эпоха	θ , deg	ρ , arcsec	Ссылка	Эпоха	θ , deg	ρ , arcsec	Ссылка
1991.25	358.0	0.101	[1]	2002.7879	32.4	0.113	[6]	2004.8237	347.9	0.064	[19]
1997.6191	263.7	0.121	[28]	2002.7879	32.6*	0.114	[6]	2004.9695	340.6	0.060	[6]
1998.7717	72.9	0.133	[2]	2002.796	34.4*	0.111	[32]	2004.9695	342.2*	0.061	[6]
1999.0145	71.0*	0.134	[29]	2003.5304	22.2*	0.099	[6]	2004.9723	345.2*	0.062	[6]
1999.7469	63.6	0.134	[2]	2003.5304	21.5*	0.099	[6]	2004.9723	343.1	0.060	[6]
1999.8202	64.5*	0.141	[30]	2003.5305	23.1*	0.099	[6]	2006.5257	227.6*	0.0457	[20]
1999.8854	62.6	0.138	[29]	2003.5305	21.2*	0.100	[6]	2007.0106	185.4	0.0547	[20]
1999.8854	62.2	0.140	[29]	2003.6371	22.6*	0.100	[6]	2007.8172	139.8	0.062	[21]
2000.7591	54.1	0.137	[29]	2003.6371	19.8	0.098	[6]	2007.8201	136.0	0.066	[21]
2000.8727	54.1	0.134	[22]	2003.6371	17.5	0.098	[6]	2008.6910	111.0	0.084	[23]
2001.4999	47.1*	0.129	[6]	2003.6371	19.5*	0.095	[6]	2008.6937	110.7	0.085	[23]
2001.7526	45.6	0.128	[22]	2003.928	14.8*	0.088	[32]	2010.8919	78.9	0.12	[31]
2001.7526	45.5	0.127	[22]	2003.928	14.4*	0.088	[32]				

* Эти точки были изменены на 180° для согласованности с соседними точками.

достигнут наилучший абсолютный поток. Заметим, что при изменении радиусов разрешены лишь небольшие вариации значения Δm .

(2) Фиксируем радиусы в соответствии с таблицами из [25] или стандартным соотношением $R-L-T$ (4) для звезд главной последовательности с $T_{\text{eff}}^a = (6100 \pm 50)$ К, $T_{\text{eff}}^b = (5940 \pm 50)$ К и варьируем параллакс до достижения наилучшего абсолютного потока.

Первый способ приводит к радиусам:

$$R_a = 2.00 \pm 0.15 R_\odot, \quad R_b = 1.89 \pm 0.15 R_\odot,$$

что позволяет отнести звезды к субгигантам.

Второй подход приводит к следующим радиусам и параллаксу:

$$R_a = 1.18 \pm 0.15 R_\odot, \quad R_b = 1.12 \pm 0.15 R_\odot,$$

$$\pi = 19.818 \text{ mas} \quad (d = 50.46 \pm 0.02 \text{ пк});$$

что не соответствует тригонометрическому параллаксу Hipparcos.

Параллакс, оцененный вторым способом, не соответствует орбитальным элементам и сумме масс, вычисленным ниже, тогда как параллакс по данным Hipparcos в некоторой степени приемлем. Таким

образом, параметры, полученные первым способом, представляют систему лучше (но не наилучшим образом) тех, что получены вторым способом (см. Раздел 4).

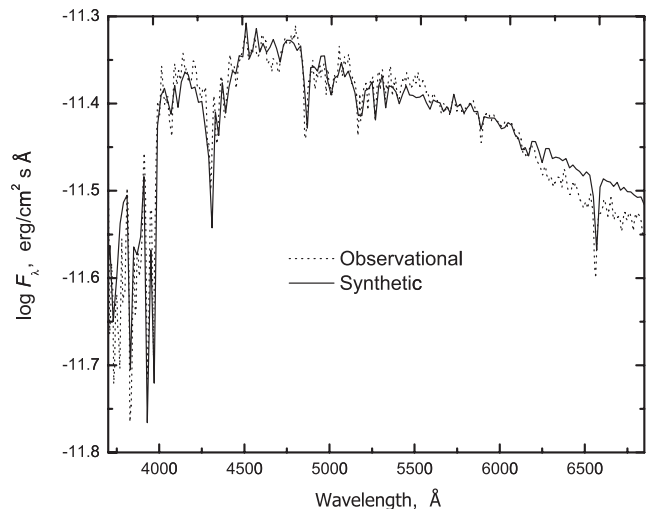


Рис. 1. Лучшее достигнутое соответствие между полным наблюдаемым распределением энергии в непрерывном спектре системы [26] и суммарным синтетическим распределением для двух компонентов, построенным по бланкетированным моделям Куруца [8].

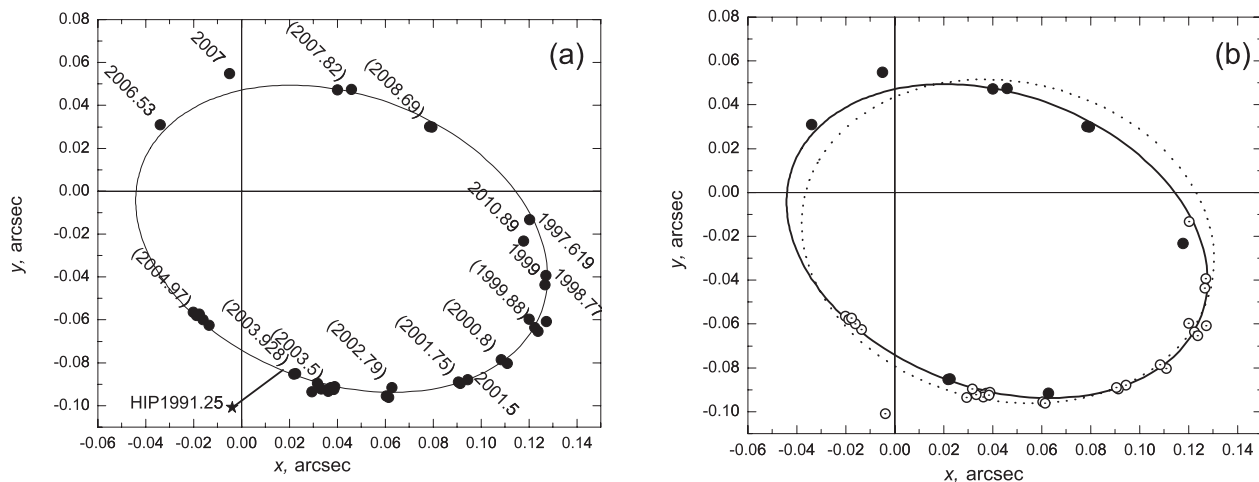


Рис. 2. Относительная визуальная орбита системы HD 375; нулевая точка представляет собой положение главного компонента. Заполненные кружки — новые точки, использованные для модификации орбиты (см. Таблицу 3); точка Hipparcos показана звездочкой. (а) Показаны эпохи позиционных измерений; скобками выделены года, где количество точек больше одной. (б) Сравнение модифицированной орбиты, полученной в настоящей работе (сплошная линия), и орбиты из работы [6] (пунктир).

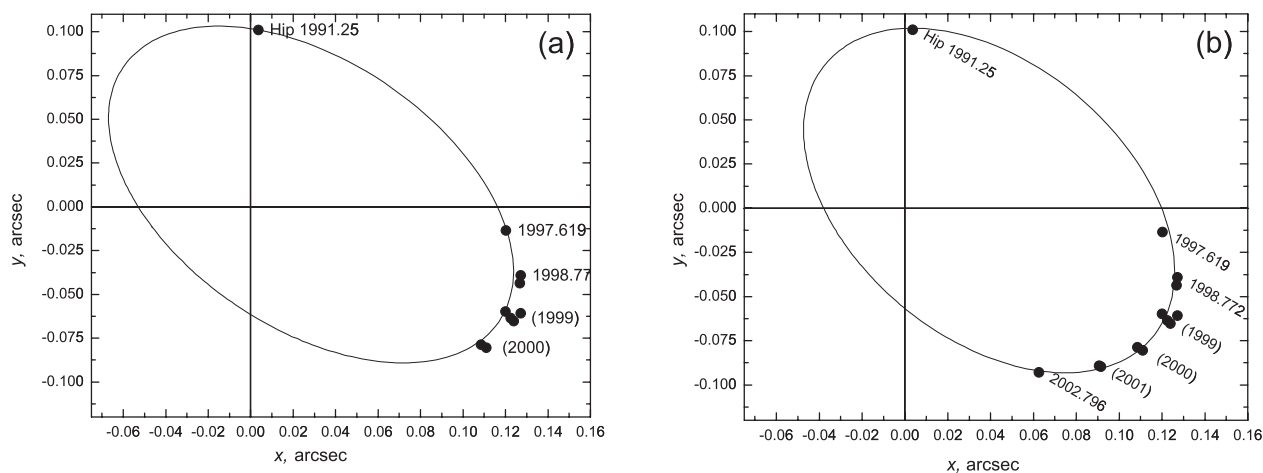


Рис. 3. (а) Предварительная орбита системы из работы [2]. (б) Орбита из [10].

3. ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТЫ

Для построения орбиты системы использовались позиционные измерения, приведенные в Таблице 3, взятые из Четвертого интерферометрического каталога и из [32]. Используются семь новых точек для уточнения орбиты из работы [6]. На Рис. 2а показана орбита системы, которая представляет собой положения второй звезды относительно главной и восходящее движение второй звезды согласно позиционным измерениям. Рис. 2б показывает сравнение новой орбиты (сплошная линия) с орбитой из [6] (пунктир). Предварительные орбиты [2] и [10] показаны на Рис. 3. Уточненные элементы орбиты системы, а также предыдущие, перечислены в Таблице 4. Видно хорошее соответствие между нашими оценками периода,

эпохи периастра, большой полуоси и эксцентриситета и оценками этих параметров из работы [6], в то же время есть некоторые отличия в наклоне, долготе восходящего узла и долготе периастра.

4. МАССЫ

Используя полученные элементы орбиты, мы вычислили полную массу системы (в солнечных массах) и соответствующую ошибку по следующим формулам:

$$(M_a + M_b)/M_\odot = a^3/\pi^3 p^2, \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_M}{M} = \sqrt{\left(3\frac{\sigma_\pi}{\pi}\right)^2 + \left(3\frac{\sigma_a}{a}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_p}{p}\right)^2}. \quad (9)$$

Таблица 4. Элементы орбиты системы ([2], [10], [6] и в данной работе)

Параметр	[2]	[10]	[6]	(Данная работа)
P , yr	19.3	16.74 ± 0.24	12.9	12.79 ± 0.11
T_0 , yr	2005.6	1988.265 ± 0.177	2006.12	2006.36 ± 0.02
e	0.38	0.52 ± 0.02	0.6	0.5237 ± 0.0051
a , arcsec	0.124	0.127 ± 0.003	0.091	0.0904 ± 0.0005
i , deg	125	124 ± 2.0	159	149.03 ± 1.13
Ω , deg	42	32 ± 3.0	315	62.99 ± 3.03
ω , deg	107	105 ± 1.0	72	183.42 ± 3.22
$(M_a + M_b)/M_\odot$	2.3*	3.55*	2.835**	$2.83 \pm 0.49^{**}$ $2.19 \pm 0.45^{***}$ $2.60 \pm 0.16^{****}$

Notes: * Исходя из оценок индивидуальных абсолютных величин, в предположении, что оба компонента — звезды главной последовательности.
 ** По новому тригонометрическому параллаксу Hipparcos π (mas) = 11.69 ± 0.67 .
 *** По старому тригонометрическому параллаксу Hipparcos π (mas) = 12.72 ± 0.86 .
 **** По параллаксу оцененному в данной работе π (mas) = 12.02 ± 0.60 .

Предварительный результат, полученный с использованием нового тригонометрического параллакса Hipparcos $\pi = 11.69 \pm 0.67$ mas, равен $(M_a + M_b)/M_\odot = 2.80 \pm 0.49$, тогда как для старого тригонометрического параллакса Hipparcos $\pi = 12.72 \pm 0.86$ mas было получено 2.19 ± 0.45 (Таблица 1).

Сумма масс, вычисленная с новым параллаксом Hipparcos, получается больше той, что можно ожидать для двух звезд с предварительно рассчитанными физическими параметрами, что хорошо видно из положений двух компонентов на эволюционных треках. Для достижения наилучшего соответствия между орбитальными и рассчитанными физическими параметрами, особенно для суммы масс, сильно зависящей от значения параллакса, был проведен еще один цикл итеративных вычислений.

Наилучшее совпадение (Рис. 4) между синтетическим распределением энергии в спектре и наблюдаемым, а также наилучшее соответствие между физическими и геометрическими элементами обоих компонентов, динамическим параллаксом и динамической суммой масс, достигаются при модифицированном динамическом параллаксе ($\pi = 12.02 \pm 0.60$ mas), который дает сумму масс $2.60 \pm 0.16 M_\odot$. Окончательные физические и геометрические параметры системы перечислены в

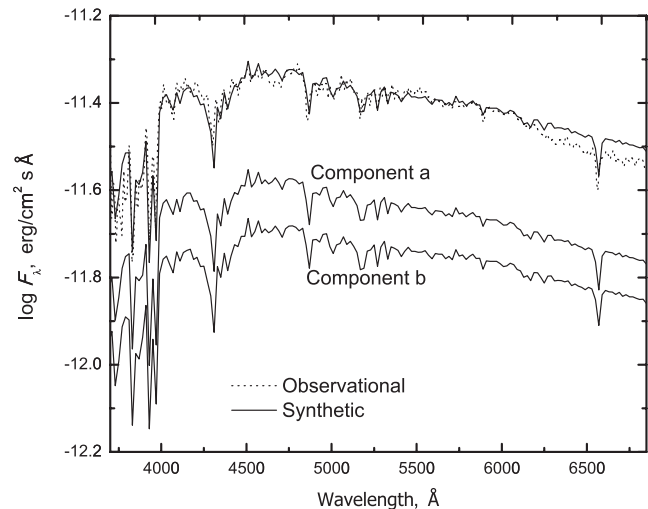


Рис. 4. Пунктир: полное наблюдаемое распределение энергии в непрерывном спектре системы. Сплошные линии: суммарное синтетическое распределение для двух компонентов, полученное с использованием модифицированного динамического параллакса ($\pi = 12.02 \pm 0.60$ mas); синтетический поток от главного компонента с $T_{\text{eff}} = 6100 \pm 50$ K, $\log g = 4.01 \pm 0.10$, $R = 1.93 \pm 0.15 R_\odot$ и синтетический поток от второго компонента с $T_{\text{eff}} = 5940 \pm 50$ K, $\log g = 3.98 \pm 0.10$, $R = 1.83 \pm 0.15 R_\odot$.

Таблица 5. Физические и геометрические параметры компонентов системы

Компонент	a	b
$T_{\text{эф}}, \text{K}$	6100 ± 50	5940 ± 50
Радиус, R_{\odot}	1.93 ± 0.20	1.83 ± 0.20
$\log g$	4.01 ± 0.10	3.98 ± 0.10
L, L_{\odot}	4.63 ± 0.80	3.74 ± 0.70
M_V	$3^{\text{m}}26 \pm 0.40$	$3^{\text{m}}51 \pm 0.50$
Масса, M_{\odot}	1.35 ± 0.16	1.25 ± 0.15
$\bar{\rho}, \bar{\rho}_{\odot}$	0.188 ± 0.015	0.204 ± 0.015
Сп. класс*	F8.5 IV	G0 IV
Параллакс, mas	12.02 ± 0.60	
$(M_a + M_b)/M_{\odot}$	2.60 ± 0.16	
Возраст,* Gyr	3.5 ± 0.5	

* Исходя из положений компонентов на эволюционных треках в [25].

Таблица 6. Звездные величины и показатели цвета синтетических спектров системы

Система	Фильтр	Полный	Комп. a	Комп. b
		± 0.02		
Johnson–Cousins	U	8.14	8.73	9.08
	B	8.02	8.63	8.93
	V	7.41	8.04	8.29
	R	7.07	7.72	7.95
	$U - B$	0.12	0.10	0.15
	$B - V$	0.61	0.59	0.64
	$V - R$	0.33	0.32	0.35
Strömgren	u	9.29	9.88	10.23
	v	8.35	8.96	9.28
	b	7.75	8.37	8.65
	y	7.38	8.01	8.26
	$u - v$	0.94	0.93	0.95
	$v - b$	0.60	0.58	0.63
	$b - y$	0.37	0.36	0.39
Tycho	B_T	8.17	8.77	8.09
	V_T	7.47	8.11	8.36
	$B_T - V_T$	0.69	0.67	0.73

Таблице 5; они с достаточной точностью представляют элементы системы в пределах ошибок измерений.

5. СИНТЕТИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Полные и индивидуальные синтетические звездные величины системы рассчитывались по следующему соотношению [33, 34]:

$$m_p(F_{\lambda,s}(\lambda)) = -2.5 \log \frac{\int P_p(\lambda) F_{\lambda,s}(\lambda) \lambda d\lambda}{\int P_p(\lambda) F_{\lambda,r}(\lambda) \lambda d\lambda} + ZP_p, \quad (10)$$

где m_p — синтетический блеск в p -полосе, $P_p(\lambda)$ — безразмерная функция чувствительности полосы p , $F_{\lambda,s}(\lambda)$ — синтетическое распределение энергии в спектре объекта, $F_{\lambda,r}(\lambda)$ — распределение энергии в спектре опорной звезды (Веги). Нулевые точки (ZP_p) взяты из работы [34] и ссылок в ней.

Результаты вычислений звездных величин и показателей цвета в разных фотометрических системах (Johnson–Cousins: $U, B, V, R, U - B, B - V, V - R$; Strömgren: $u, v, b, y, u - v, v - b, b - y$; Tycho: $B_T, V_T, B_T - V_T$) для всей системы и для индивидуальных компонентов приведены в Таблице 6.

Сравнение синтетических визуальных величин системы и их показателей цвета с наблюдаемыми показывает хорошее соответствие во всех трех фотометрических системах (см. Таблицу 7).

Основываясь на таблицах [25] или на эмпирическом соотношении $\text{Sp} - T_{\text{эф}}$ [24], оценим спектральные классы компонентов а и b системы как F8.5 и G0 соответственно.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием моделирования атмосфер, разности визуального блеска двух компонентов и полного наблюдаемого распределения энергии в спектре построены индивидуальные синтетические распределения и полное распределение для компонентов спекл-интерферометрической двойной HD 375. Для модификации орбиты системы использовалась аппроксимация методом наименьших квадратов с весами, обратно пропорциональными квадратам наблюдательных ошибок позиционных измерений. Таким образом оценены физические и геометрические параметры HD 375 и уточнен параллакс системы.

На Рис. 4 показано наилучшее найденное соответствие между полными синтетическими распределениями и наблюдаемым. Видно хорошее согласие максимальных значений абсолютного потока

и наклона спектра. Также наблюдается хорошее соответствие между синтетическими звездными величинами и показателями цвета и наблюдаемыми в трех фотометрических системах: Johnson–Cousins, Strömgren и Tycho (Таблицы 7 и 8). Это соответствие — хороший показатель надежности оцененных параметров компонентов системы, которые перечислены в Таблице 5.

Оцененные массы и радиусы можно объяснить только предположив, что система является двойной системой субгигантов. Более ранние вычисления суммы масс приведены в Таблице 4, а Малков и др. [36] вычислили ее тремя разными способами: используя закон Кеплера (так называемая динамическая масса M_d), по отношению масса–светимость и наблюдаемой фотометрии (фотометрическая масса M_{ph}) и с применением отношения масса–спектр вместе со спектральной классификацией (спектральная масса M_{sp}). Получено: $M_d = 2.78 \pm 0.89 M_\odot$, $M_{ph} = 2.67 M_\odot$ и $M_{sp} = 1.10 M_\odot$. Расхождение между оценками динамической и спектральной массы возможно связано с предположением авторов о том, что оба компонента — звезды главной последовательности (они использовали Таблицу VI из [37]), и что спектральная масса представляет собой минимальную массу системы.

Глубокий взгляд на оцененные физические и геометрические элементы системы (Таблица 5) показывает, что второй компонент очень похож на звезду β Hydri (HIP 2021), которая является проэволюционировавшим субгигантом G2 IV с возрастом примерно 6.5–7.0 млрд лет [38, 39]. Беддинг и др. [40], используя астросейсмологию высокой точности, измерили среднюю плотность звезды β Hydri, $\bar{\rho} = 0.1803 \pm 0.0011 \bar{\rho}_\odot$, а Норт и др. [41] с использованием интерферометрии для измерения углового диаметра, получили ее физические параметры:

$$T_{\text{eff}} = 5872 \pm 44 \text{ K}, \quad R = 1.814 \pm 0.017 R_\odot,$$

$$\log g = 3.952 \pm 0.005, \quad L = 3.51 \pm 0.09 L_\odot,$$

$$M = 1.07 \pm 0.03 M_\odot.$$

Главный компонент также подобен второму компоненту двойной системы β LMi B, который известен как субгигант F8 с массой $M = 1.7 \pm 0.4 M_\odot$ и абсолютной величиной $M_V = 2^m 3$ [42].

Исходя из этого, мы предполагаем, что оба компонента — проэволюционировавшие звезды-субгиганты с возрастными около 3.5 млрд лет. Рис. 5 показывает положения компонентов на эволюционных треках из [43].

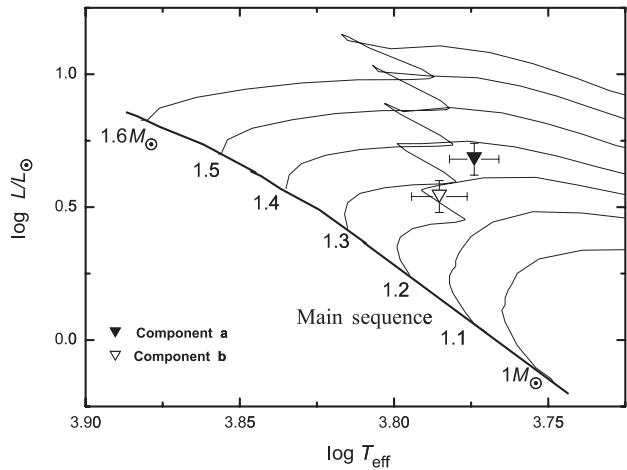


Рис. 5. Компоненты системы на эволюционных треках [43].

Таблица 7. Сравнение синтетических визуальных величин и показателей цвета для системы в целом с вычисленными по наблюдаемому распределению энергии в спектре [35]

Система	Фильтр	Полный синт.	Полный набл.
		± 0.02	± 0.02
Johnson–Cousins	B	8.02	8.03
	V	7.41	7.43
	$B - V$	0.61	0.60
Strömgren	v	8.35	8.35
	b	7.75	7.80
	$v - b$	0.60	0.55
Tycho	B_T	8.17	8.18
	V_T	7.47	7.50
	$B_T - V_T$	0.69	0.67

Таблица 8. Сравнение наблюдаемых и синтетических величин, цветов и разностей блеска системы

Параметр	Набл.*	Синт. (данная работа)
V_J	$7^m 41$	$7^m 41$
B_T	$8^m 11 \pm 0.01$	$8^m 17 \pm 0.02$
V_T	$7^m 47 \pm 0.01$	$7^m 47 \pm 0.02$
$(B - V)_J$	$0^m 61 \pm 0.02$	$0^m 61 \pm 0.03$
Δm	$0^m 27^{**} \pm 0.01$	$0^m 25 \pm 0.02$

Примечания: * См. Таблицу 1.

** Среднее значение для фильтра 545 nm/30 (Таблица 2).

Исходя из схожести обоих компонентов, наиболее вероятным механизмом формирования системы представляется фрагментация. Согласно [44], фрагментация вращающегося диска вокруг зарождающейся центральной протозвезды возможна, пока продолжается приток масс. Циннекер [45] указал на то, что иерархическая фрагментация при ротационном коллапсе может вызвать формирование двойных и кратных систем.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спекл-интерферометрическая двойная HD 375 была проанализирована с помощью моделирования атмосфер и динамического анализа. Параметры компонентов системы оценивались по наилучшему соответствию между полным наблюдаемым распределением энергии в спектре и синтетическими распределениями, построенными с помощью моделирования атмосфер индивидуальных компонентов. Вычислены полные и индивидуальные синтетические звездные величины и цвета системы (*UBVR* Johnson—Cousins, *uvby* Strömrgren и *BV* Tycho).

Вычислены модифицированная орбита и геометрические элементы системы; проведено сравнение с предыдущими значениями. Основываясь на оцененных параметрах, особенно на значениях радиусов и масс, мы предполагаем, что два компонента — субгиганты F8.5 и G0 на ранних стадиях, расположенные немного выше главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга—Рассела. Оцененные физические и геометрические параметры двух компонентов совпадают (в пределах ошибки) со значениями, приведенными в таблицах [37] для субгигантов.

Наконец, фрагментация представляется наиболее вероятным процессом формирования и эволюции обоих компонентов. Более того, система может быть использована для проверки теории звездной эволюции и ограничений на физическое описание недр звезд.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовались базы данных SAO/NASA ADS, SIMBAD и IPAC, а также программа CHORIZOS для фотометрического и спектрофотометрического анализа данных. Авторы выражают искреннюю благодарность Эллиотту П. Хоршу (кафедра физики Государственного университета Южного Коннектикута и Национальная обсерватория Китт-Пик) за его критические замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ESA, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200 (1997).
2. I. I. Balega, Yu. Yu. Balega, K.-H. Hofmann, et al., *Astronom. and Astrophys.* **385**, 87 (2002).
3. A. Tokovinin, B. D. Mason, and W. I. Hartkopf, *Astronom. J.* **139**, 743 (2010).
4. Jr. L. C. Roberts, N. H. Turner, L. W. Bradford, et al., *Astronom. J.* **130**, 2262 (2005).
5. Jr. L. C. Roberts, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **413**, 1200 (2011).
6. E. P. Horch, W. F. van Altena, Jr. W. M. Cyr, et al., *Astronom. J.* **136**, 312 (2008).
7. O. J. Eggen, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **67**, 315 (1955).
8. R. Kurucz, CD-ROM No. 19 (Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, MA, 1994).
9. R. Buser and R. L. Kurucz, *IAUS* **132**, 531 (1988).
10. M. A. Al-Wardat, Candidate's Dissertation, (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2003).
11. F. Castelli and R. L. Kurucz, arXiv:astro-ph/0405087 (2004).
12. M. Al-Wardat, *Pub. Astron. Soc. Australia* **29**, 523 (2012).
13. M. A. Al-Wardat, *Astronomische Nachrichten* **328**, 63 (2007).
14. M. A. Al-Wardat, *Astronomische Nachrichten* **330**, 385 (2009).
15. M. A. Al-Wardat and H. Widyan, *Astrophysical Bulletin* **64**, 365 (2009).
16. F. van Leeuwen, *Astronom. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
17. E. A. Pluzhnik, *Astronom. and Astrophys.* **431**, 587 (2005).
18. E. P. Horch, R. D. Meyer, and W. F. van Altena, *Astronom. J.* **127**, 1727 (2004).
19. I. I. Balega, Yu. Yu. Balega, A. F. Maksimov, et al., *Astrophysical Bulletin* **62**, 339 (2007).
20. E. P. Horch, W. F. van Altena, S. B. Howell, et al., *Astronom. J.* **141**, 180 (2011).
21. E. P. Horch, D. Falta, L. M. Anderson, et al., *Astronom. J.* **139**, 205 (2010).
22. I. I. Balega, Yu. Yu. Balega, A. F. Maksimov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **59**, 20 (2006).
23. E. P. Horch, D. R. Veillette, R. Baena Gallé, et al., *Astronom. J.* **137**, 5057 (2009).
24. K. R. Lang, *Astrophysical Data I. Planets and Stars* (Springer, 1992).
25. D. F. Gray, *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
26. M. A. Al-Wardat, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 58 (2002).
27. N. I. Shatskii and A. A. Tokovinin, *Astronomy Letters* **24**, 673 (1998).
28. E. Horch, Z. Ninkov, W. F. van Altena, et al., *Astronom. J.* **117**, 548 (1999).
29. E. P. Horch, S. E. Robinson, R. D. Meyer, et al., *Astronom. J.* **123**, 3442 (2002).
30. B. D. Mason, W. I. Hartkopf, E. R. Holdenried, and Th. J. Rafferty, *Astronom. J.* **121**, 3224 (2001).

31. V. G. Orlov, V. V. Voitsekhovich, C. A. Guerrero, et al., *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* **47**, 211 (2011).
32. I. I. Balega, Yu. Yu. Balega, L. T. Gasanova, et al., *Astrophysical Bulletin* **68**, 53 (2013).
33. J. Maíz Apellániz, *Astronom. J.* **131**, 1184 (2006).
34. J. Maíz Apellániz, *ASP Conf. Ser.* **364**, 227 (2007).
35. M. A. Al-Wardat, *Astrophysical Bulletin* **63**, 361 (2008).
36. O. Y. Malkov, V. S. Tamazian, J. A. Docobo, et al., *Astronom. and Astrophys.* **546**, A69 (2012).
37. V. Straizys and G. Kuriliene, *Astrophys. and Space Sci.* **80**, 353 (1981).
38. D. Dravins, L. Lindegren, and D. A. Vandenberg, *Astronom. and Astrophys.* **330**, 1077 (1998).
39. J. Fernandes and M. J. P. F. G. Monteiro, *Astronom. and Astrophys.* **399**, 243 (2003).
40. T. R. Bedding, H. Kjeldsen, T. Arentoft, et al., *Astrophys. J.* **663**, 1315 (2007).
41. J. R. North, J. Davis, T. R. Bedding, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **380**, L80 (2007).
42. G. A. Gontcharov and O. V. Kiyeva, *Astronom. and Astrophys.* **391**, 647 (2002).
43. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).
44. I. A. Bonnell, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **269**, 837 (1994).
45. H. Zinnecker, *IAUS* **200**, 1 (2001).

Speckle Interferometric Binary System HD 375; Is It a Sub-Giant Binary?

M. A. Al-Wardat, Yu. Yu. Balega, V. V. Leushin, N. A. Yusuf, A. A. Taani, K. S. Al-Waqfi, S. Masda

Atmospheric modeling is used to build synthetic spectral energy distributions (SEDs) for the individual components of the speckle interferometric binary system HD 375. These synthetic SEDs are combined together for the entire system and compared with its observed SED in an iterative procedure to achieve the best fit. Kurucz blanketed models and the measurements of magnitude differences were used to build these SEDs. The input physical parameters for building these best fitted synthetic SEDs represent adequately enough properties of the system. These parameters are: $T_{\text{eff}}^a = 6100 \pm 50$ K, $T_{\text{eff}}^b = 5940 \pm 50$ K, $\log g_a = 4.01 \pm 0.10$, $\log g_b = 3.98 \pm 0.10$, $R_a = 1.93 \pm 0.20 R_{\odot}$, $R_b = 1.83 \pm 0.20 R_{\odot}$, $M_v^a = 3^m26 \pm 0.40$, $M_v^b = 3^m51 \pm 0.50$, $L_a = 4.63 \pm 0.80 L_{\odot}$, and $L_b = 3.74 \pm 0.70 L_{\odot}$, in accordance with the new estimated parallax $\pi = 12.02 \pm 0.60$ mas. A modified orbit of the system is built and compared with earlier orbits, and the masses of the two components are calculated as $M_a = 1.35 M_{\odot}$ and $M_b = 1.25 M_{\odot}$. Based on the estimated physical and geometrical parameters of the system, which are confirmed by synthetic photometry, we suggest that the two components are evolved subgiant (F8.5 IV and G0 IV) stars with the age of 3.5 Gyr, formed by fragmentation.

Keywords: *binaries: visual—stars: fundamental parameters—stars: individual: HD 375*