

## ФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЭВОЛЮЦИОНИРОВАВШЕЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ HD 6009

© 2014 М. А. Аль-Вардат \*

Университет Аль-Хуссейн Бин Талал, Маан, 71111 Иордания

Поступила в редакцию 29 ноября 2013 года; принята в печать 05 августа 2014 года

С помощью моделирования атмосфер и динамического анализа компонентов спекл-интерферометрической двойной системы HD 6009 получены оценки их индивидуальных физических и геометрических параметров. Модели атмосфер построены с применением сетки бланкетированных моделей солнечной металличности Куруца и использованы для расчета индивидуального синтетического распределения энергии в спектре (РЭС) отдельно для каждого компонента. Эти РЭС комбинируются для вычисления полного РЭС системы из суммарной светимости компонентов А и В, находящихся на расстоянии  $d$  от Земли. Для получения наилучшего соответствия между синтетическими и полным наблюдаемым РЭС мы использовали модифицированные параметры и итеративный метод. Получены следующие физические и геометрические параметры компонентов системы:  $T_{\text{эфф}}^{\text{A}} = 5625 \pm 75$  К,  $T_{\text{эфф}}^{\text{B}} = 5575 \pm 75$  К,  $\lg g^{\text{A}} = 3.75 \pm 0.25$ ,  $\lg g^{\text{B}} = 3.75 \pm 0.25$ ,  $R^{\text{A}} = 2.75 \pm 0.30 R_{\odot}$ ,  $R^{\text{B}} = 2.65 \pm 0.30 R_{\odot}$ ,  $M_{\text{V}}^{\text{A}} = 2^{\text{m}}99 \pm 0.30$ ,  $M_{\text{V}}^{\text{B}} = 3^{\text{m}}12 \pm 0.30$ ,  $M^{\text{A}} = 1.60 \pm 0.20 M_{\odot}$ ,  $M^{\text{B}} = 1.46 \pm 0.20 M_{\odot}$ ,  $L^{\text{A}} = 15.84 \pm 1.60 L_{\odot}$  и  $L^{\text{B}} = 15.83 \pm 1.60 L_{\odot}$ , а также спектральный класс G6 для обоих компонентов.

Ключевые слова: двойные: визуальные — звёзды: фундаментальные параметры — звёзды: индивидуальные: HD 6009

### 1. ВВЕДЕНИЕ

С помощью спутника Hipparcos было обнаружено, что многие звезды, ранее известные как одиночные, на самом деле являются двойными и кратными системами, что подтверждает двойственность и кратность галактических звездных систем. Большинство этих двойных и кратных систем — близкие звезды, кажущиеся одиночными даже в самые большие наземные телескопы, за исключением случаев, когда они наблюдаются современными методами высокого разрешения, такими, как спекл-интерферометрия и адаптивная оптика. Эти звездные системы известны как спекл-интерферометрические двойные.

В целом изучение двойных систем играет важную роль в определении нескольких ключевых звездных параметров, что сложнее сделать в случае проэволюционировавших спекл-интерферометрических двойных. Несмотря на то, что сотни двойных систем с периодами порядка десяти лет и меньше регулярно наблюдаются разными группами по всему миру методами высокого разрешения, данные об индивидуальных физических параметрах компонентов этих систем до сих пор скудны.

Таким образом, комбинация спекл-интерферометрии, спектрофотометрии, моделирования атмосфер и с недавних пор орбитального анализа открывает новые возможности для точного определения физических и геометрических параметров спекл-интерферометрических двойных. Эти параметры включают в себя эффективные температуры, радиусы, элементы орбиты, спектральные классы, классы светимости и массы обоих компонентов двойной системы. Метод был успешно применен к нескольким двойным системам, состоящим из звезд главной последовательности: ADS 11061, Coi 1289, Coi 1291, HIP 11352, HIP 11253, HIP 70973 и HIP 72479 [1–5], а также к системам, состоящим из субгигантов, HD 25811 и HD 375 [6, 7].

Система HD 6009 (HIP 4809) — хорошо известная спекл-интерферометрическая двойная, которая регулярно наблюдается разными исследовательскими группами по всему миру. Первое предположение, что это проэволюционировавшая звезда G9 с классом светимости между III и IV, было сделано Йоссом [8]. Он основывался на анализе интенсивности линии ионизированного стронция  $\lambda 4077 \text{ \AA}$  в призменном спектре, полученном на телескопе Кертиса-Шмидта Мичиганско-

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

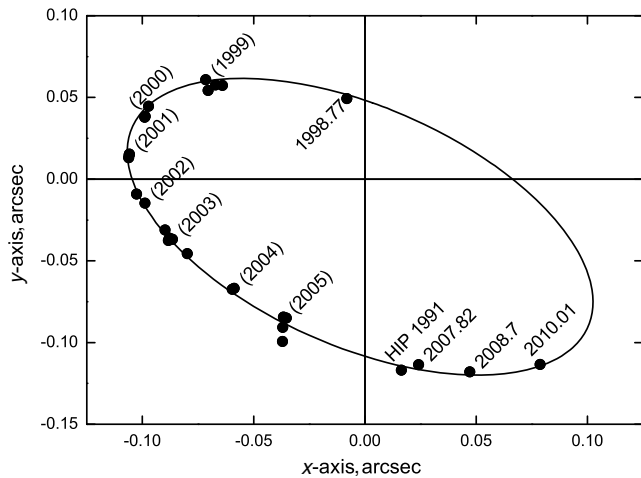


Рис. 1. Относительная визуальная орбита системы с эпохой позиционных измерений; нулевая точка представляет собой положение главного компонента.

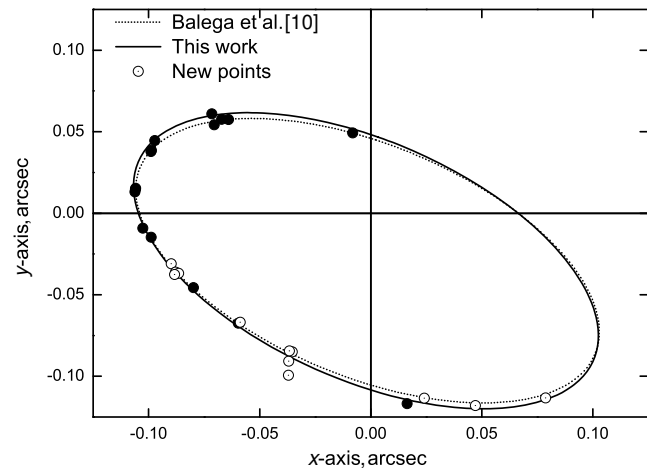


Рис. 2. Модифицированная относительная визуальная орбита системы в данной работе (сплошная линия) и орбита из [10] (пунктир).

го университета и на щелевых спектрограммах с 60-дюймового рефлектора обсерватории Маунт-Вильсон. Класс светимости IV был подтвержден умеренной абсорбцией циана на  $\lambda 4216 \text{ \AA}$ . Балега и др. [9] также отметили, что вычисленные абсолютные величины индивидуальных компонентов ( $M_V^A = 3.1$  и  $M_V^B = 3.3$ ) и их поздний спектральный класс G не соответствуют их цветам ( $(B - V)$  или  $(V - I)$ ), из чего следует, что это проэволюционировавшая система. Кроме того, Балега и др. [10], основываясь на разности блеска и параллаксах, измеренных Hipparcos, нашли, что система состоит из субгигантов G6 и G9.

Таким образом, анализ системы вышеуказанным методом поможет понять механизмы формирования и эволюции двойных звездных систем.

Таблица 1 содержит данные системы из базы SIMBAD и каталогов Hipparcos и Tycho [11]. В таблице 2 перечислены синтетические величины и показатели цвета в системах Джонсона, Стремгрена и Tycho, вычисленные [12, 13] на основе наблюдаемого РЭС.

## 2. ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТЫ

Основываясь на двенадцати интерферометрических измерениях и первой точке по измерениям Hipparcos, Балега и др. [14] представили предварительную орбиту системы с периодом около пятнадцати лет. Орбита была затем модифицирована [10] с использованием шестнадцать астрометрических измерений (рис. 1).

Здесь представлено небольшое уточнение орбиты с применением всех измерений относительных положений, перечисленных в таблице 3, которая включает двенадцать дополнительных точек к тем,

что были использованы в [10] и покрывает всю орбиту, начиная с первого измерения спутником Hipparcos. Квадранты некоторых измерений были скорректированы для получения согласованной орбиты.

Оценки орбитальных элементов системы, а также элементы старой орбиты приведены в таблице 4. На рис. 1 показана относительная визуальная орбита системы с эпохой позиционных измерений, а на рис. 2 представлена новая орбита в сравнении со старой из [10].

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕР

### 3.1. Входные параметры для моделей атмосфер

Между  $\Delta m$  в разных фильтрах в диапазоне  $\lambda 503\text{--}800 \text{ нм}$  нет существенной разницы. Пользуясь  $m_V = 6^m 71$  из таблицы 1 и  $\Delta m = 0^m 18$  как средним по всем девятнадцати измерениям  $\Delta m$  (таблица 3), мы вычислили предварительные индивидуальные  $m_V$  для каждого компонента:  $m_V^A = 7^m 376$  и  $m_V^B = 7^m 556$ .

Эти видимые величины, параллакс системы из каталога Hipparcos ( $\pi = 13.94 \pm 0.90$ ,  $d = 71.74 \text{ pc}$ ) и коэффициент поглощения  $A_V = 0.1432$  из [27] и из "Galactic Dust Reddening and Extinction Archive"<sup>1</sup>, подставленные в уравнение

$$M_V = m_V + 5 - 5 \lg d - A, \quad (1)$$

дают абсолютные величины компонентов:

$$M_V^A = 2^m 95 \text{ и } M_V^B = 3^m 13.$$

<sup>1</sup><http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>

**Таблица 1.** Данные из базы SIMBAD и каталогов Hipparcos и Tycho

$\alpha_{2000}$	01 <sup>h</sup> 01 <sup>m</sup> 43 <sup>s</sup> .581	SIMBAD
$\delta_{2000}$	+25°17'31''99	SIMBAD
Спектральный класс	G8 IV	SIMBAD
$V_J$	6 <sup>m</sup> 71	Hipparcos
$B_T$	7 <sup>m</sup> 683 ± 0.008	Tycho
$V_T$	6 <sup>m</sup> 806 ± 0.006	Tycho
$(B - V)_J$	0 <sup>m</sup> 783 ± 0.007	Tycho
Параллакс, mas	13.94 ± 0.90	Hipparcos
Параллакс, mas	12.3 ± 5.3	Tycho

**Таблица 2.** Полные величины и показатели цвета системы в фотометрических системах Джонсона, Стремгрена и Tycho [12, 13]

$B_J$	7 <sup>m</sup> 43 ± 0.06	$y$	6 <sup>m</sup> 70 ± 0.06
$R_J$	6 <sup>m</sup> 32 ± 0.07	$v - b$	0 <sup>m</sup> 72 ± 0.08
$V_J$	6 <sup>m</sup> 74 ± 0.06	$b - y$	0 <sup>m</sup> 44 ± 0.08
$(B - V)_J$	0 <sup>m</sup> 67 ± 0.08	$B_T$	7 <sup>m</sup> 64 ± 0.06
$v$	7 <sup>m</sup> 85 ± 0.06	$V_T$	6 <sup>m</sup> 81 ± 0.06
$b$	7 <sup>m</sup> 145 ± 0.06	$(B - V)_T$	0 <sup>m</sup> 82 ± 0.08

Соответствующие эффективные температуры для таких абсолютных величин будут либо  $T_{\text{eff}}^A = 6950$  К и  $T_{\text{eff}}^B = 6800$  К в случае, если компоненты находятся на главной последовательности, как следует из таблиц [28], либо меньше — в случае проэволюционировавших компонентов. Следовательно, постоянная ускорения силы тяжести на поверхности таких звезд будет  $\lg g \leq 4.3$ .

Эти значения эффективных температур и ускорений сил тяжести представляют собой предварительные входные параметры для моделирования атмосфер обоих компонентов, из которых мы вычисляем их синтетические спектры.

### 3.2. Синтетические спектры

Спектральные распределения энергии в континууме для каждого компонента вычисляются на основе моделей атмосфер с солнечным содержанием, по сетке бланкетированных моделей Куруца 1994 г. года (ATLAS 9).

Полный поток энергии от двойной звезды состоит из суммарной светимости компонентов А и В,

находящихся на расстоянии  $d$  от Земли [5]. Поэтому можно написать:

$$F_{\lambda} d^2 = H_{\lambda}^A \times (R^A)^2 + H_{\lambda}^B \times (R^B)^2, \quad (2)$$

откуда

$$F_{\lambda} = \left( (R^A)^2 / d \right)^2 \left( H_{\lambda}^A + H_{\lambda}^B \times (R^B / R^A)^2 \right), \quad (3)$$

где  $H_{\lambda}^A$  и  $H_{\lambda}^B$  — потоки от единичной поверхности соответствующего компонента. Здесь  $F_{\lambda}$  представляет собой полное РЭС системы.

После построения синтетических РЭС с использованием вышеупомянутых предварительных входных параметров (раздел 3.1) и уравнений (2) и (3) и сравнения с наблюдаемым РЭС мы нашли, что в рамках критериев наилучшего соответствия они не согласуются. Критерии следующие: максимальные значения абсолютных потоков, наклон континуума в спектрах и профили линий поглощения.

Таким образом, для получения наилучшего соответствия между синтетическими РЭС и наблюдаемым было сделано много итераций с использованием различных наборов параметров по следующим формулам:

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

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

где было использовано значение  $T_{\odot} = 5777$  К. Но во всех попытках смоделировать компоненты как звезды главной последовательности, между синтетическими и наблюдаемым РЭС были разногласия как в наклоне континуума (который представляет эффективные температуры), так и в абсолютном потоке (который представляет либо радиусы компонентов, либо параллакс системы).

Ключевые параметры для получения наилучшего соответствия — радиусы компонентов, которые должны быть больше тех, что были бы для звезд главной последовательности (как предполагалось прежде) и эффективные температуры, которые должны быть ниже. Это значит, что оба компонента — проэволюционировавшие звезды.

Таким образом, на основе этого предположения были построены сотни моделей и проведено сравнение с наблюдаемым РЭС, пока не было достигнуто наилучшее соответствие при следующем наборе параметров (рис. 3):

$$T_{\text{eff}}^A = 5625 \pm 75 \text{ K}, \quad T_{\text{eff}}^B = 5575 \pm 75 \text{ K},$$

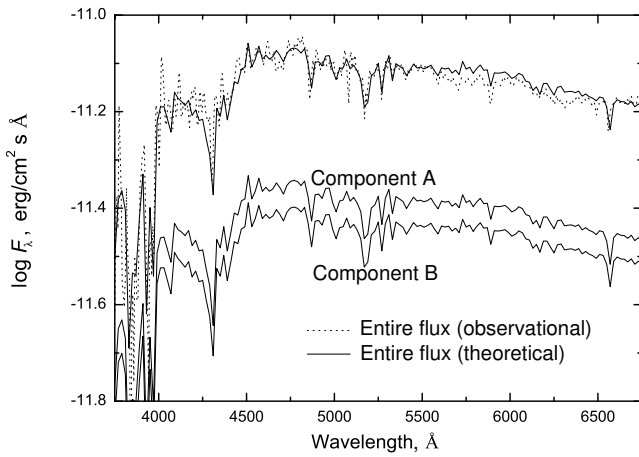
$$\lg g^A = 3.75 \pm 0.25, \quad \lg g^B = 3.75 \pm 0.25,$$

$$R^A = 2.75 \pm 0.30 R_{\odot}, \quad R^B = 2.65 \pm 0.30 R_{\odot}.$$

**Таблица 3.** Относительные положения, измеренные разными методами, использованные для построения орбиты системы. Эти точки взяты из Четвертого каталога интерферометрических измерений двойных звезд

Дата	$\theta$ , deg	$\sigma_\theta$	$\rho$ , deg	$\sigma_\rho$	$\Delta m$	$\sigma_{\Delta m}$	Фильтр ( $\lambda$ )	$\Delta\lambda$	Телескоп	Ссылки*	Метод**
1991.25	188	1.5	0.118	0.004	0.28	0.30	511	222	0.3	HIP 1997a [11]	Hh
1997.7206				<0.065			550	24	2.1	Msn 1999b [15]	Su
1998.7718	0	0	0	0	0.1	0.24	545	30	6	Plz 2005 [16]	S
1998.7718	189.5	0.5	0.05	0.002	0.17	0.15	545	30	6	Bag2002 [9]	S
1999.7472	228.2	1.5	0.086	0.002	0.3	0.16	2115	214	6	Bag2002 [9]	S
1999.8128	49.5	0.3	0.0885	0.0003	0.19	0.04	610	20	6	Bag2004 [17]	S
1999.8233	49.7	0	0.094	0	0	0	550	24	2.1	Msn 2001b [18]	Su
1999.8882	0	0	0	0	0.05	0.15	648	41	3.5	Hor2004 [19]	S
1999.8882	52.5	0	0.089	0	0	0	648	41	3.5	Hor2002a [20]	S
2000.7674	0	0	0	0	0.22	0.15	503	40	3.5	Hor2004 [19]	S
2000.7674	65.5	0	0.107	0	0	0	503	40	3.5	Hor2002a [20]	S
2000.8728	249.2	0.6	0.106	0.001	0.12	0.19	800	110	6	Bag2006b [14]	S
2000.8755	248.8	0.4	0.106	0.001	0.16	0.05	600	30	6	Bag2006b [14]	S
2001.7526	261.9	0.2	0.107	0.001	0	0.12	545	30	6	Bag2006b [14]	S
2001.7526	262.2	0.2	0.107	0.001	0	0.12	600	30	6	Bag2006b [14]	S
2001.753	262.2	0	0.107	0	0	0	—	—	6	Bag2006 [10]	S
2001.845	263.1	0	0.107	0	0	0	—	—	6	Bag2006 [10]	S
2002.726	275.2	0	0.103	0	0	0	—	—	6	Bag2006 [10]	S
2002.796	278.6	0	0.1	0	0	0	—	—	6	Bag2006 [10]	S
2003.6372	109.2	0	0.095	0	0	0	550	40	3.5	Hor2008 [21]	S
2003.6372	112.5	0	0.095	0	0.15	0	754	44	3.5	Hor2008 [21]	S
2003.6372	113.2	0	0.094	0	0	0	698	39	3.5	Hor2008 [21]	S
2003.6372	293.2	0	0.096	0	0	0	650	38	3.5	Hor2008 [21]	S
2003.928	299.9	0	0.092	0	0	0	—	—	6	Bag2006 [10]	S
2004.815	318.7	0	0.09	0	0	0	—	—	6	Bag2006 [10]	S
2004.8154	318.8	0.3	0.089	0.002	0.21	0.04	600	30	6	Bag2007b [22]	S
2005.5619	338	0	0.098	0	0.81	0	698	39	3.5	Hor2008 [21]	S
2005.5975	337.6	0	0.092	0	0.06	0	698	39	3.5	Hor2008 [21]	S
2005.5975	336.7	0	0.092	0	0	0	698	39	3.5	Hor2008 [21]	S
2005.8627	339.7	0	0.106	0	0	0	550	24	3.8	Msn 2009 [23]	Su
2007.8228	192	0	0.116	0	0.26	0	698	39	3.5	Hor2010 [24]	S
2008.702	201.8	1.1	0.127	0.003	0	0.12	550	40	3.5	Hor2012a [25]	S
2010.0045	214.8	0	0.138	0	0.23	0	562	40	3.5	Hor2011 [26]	S
2010.0045	0	0	0	0	0.15	0	692	40	3.5	Hor2011 [26]	S

\* Сокращения ссылок как в Четвертом каталоге интерферометрических измерений двойных звезд.  
 \*\* S: спекл-интерферометрия; Su: USNO спекл.



**Рис. 3.** Пунктир — полное наблюдаемое РЭС континуального спектра системы [12]. Сплошные линии — полное вычисленное РЭС двух компонентов; вычисленный поток главного компонента с  $T_{\text{eff}} = 5625 \pm 75$  K,  $\lg g = 3.75 \pm 0.25$ ,  $R = 2.75 \pm 0.30 R_{\odot}$  и вычисленный поток вторичного компонента с  $T_{\text{eff}} = 5575 \pm 75$  K,  $\lg g = 3.75 \pm 0.25$ , и  $R = 2.65 \pm 0.30 R_{\odot}$ .

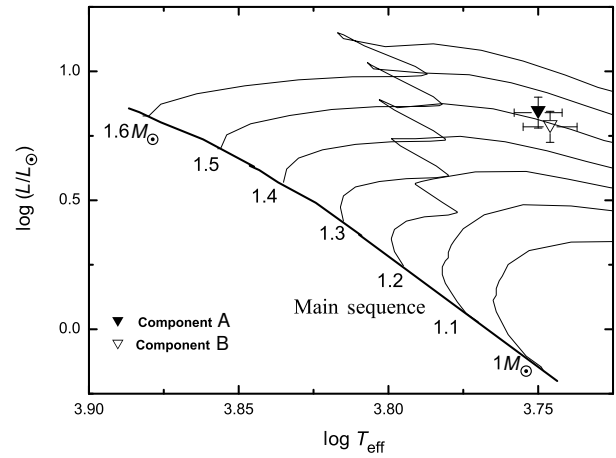
Отсюда следуют светимости:

$$L^A = 15.84 \pm 1.60 L_{\odot} \text{ и } L^B = 15.83 \pm 1.60 L_{\odot}.$$

Чтобы убедиться в наличии корреляции между физическими и геометрическими параметрами и чтобы связать динамический анализ и атмосферное моделирование, мы использовали уравнение

**Таблица 4.** Уточненные элементы орбиты системы в сравнении с элементами старой орбиты из [10]

Параметры	Данная работа	Старая орбита [10]
Период $P$	$16^{\text{a}}28 \pm 0^{\text{a}}08$	$16^{\text{a}}41 \pm 0^{\text{a}}11$
Эпоха периастра $T_0$	$1998.55 \pm 0.06$	$1998.62 \pm 0.02$
Эксцентриситет $e$	$0.385 \pm 0.014$	$0.393 \pm 0.012$
Большая полуось $a$	$0''130 \pm 0''002$	$0''128 \pm 0''002$
Наклонение $i$	$58^{\circ}18 \pm 0^{\circ}93$	$58^{\circ}4 \pm 0^{\circ}5$
Аргумент периастра $\omega$	$287^{\circ}45 \pm 0^{\circ}60$	$106^{\circ}9 \pm 0^{\circ}6$
Долгота восход. узла $\Omega$	$235^{\circ}03 \pm 0^{\circ}68$	$57^{\circ}1 \pm 0^{\circ}8$



**Рис. 4.** Компоненты системы на эволюционных треках [32].

Кеплера:

$$\left( \frac{M^A + M^B}{M_{\odot}} \right) (\pi^3) = \frac{a^3}{p^2}, \quad (5)$$

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

где  $\left( \frac{M^A + M^B}{M_{\odot}} \right)$  — сумма масс двух компонентов в солнечных массах,  $\pi$  — параллакс системы в угловых секундах,  $a$  — большая полуось в угловых секундах, а  $p$  — период в годах.

С элементами орбиты системы, вычисленными в разделе 4, сумма масс двух компонентов получается

$$(M^A + M^B) / M_{\odot} = 3.06 \pm 0.59. \quad (6)$$

Итоговые физические и геометрические параметры системы перечислены в таблице 5. Основываясь на таблицах в [28] или [29], мы оценили спектральный класс обоих компонентов — G6.

#### 4. СИНТЕТИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Помимо прямого сравнения можно проверить надежность нашего метода оценки физических и геометрических параметров путем сравнения полных наблюдаемых величин системы, полученных на разных наземных или космических телескопах, с полными синтетическими. Для этого мы воспользовались следующим соотношением [30, 31]:

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

**Таблица 5.** Параметры компонентов системы

Параметр	Компонент А	Компонент В
$T_{\text{eff}}$ , К	$5625 \pm 100$	$5575 \pm 100$
Радиус, $R_{\odot}$	$2.75 \pm 0.50$	$2.65 \pm 0.50$
$\lg g$	$3.75 \pm 0.25$	$3.75 \pm 0.25$
$L, L_{\odot}$	$15.84 \pm 1.60$	$15.83 \pm 1.60$
$M_V^*$	$2^{\text{m}}99 \pm 0^{\text{m}}30$	$3^{\text{m}}12 \pm 0^{\text{m}}30$
Масса, $M_{\odot}$	$1.35 \pm 0.16$	$1.25 \pm 0.15$
$\bar{\rho}, \bar{\rho}_{\odot}$	$0.077 \pm 0.015$	$0.078 \pm 0.015$
Масса, $M_{\odot}^{**}$	$1.60 \pm 0.20$	$1.46 \pm 0.20$
Сп. класс**	G6	G6
Возраст, млрд лет	$2.7 \pm 0.3$	

\* На основе индивидуальных синтетических спектров (таблица 6).

\*\* На основе таблиц из [28].

для вычисления полных и индивидуальных синтетических величин системы, где  $m_p$  — синтетическая величина полосы пропускания  $p$ ,  $P_p(\lambda)$  — безразмерная функция чувствительности полосы  $p$ ,  $F_{\lambda,s}(\lambda)$  — синтетическое РЭС объекта, а  $F_{\lambda,r}(\lambda)$  — РЭС звезды сравнения (Веги). Мы использовали нулевые точки ( $ZP_p$ ) из [31] и ссылок из этой работы.

Вычисленные величины и показатели цвета для полной системы и индивидуальных компонентов в разных фотометрических системах приведены в таблице 6.

### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение синтетических величин и цветов (таблица 6) с наблюдаемыми (таблицы 1 и 2) показывает очень хорошее соответствие в трех фотометрических системах: Джонсона–Казинса, Стремгрена и Тучо. Это хороший признак надежности оцененных параметров индивидуальных компонентов системы, которые перечислены в таблице 5. Более того, оцененные абсолютные величины  $M_V^A = 2^{\text{m}}99 \pm 0.30$ ,  $M_V^B = 3^{\text{m}}12 \pm 0.30$  хорошо согласуются с ранее вычисленными в разделе 3.1  $M_V^A = 2^{\text{m}}95$ ,  $M_V^B = 3^{\text{m}}13$  и немного отличаются от тех, что приводятся в [9] ( $M_V^A = 3.1$  и  $M_V^B = 3.3$ ).

На рисунке 4 показаны положения компонентов на эволюционных треках [32]. Планки погрешностей на рисунке включают в себя эффект неопределенности параллакса. Возраст системы можно оценить из эволюционных треков как почти 2.7 млрд лет.

**Таблица 6.** Величины и показатели цвета синтетических спектров системы

Система	Фильтр	Полный	Комп. А	Комп. В
Джонсон–Казинс	$U$	$7.77 \pm 0.03$	8.44	8.61
	$B$	7.47	8.15	8.30
	$V$	6.72	7.41	7.54
	$R$	6.32	7.01	7.14
	$U - B$	0.30	0.29	0.31
	$B - V$	0.75	0.74	0.76
	$V - R$	0.40	0.40	0.41
Стремгрэн	$u$	8.91	9.58	9.76
	$v$	7.87	8.55	8.71
	$b$	7.13	7.82	7.95
	$y$	6.69	7.38	7.51
	$u - v$	1.04	1.03	1.05
	$v - b$	0.74	0.73	0.75
	$b - y$	0.44	0.44	0.45
Тучо	$B_T$	7.67	8.35	8.50
	$V_T$	6.80	7.49	7.62
	$B_T - V_T$	0.87	0.86	0.88

**Таблица 7.** Сравнение наблюдаемых и синтетических полных величин, цветов и разностей блеска системы

Параметры	Наблюдаемые*	Синтетические (данная работа)
$V_J$	$6^{\text{m}}71$	$6^{\text{m}}72 \pm 0.03$
$B_T$	$7^{\text{m}}683 \pm 0.008$	$7^{\text{m}}67 \pm 0.03$
$V_T$	$6^{\text{m}}806 \pm 0.006$	$6^{\text{m}}80 \pm 0.03$
$(B - V)_J$	$0^{\text{m}}783 \pm 0.007$	$0^{\text{m}}75 \pm 0.04$
$\Delta m$	$0^{\text{m}}14^{**}$	$0^{\text{m}}13 \pm 0.04$

\* См. таблицу 1.

\*\* См. раздел 3.1.

Из параметров компонентов системы и их положений на эволюционных треках ясно, что они представляют собой двойную систему из проэволюционировавших звезд. Следовательно, мы можем заключить на основе теорий формирования, что фрагментация — наиболее вероятный процесс для формирования такой системы. Так, Боннелл [33] сделал вывод, что фрагментация вращающегося вокруг центральной протозвезды диска возможна, пока продолжает поступать вещество, а Циннекер [34] указал на то, что иерархическая фрагмен-

тация во время ротационного коллапса может быть причиной появления двойных и кратных систем.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе изучения двойной системы HD 6009 методом атмосферного моделирования и динамического анализа, используемого в исследованиях спекл-интерферометрических двойных, можно сделать следующие основные выводы:

- (1) На основе наилучшего соответствия между наблюдаемым РЭС и синтетическими, построенными методом моделирования атмосфер индивидуальных компонентов, получен полный набор физических и геометрических параметров компонентов системы.
- (2) Оцененные параметры хорошо согласуются с ранее опубликованными.
- (3) На основе параметров компонентов системы и их положений на эволюционных треках мы показали, что система состоит из проэволюционировавших звезд—близнецов класса G6.
- (4) Вычислены полные и индивидуальные синтетические величины и цвета системы в фотометрических системах *UBVR* Джонсона-Казинса, *wby* Стремгрена и *BV* Tycho.
- (5) Наконец, в качестве наиболее вероятного процесса для формирования и эволюции системы предложена фрагментация.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит миссис Каутер Аль-Вакфи за помощь в некоторых вычислениях. Часть работы была выполнена автором во время исследовательской поездки в Институт астрофизики Макса Планка (Гархинг) в 2011 г., которая финансировалась Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Немецкое научно-исследовательское сообщество). В этой работе использовались Четвертый интерферометрический каталог, базы данных SIMBAD, SAO/NASA ADS, IPAC и программа CHORIZOS для фотометрического и спектрофотометрического анализа данных (<http://www.stsci.edu/jmaiz/software/chorizos/chorizos.html>), написанная в среде IDL (ITT Visual Information Solutions Corporation).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. A. Al-Wardat, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **53**, 51 (2002).
2. M. A. Al-Wardat, Astronomische Nachrichten **328**, 63 (2007).
3. M. A. Al-Wardat, Astronomische Nachrichten **330**, 385 (2009).
4. M. A. Al-Wardat and H. Widyana, Astrophysical Bulletin **64**, 365 (2009).
5. M. Al-Wardat, Publ. Astron. Soc. Australia **29**, 523 (2012).
6. M. A. Al-Wardat, H. S. Widyana, and A. Al-Thyabat, Publ. Astron. Soc. Australia **31**, 5 (2014).
7. M. A. Al-Wardat, Yu. Yu. Balega, V. V. Leushin, et al., Astrophysical Bulletin **69**, 58.
8. K. M. Yoss, Astrophys. J. **134**, 809 (1961).
9. I. I. Balega, Yu. Yu. Balega, K.-H. Hofmann, et al., Astron. and Astrophys. **385**, 87 (2002).
10. I. I. Balega, Yu. Yu. Balega, K.-H. Hofmann, et al., Astron. and Astrophys. **448**, 703 (2006).
11. ESA, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA-SP 1200, (1997).
12. M. A. Al-Wardat, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **53**, 58 (2002).
13. M. A. Al-Wardat, Astrophysical Bulletin **63**, 361 (2008).
14. I. I. Balega, A. F. Balega, E. V. Maksimov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **59**, 20 (2006).
15. B. D. Mason, C. Martin, W. I. Hartkopf, et al., Astron. J. **117**, 1890 (1999).
16. E. A. Pluzhnik, Astron. and Astrophys. **431**, 587 (2005).
17. I. Balega, Yu. Yu. Balega, A. F. Maksimov, et al., Astron. and Astrophys. **422**, 627 (2004).
18. B. D. Mason, W. I. Hartkopf, E. R. Holdenried, and T. J. Rafferty, Astron. J. **121**, 3224 (2001).
19. E. P. Horch, R. D. Meyer, and W. F. van Altena, Astron. J. **127**, 1727 (2004).
20. E. P. Horch, S. E. Robinson, R. D. Meyer, et al., Astron. J. **123**, 3442 (2002).
21. E. P. Horch, W. F. van Altena, W. M. Cyr, Jr., et al., Astron. J. **136**, 312 (2008).
22. I. I. Balega, Yu. Yu. Balega, A. F. Maksimov, et al., Astrophysical Bulletin **62**, 339 (2007).
23. B. D. Mason, W. I. Hartkopf, D. R. Gies, et al., Astron. J. **137**, 3358 (2009).
24. E. P. Horch, D. Falta, L. M. Anderson, et al., Astron. J. **139**, 205 (2010).
25. E. P. Horch, L. A. P. Bahi, J. R. Gaulin, et al., Astron. J. **143**, 10 (2012).
26. E. P. Horch, S. C. Gomez, W. H. Sherry, et al., Astron. J. **141**, 45 (2011).
27. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, Astrophys. J. **737**, 103 (2011).
28. D. F. Gray, *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres* (2005).
29. K. R. Lang, *Astrophysical Data. I. Planets and Stars* (1992).
30. J. Maíz Apellániz, Astron. J. **131**, 1184 (2006).
31. J. Maíz Apellániz, ASP Conf. Ser., № 364, 227 (2007).
32. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, Astron. and Astrophys. Suppl. **141**, 371 (2000).
33. I. A. Bonnell, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **269**, 837 (1994).
34. H. Zinnecker, IAU Symp., № 200, 5 (2001).

**Physical and Geometric Parameters of the Evolved Binary System HD 6009****M. A. Al-Wardat**

Atmospheric modeling and dynamical analysis of the components of the speckle interferometric binary system HD 6009 were used to estimate their individual physical and geometric parameters. Model atmospheres were constructed using a grid of Kurucz's solar metallicity blanketed models and used to compute the individual synthetic spectral energy distribution (SED) for each component separately. These SEDs were combined together to compute the entire SED for the system from the net luminosities of the components A and B located at a distance  $d$  from the Earth. We used the modified feedback parameters and the iteration method to get the best fit between the synthetic and observed total SEDs. The physical and geometric parameters of the system's components were derived as  $T_{\text{eff}}^{\text{A}} = 5625 \pm 75$  K,  $T_{\text{eff}}^{\text{B}} = 5575 \pm 75$  K,  $\log g^{\text{A}} = 3.75 \pm 0.25$ ,  $\log g^{\text{B}} = 3.75 \pm 0.25$ ,  $R^{\text{A}} = 2.75 \pm 0.30 R_{\odot}$ ,  $R^{\text{B}} = 2.65 \pm 0.30 R_{\odot}$ ,  $M_{\text{V}}^{\text{A}} = 2^{\text{m}}99 \pm 0.30$ ,  $M_{\text{V}}^{\text{B}} = 3^{\text{m}}12 \pm 0.30$ ,  $M^{\text{A}} = 1.60 \pm 0.20 M_{\odot}$ ,  $M^{\text{B}} = 1.46 \pm 0.20 M_{\odot}$ ,  $L^{\text{A}} = 15.84 \pm 1.60 L_{\odot}$ , and  $L^{\text{B}} = 15.83 \pm 1.60 L_{\odot}$ , with G6 spectral types for both components.

Keywords: *binaries: visual—stars: fundamental parameters—stars: individual: HD 6009*