

УДК 524.38

## ФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ HIP 109951

© 2019 С. Г. Масда<sup>1,2\*</sup>, Х. А. Докобо<sup>3,4\*\*</sup>, А. М. Хуссейн<sup>5</sup>, М. К. Мардини<sup>6,7</sup>,  
Х. А. Аль-Амерьин<sup>3</sup>, П. П. Кампо<sup>3</sup>, А. Р. Хан<sup>8</sup>, Дж. М. Патан<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Отделение физики университета д-ра Бабасахиба Амбедкара Маратвада, Аурангабад, 431001 Индия

<sup>2</sup>Отделение физики университета Хадрамот, Мукалла, 50512 Йемен

<sup>3</sup>Астрономическая обсерватория Рамон Мария Аллер университета Сантьяго-де-Компостела, Сантьяго-де-Компостела, 15782 Испания

<sup>4</sup>Научный факультет Королевской академии наук Сарагосы, Сарагоса, 50009 Испания

<sup>5</sup>Отделение физики университета Аль аль-Байт, Мафрак, 25113 Иордания

<sup>6</sup>Ведущая лаборатория оптической астрономии национальных астрономических обсерваторий Китайской академии наук, Пекин, 100012 Китай

<sup>7</sup>Школа астрономии и наук о космосе университета Китайской академии наук, Пекин, 210093 Китай

<sup>8</sup>Отделение физики колледжа Маулана Азард, Аурангабад, 431001 Индия

Поступила в редакцию 17 февраля 2019 года; после доработки 15 сентября 2019 года;  
принята к публикации 15 сентября 2019 года

Представлены точные определения физических и геометрических параметров тройной системы HIP 109951 (WDS J22161-0705AB), состоящей из компонентов A, Ba и Bb. Двойственность компонента B была недавно подтверждена по вариациям лучевых скоростей. Системы изучались с помощью комплексного метода, разработанного Аль-Вардатом для исследования тесных визуально-двойных систем, использующего метод бланкетированных моделей атмосфер Куруца (Atlas 9) вкупе с аналитическими расчетами геометрических параметров (методом, разработанным Докобо) тройной системы. В результате на основе уточненного параллакса HIPPARCOS мы получили следующие величины:  $T_{\text{eff}}^A = 5836 \pm 80$  K,  $R^A = 1.090 \pm 0.039 R_{\odot}$ ,  $\lg g^A = 4.45 \pm 0.06$ ,  $M^A = 1.05 \pm 0.16 M_{\odot}$ ,  $T_{\text{eff}}^{\text{Ba}} = 5115 \pm 80$  K,  $R^{\text{Ba}} = 0.596 \pm 0.05 R_{\odot}$ ,  $\lg g^{\text{Ba}} = 4.60 \pm 0.07$ ,  $M^{\text{Ba}} = 0.83 \pm 0.16 M_{\odot}$ ,  $T_{\text{eff}}^{\text{Bb}} = 4500 \pm 80$  K,  $R^{\text{Bb}} = 0.490 \pm 0.06 R_{\odot}$ ,  $\lg g^{\text{Bb}} = 4.65 \pm 0.07$  и  $M^{\text{Bb}} = 0.67 \pm 0.16 M_{\odot}$ . Орбитальное решение дало полную массу  $M = 2.59 M_{\odot}$  по параллаксу Gaia и  $M = 2.15 M_{\odot}$  по уточненному параллаксу HIPPARCOS. Синтетические распределения энергии в спектре и синтетическая звездная фотометрия системы в целом и ее отдельных компонентов были сравнены с наблюдательными данными. Также приводятся положения компонентов системы на диаграмме ГР и эволюционные треки, обсуждаются формирование и эволюция системы.

Ключевые слова: двойные: тесные — двойные: визуальные — звезды: фундаментальные параметры — звезды: индивидуальные: HIP 109951

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование и анализ физических и геометрических параметров двойных систем крайне важны для проверки моделей образования и эволюции звезд. Одним из таких параметров является масса звезды, которая имеет первостепенное значение в астрофизике. Звездные массы в основном определяются либо путем точного вычисления орбиты двойных и тройных систем, либо по положению

той или иной звезды на диаграмме Герцшпрунга–Рессела (ГР). Однако оценка теоретических значений масс и возрастов двойных систем, в особенности звезд солнечного типа Главной последовательности, с точностью, сравнимой с точностью прямых методов, до сих пор является сложной задачей [1, 2]. Один из непрямых методов заключается в определении положения компонентов системы на диаграмме ГР. Он находится в прямой зависимости от выбора эволюционных треков [3, 4].

В настоящей работе мы представляем комплексное исследование физических и геомет-

\*E-mail: suhail.masda@gmail.com

\*\*E-mail: joseangel.docobo@usc.es

рических параметров системы HIP 109951. Эту систему формируют три компонента: A, Ba и Bb. Изначально визуальная пара AB была обнаружена космической миссией HIPPARCOS; впоследствии Токовинин [5], определив лучевые скорости системы, обнаружил двойственность компонента B. Согласно его работе, компоненты системы Ba и Bb имеют разный блеск, и данная пара является спектрально-двойной типа SB1. По этой причине возможная разность блеска компонентов равна или больше 1.5. Согласно недавно опубликованным данным, полученным космической миссией Gaia, параллакс системы равен  $\varpi_{\text{Gaia}} = 15^{\text{m}}1176 \pm 0^{\text{m}}5342$  [6], а уточненный параллакс HIPPARCOS равен  $\varpi_{\text{Hip}} = 16^{\text{m}}09 \pm 1^{\text{m}}07$  [7], что предполагает расстояние  $66.148 \pm 0.002$  и  $62.15 \pm 0.004$  пк соответственно. При помощи спекл-интерферометрии было измерено расстояние между основным компонентом A и парой Ba–Bb: оно составляет примерно  $0.4''$ , а также получено 17 измерений относительного расстояния от первого астрометрического измерения HIPPARCOS в 1991.25 (каталог HIPPARCOS [8]).

Система была исследована комплексным методом Аль-Вардата для анализа тесных визуально-двойных систем (CVBS) [9–11], в котором используется разность величин двух компонентов для построения синтетического распределения энергии в спектре (SED) для каждого компонента и дальнейшего их суммирования для итеративного сравнения с полным наблюдаемым SED и фотометрией. Такой подход был совмещен с аналитическим методом Докобо [12–14] для получения полного набора физических и геометрических параметров системы. Кроме того комплексный метод Аль-Вардата был успешно применен для оценки параметров нескольких звезд солнечного типа и двойных систем субгигантов, таких как HIP 70973, HIP 72479, HIP 11352, HIP 11253, HD 25811, HD 375, Gliese 150.2, Gliese 762.1, HD 6009, FIN 350, COU 1511, HIP 105947, HIP 14075 и HIP 14230 [11, 15–24].

Первая орбита системы A–Ba, Bb с периодом 134 года и большой полуосью  $0''.567$  была вычислена Хоршем и др. [25] с помощью программы из работы [26], что с учетом старого значения параллакса HIPPARCOS  $15^{\text{m}}04 \pm 1^{\text{m}}52$  [8] дало сумму масс  $2.98 \pm 0.91 M_{\odot}$ . Затем орбита была модифицирована в статьях [27] и [28] совершенно другим методом. Оценки суммы масс авторов этих работ составляли  $2.18 \pm 0.44 M_{\odot}$  и  $3.35 \pm 6.52 M_{\odot}$  с периодами 80.57 и 44 лет соответственно. Последняя опубликованная орбита системы была рассчитана Токовининым [5] по лучевым скоростям, измеренным с высоким разрешением, и по спекл-измерениям. Он получил сумму масс  $2.58 M_{\odot}$ ,

**Таблица 1.** Сведения о системе HIP 109951 из базы данных SIMBAD

| Свойство          | HIP 109951<br>HD 211276                       | Источник данных        |
|-------------------|---|------------------------|
| $\alpha_{2000}^1$ | $22^{\text{h}}16^{\text{m}}06^{\text{s}}.565$ | SIMBAD                 |
| $\delta_{2000}^2$ | $-07^{\circ}05'26''.62$                       | —                      |
| SAO               | 145984  | —                      |
| Sp. Тип.          | G5  | —                      |
| $E(B - V)$        | $0.061 \pm 0.002$                             | NASA/IPAC <sup>3</sup> |
| $E(B - V)$        | $0.052 \pm 0.002$                             | NASA/IPAC <sup>4</sup> |
| $A_V$             | $0.19 \pm 0.002$                              | NASA/IPAC <sup>3</sup> |
| $A_V$             | $0.16 \pm 0.002$                              | NASA/IPAC <sup>4</sup> |

Notes: <sup>1</sup> Прямое восхождение. <sup>3</sup> [31].

<sup>2</sup> Склонение. <sup>4</sup> [32].

используя визуальную орбиту с периодом 50.49 лет и параллакс Gaia [6].

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Полное наблюдаемое SED для системы HIP 109951 было взято из работы [29] (рис. 1). Оно было получено с помощью решетки с низким разрешением ( $325/4^{\circ}$  штрих/мм, обратная дисперсия  $5.97 \text{ \AA}/\text{пиксел}$ ) на спектрографе UAGS на телескопе Zeiss-1000 в CAO РАН и охватывает диапазон длин волн от  $3700 \text{ \AA}$  до  $8000 \text{ \AA}$ . SED дает важную информацию о свойствах системы и будет использовано как опорное при сравнении с синтетическими спектрами.

Сведения о системе HIP 109951 из базы данных SIMBAD<sup>1</sup> представлены в таблице 1. Таблица 2 содержит фотометрические данные системы из NASA/IPAC, каталогов HIPPARCOS, Tycho [8] и Strömgren [33]. Разность блеска ( $\Delta m$ ) двух главных компонентов визуальной системы, фильтры, используемые в наблюдениях, а также ссылки для каждого измерения из Четвертого каталога интерферометрических измерений двойных звезд (INT4<sup>2</sup>, [35]) приведены в таблице 3.

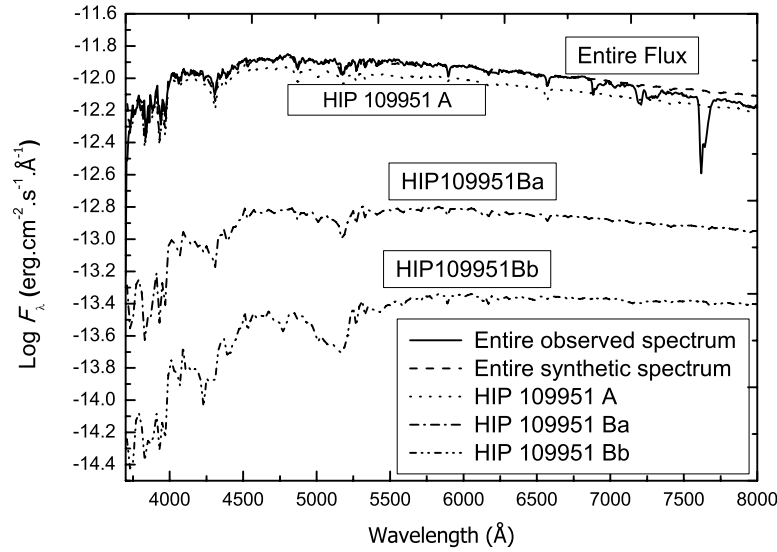
## 3. АНАЛИЗ

### 3.1. Орбита

Для того чтобы получить орбиту системы, мы воспользовались аналитическим методом Доко-

<sup>1</sup><http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>

<sup>2</sup><http://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/wds/int4>



**Рис. 1.** Наблюдаемое спектральное распределение энергии (SED) тесной тройной системы HIP 109951 в сравнении с синтетическим SED по бланкетированным моделям Куруча [30]. Наблюдаемое SED показано черной сплошной линией.

**Таблица 2.** Фотометрические данные системы HIP 109951 из каталогов HIPPARCOS и Tycho, включая величины  $B_T$  и  $V_T$  из Tycho, фотометрию Стремгрена, а также тригонометрические параллаксы HIPPARCOS и Gaia

| Свойство              | HIP 109951<br>HD 211276 | Источник данных |
|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| $V_J(Hip)$            | 8.72                    | [8]             |
| $B_J$                 | $9.43 \pm 0.03$         | [34]            |
| $(V - I)_J$           | $0.76 \pm 0.00$         | [8]             |
| $(B - V)_J$           | $0.71 \pm 0.002$        | [8]             |
| $B_T$                 | $9.58 \pm 0.03$         | [34]            |
| $V_T$                 | $8.82 \pm 0.02$         | [34]            |
| $(u - v)_S$           | $0.96 \pm 0.003$        | [33]            |
| $(v - b)_S$           | $0.68 \pm 0.003$        | [33]            |
| $(b - y)_S$           | $0.44 \pm 0.003$        | [33]            |
| $\varpi_{Hip}$ (mas)  | $15.04 \pm 1.52$        | [8]             |
| $\varpi_{Hip}$ (mas)  | $16.09 \pm 1.07$        | [7]             |
| $\varpi_{Gaia}$ (mas) | $15.12 \pm 0.534$       | [6]             |

соответствующих видимых орбит. Выбор решения может быть основан на разных критериях, хотя наиболее часто используемая процедура состоит в вычислении среднеквадратических невязок позиционных углов и расстояний. Разумеется, учитываются веса наблюдений.

В таблицах 4 и 5 представлена информация о невязках  $\theta$  и  $\rho$ , полученных вместе с новой вычисленной орбитой, наилучшие орбитальные элементы и среднеквадратические отклонения соответственно. Видимая орбита визуальной двойной A–Ba, Bb показана на рис. 2.

### 3.2. Массы

В зависимости от вычисленных орбитальных элементов, периода  $P$  (в годах) и большой полуоси  $a$  (в угловых секундах), в таблице 5 мы можем использовать последние измерения параллакса Gaia и исправленный параллакс HIPPARCOS для вычисления полной массы ( $M_{Tot}$ ) системы (в солнечных массах) по третьему закону Кеплера следующим образом:

$$M_{Tot} = \frac{a^3}{\varpi^3 P^2} M_{\odot}, \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_M}{M} = \sqrt{9\left(\frac{\sigma_{\varpi}}{\varpi}\right)^2 + 9\left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^2 + 4\left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2}. \quad (2)$$

бо [12–14]. Хорошо известно, что этот метод основан на выборе трех базовых точек, через которые строится семейство относительных орбит и

В результате получаем соответственно  $2.59 \pm 0.40 M_{\odot}$  и  $2.15 \pm 0.35 M_{\odot}$ ; далее эти значения будут сравниваться с массами, полученными

**Таблица 3.** Разность величин компонентов системы HIP 109951 и имеющиеся ошибки, а также фильтры, в которых проводились наблюдения

| Вектор сравнения | $\Delta m$ , mag | $\sigma_{\Delta m}$ | Фильтр ( $\lambda/\Delta\lambda$ ), nm | Ссылка |
|------------------|------------------|---------------------|--|--------|
| A–B              | 1.83             | 0.87                | $V_{\text{Hip}} : 550/40$              | [8]    |
|                  | 1.92             | 0.04                | 545/30                                 | [36]   |
|                  | 1.87             | 0.04                | 545/30                                 | [37]   |
|                  | 1.70             | 0.13                | 648/41                                 | [38]   |
|                  | 1.88             | 0.08                | 545/30                                 | [39]   |
|                  | 1.53             | *                   | 754/44                                 | [40]   |
|                  | 1.88             | 0.03                | 545/30                                 | [41]   |
|                  | 1.81             | *                   | 698/39                                 | [40]   |
|                  | 1.70             | *                   | 698/39                                 | [40]   |
|                  | 1.44             | *                   | 754/44                                 | [25]   |
|                  | 1.94             | *                   | 550/40                                 | [25]   |
|                  | 1.86             | 0.10                | 550/40                                 | [42]   |
|                  | 1.76             | 0.10                | 550/40                                 | [42]   |
|                  | 2.00             | *                   | 551/22                                 | [43]   |
| Ba–Bb            | $\geq 1.50$      |                     |  |        |

\* Ошибки не приводятся в INT4.

по положениям компонентов на диаграмме ГР, определенным по физическим параметрам, вычисленным комплексным методом Аль-Вардата.

### 3.3. Моделирование атмосфер

Начнем с оценки физических свойств, которые включают в себя два параметра: разность блеска компонентов и полную визуальную величину  $m_v$ . Первый параметр взят из спеклинтерферометрических наблюдений, второй — из фотометрических данных [8].

Сначала мы анализировали систему как двойную (A–B), следуя методу Аль-Вардата и используя  $\Delta m_{A,B} = 1.88$  как среднее значение всех измерений  $\Delta m$ , соответствующих фильтрам 545–551 нм в полосе  $V$  (см. таблицу 3). Так как система Ba, Bb является SB1, разумно принять  $\Delta m_{Ba,Bb} \geq 1.5$ . Возьмем за настоящее значение разности блеска между компонентами системы Ba–Bb  $1''.5$ . Суммируя каждую из разностей блеска с полной визуальной величиной  $m_v$  в фильтре  $V$  системы Джонсона (таблица 2), а затем учтя параллакс, мы

**Таблица 4.** Позиционные измерения и невязки. В колонках (1), (2) и (3) приведены эпохи и измерения относительных положений, взятые из INT4. Невязки,  $\Delta\theta$  и  $\Delta\rho$ , полученные вместе с орбитой, представленной в данной работе, приведены в колонках (4) и (5). Колонка (6) содержит ссылки. В последней строке таблицы мы указываем среднеквадратические отклонения для  $\theta$  и  $\rho$

| Эпоха     | $\theta$ , deg | $\rho$ , arcsec | $\Delta\theta$ , deg | $\Delta\rho$ , arcsec | Ссылка |
|-----------|----------------|-----------------|----------------------|-----------------------|--------|
| (1)       | (2)            | (3)             | (4)                  | (5)                   | (6)    |
| 1991.25   | 333.0          | 0.180           | 0.0                  | 0.024                 | [8]    |
| 1999.8152 | 70.50          | 0.297           | 0.8                  | 0.002                 | [37]   |
| 2000.7672 | 73.5           | 0.309           | –1.4                 | –0.001                | [44]   |
| 2000.8726 | 76.0           | 0.311           | 0.6                  | 0.000                 | [39]   |
| 2003.6368 | 87.4           | 0.344           | –0.6                 | –0.002                | [40]   |
| 2004.8152 | 92.5           | 0.357           | –0.1                 | –0.002                | [41]   |
| 2006.5173 | 98.6           | 0.374           | –0.3                 | 0.000                 | [40]   |
| 2006.5174 | 97.7           | 0.366           | –1.2                 | –0.008                | [40]   |
| 2007.8171 | 103.7          | 0.383           | 0.3                  | 0.000                 | [41]   |
| 2007.8199 | 103.9          | 0.391           | 0.5                  | 0.008                 | [41]   |
| 2008.4723 | 105.7          | 0.390           | 0.2                  | 0.003                 | [42]   |
| 2008.7018 | 107.1          | 0.390           | 0.8                  | 0.002                 | [42]   |
| 2008.7670 | 105.8          | 0.389           | –0.7                 | 0.000                 | [43]   |
| 2008.7670 | 105.7          | 0.390           | –0.8                 | 0.001                 | [43]   |
| 2009.7553 | 108.6          | 0.399           | –1.1                 | 0.005                 | [45]   |
| 2013.5537 | 121.2          | 0.407           | –0.2                 | 0.004                 | [28]   |
| 2014.7629 | 125.0          | 0.403           | –0.1                 | 0.000                 | [46]   |
| 2016.961  | 131.9          | 0.397           | 0.1                  | –0.002                | [5]    |
| RMS       |                |                 | 0.686                | 0.004                 |        |

смогли вычислить видимую и абсолютную величины отдельных компонентов ( $m_v^*$  и  $M_V^*$ ), пользуясь простыми соотношениями:

$$m_v^A = m_v + 2.5 \lg(1 + 10^{-0.4\Delta m}), \quad (3)$$

$$m_v^B = m_v^A + \Delta m, \quad (4)$$

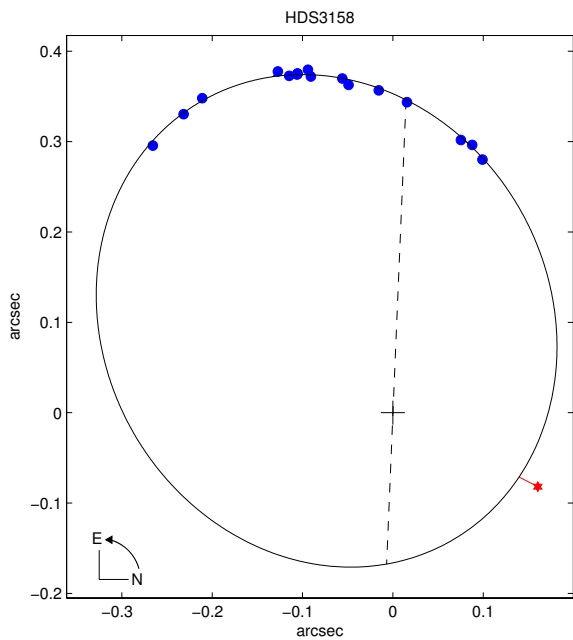
и

$$M_V - m_v = 5 - 5 \lg d - A_v, \quad (5)$$

что дает  $m_v^A = 8^m 90 \pm 0.05$  и  $m_v^B = 10^m 78$  для главного и вторичного компонентов системы. Здесь

**Таблица 5.** Орбиты, полные массы и ошибки, опубликованные для системы HIP 109951, в сравнении с орбитальным решением, полученным в данной работе

| Параметры              | [25]               | [27]                 | [28]              | [5]                | Данная работа        |
|------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| $P$ , yr               | $134 \pm 1.4$      | $80.574 \pm 1.145$   | $44 \pm 24$       | $50.49 \pm 4.32$   | $50.090 \pm 2.000$   |
| $T_0$ , yr             | $2128.0 \pm 1.3$   | $1991.763 \pm 1.339$ | $1989.0 \pm 5.30$ | $1989.88 \pm 0.16$ | $2040.038 \pm 2.000$ |
| $e$                    | $0.580 \pm 0.0014$ | $0.450 \pm 0.008$    | $0.55 \pm 0.59$   | $0.451 \pm 0.044$  | $0.449 \pm 0.008$    |
| $a$ , arcs             | $0.567 \pm 0.007$  | $0.389 \pm 0.0042$   | $0.30 \pm 0.16$   | $0.2834 \pm 0.020$ | $0.282 \pm 0.008$    |
| $i$ , deg              | $45.3 \pm 2.2$     | $36.0 \pm 0.50$      | $36.0 \pm 101.0$  | $17.7 \pm 13.6$    | $15.1 \pm 5.5$       |
| $\Omega$ , deg         | $248.7 \pm 1.2$    | $71.8 \pm 0.80$      | $160.0 \pm 62$    | $262.0 \pm 3.0$    | $267.6 \pm 10.0$     |
| $\omega$ , deg         | $119.5 \pm 3.6$    | $273.9 \pm 1.2$      | $126.0 \pm 104$   | $45.2 \pm 9.6$     | $39.2 \pm 15.0$      |
| rms ( $\theta$ ), deg  | 0.780              | 1.034                | —                 | 0.711              | 0.686                |
| rms ( $\rho$ ), arcsec | 0.009              | 0.006                | —                 | 0.005              | 0.004                |



**Рис. 2.** Видимая орбита подсистемы Ba, Bb вокруг главного компонента A. Относительная орбита была вычислена по методу Докобо с данными из INT4 [35]. Как обычно, исходная точка представляет собой положение главного компонента, а штрихами отмечена линия узлов. Красной звездочкой обозначено первое измерение HIPPARCOS.

мы приняли полную визуальную величину системы Ba–Bb равной видимой величине компонента B, так что  $m_{vBa, Bb} = 10^m 78$ . Видимые величины Ba–Bb следующие:  $m_v^{Ba} = 11^m 02$  и  $m_v^{Bb} = 12^m 52$  для главного и вторичного компонентов двойной подсистемы соответственно и  $M_V^A = 4^m 61 \pm 0.09$  и  $M_V^{Ba} = 6^m 73 \pm 0.07$ ,  $M_V^{Bb} = 8^m 23 \pm 0.07$  для глав-

ного и вторичного компонентов тройной системы соответственно. Мы использовали недавно опубликованное значение межзвездного поглощения для HIP 109951  $A_v = 0.19$  [31], а расстояния до системы было оценено по формуле  $d = 1/\varpi$  где величина  $\varpi$  измерялась в угловых секундах, а ошибка расстояния оценивалась как  $\sigma_d = \sigma_\varpi/\varpi^2$ .

Что касается ошибок в уравнениях (3), (4), и (5), они вычислялись по следующим формулам соответственно:

$$\sigma_{m_v^A} = \pm \sqrt{\sigma_{m_v}^2 + \left( \frac{10^{-0.4\Delta m}}{1 + 10^{-0.4\Delta m}} \right)^2 \sigma_{\Delta m}^2}, \quad (6)$$

$$\sigma_{m_v^B} = \pm \sqrt{\sigma_{m_v^A}^2 + \sigma_{\Delta m}^2}, \quad (7)$$

и

$$\sigma_{M_V^*} = \pm \sqrt{\sigma_{m_v^*}^2 + \left( \frac{5 \lg e}{\varpi_{\text{Gaia}}} \right)^2 \sigma_{\varpi_{\text{Gaia}}}^2}. \quad (8)$$

Так как значение ошибки визуальной величины ( $\sigma_{m_v}$ ) было очень малым и не приводилось в фотометрических данных в таблице 2, в уравнении (6) им можно пренебречь.

Начиная с оценок абсолютных величин отдельных компонентов системы и пользуясь соотношениями абсолютная величина–эффективная температура  $M_V - T_{\text{eff}}$ , масса–светимость  $M - L$ , спектральный класс–абсолютная величина  $S_P - M_V$  [47, 48], а также теоретическими соотношениями для звезд Главной последовательности:

$$\lg(R/R_\odot) = 0.5 \lg(L/L_\odot) - 2 \lg(T_{\text{eff}}/T_\odot), \quad (9)$$

$$\lg g = \lg(M/M_\odot) - 2 \lg(R/R_\odot) + 4.43, \quad (10)$$

получаем следующие предварительные звездные параметры:  $T_{\text{eff}}^A = 5840$  K,  $\lg g^A = 4.38$ ,  $R^A = 1.16 R_\odot$

для первичного компонента системы,  $T_{\text{eff}}^{\text{Ba}} = 5015$  К,  $\lg g^{\text{Ba}} = 4.52$ ,  $R^{\text{Ba}} = 0.71 R_{\odot}$  для первичного компонента двойной подсистемы и  $T_{\text{eff}}^{\text{Bb}} = 4340$  К,  $\lg g^{\text{Bb}} = 4.64$ ,  $R^{\text{Bb}} = 0.59 R_{\odot}$  для вторичного компонента двойной подсистемы. В расчетах использовалась эффективная температура Солнца 5777 К и его болометрическая абсолютная величина  $4^{\text{m}}75$ .

Для анализа и оценки физических и геометрических параметров HIP 109951 мы применяли комплексный метод Аль-Вардата, который использует сетку моделей с бланкетированными линиями Кучура Atlas 9 [30] для построения отдельных SED и специальную процедуру для вычисления полного синтетического SED для сравнения его с наблюдательным итеративным способом и получения наилучшего соответствия между ними.

Полное синтетическое SED системы, связанное с потоком энергии от компонентов на расстоянии  $d$  (пк) от Земли, согласно следующей формуле, составляет:

$$F_{\lambda}^{\text{A-B}} d^2 = H_{\lambda}^{\text{A}} R_{\text{A}}^2 + H_{\lambda}^{\text{B}} R_{\text{B}}^2, \quad (11)$$

где

$$H_{\lambda}^{\text{B}} R_{\text{B}}^2 = H_{\lambda}^{\text{Ba}} R_{\text{Ba}}^2 + H_{\lambda}^{\text{Bb}} R_{\text{Bb}}^2. \quad (12)$$

В результате уравнение (11) можно переписать как

$$F_{\lambda} = (1/d)^2 (H_{\lambda}^{\text{A}} R_{\text{A}}^2 + H_{\lambda}^{\text{Ba}} R_{\text{Ba}}^2 + H_{\lambda}^{\text{Bb}} R_{\text{Bb}}^2), \quad (13)$$

где  $R_{\text{A}}$ ,  $R_{\text{Ba}}$  и  $R_{\text{Bb}}$  — радиусы компонентов в солнечных единицах,  $H_{\lambda}^{\text{A}}$ ,  $H_{\lambda}^{\text{Ba}}$  и  $H_{\lambda}^{\text{Bb}}$  — потоки на поверхности каждого звездного компонента, а  $F_{\lambda}$  — поток для полного SED системы на поверхности Земли в единицах эрг  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{Å}^{-1}$ .

Мы провели несколько тестов для вычисленных физических и геометрических параметров. Сначала мы сравнили полное синтетическое SED системы с наблюдаемым спектром, затем сравнили полные синтетические показатели цвета и величины системы, а именно  $(B - V)_J$ ,  $V_J$  и разность блеска  $\Delta m$  с полной наблюдаемой фотометрией системы. Проведя итеративное сравнение наблюдаемых спектров на основе параллакса Gaia [6] с сеткой синтетических спектров, рассчитанных путем варьирования различных параметров, мы достигли наилучшего соответствия между ними при следующих значениях (рис. 1):

$T_{\text{eff}}^{\text{A}} = 5836 \pm 80$  К,  $T_{\text{eff}}^{\text{Ba}} = 5115 \pm 80$  К,  
 $T_{\text{eff}}^{\text{Bb}} = 4500 \pm 80$  К,  $\lg g_{\text{A}} = 4.45 \pm 0.05$ ,  
 $\lg g_{\text{Ba}} = 4.60 \pm 0.06$ ,  $\lg g_{\text{Bb}} = 4.65 \pm 0.06$ ,  
 $R_{\text{A}} = 1.159 \pm 0.039 R_{\odot}$ ,  $R_{\text{Ba}} = 0.634 \pm 0.05 R_{\odot}$  и  
 $R_{\text{Bb}} = 0.521 \pm 0.06 R_{\odot}$ . С другой стороны, мы получили наилучшее соответствие между синтетическим и наблюдаемым спектрами по уточненному параллаксу HIPPARCOS [7], пользуясь

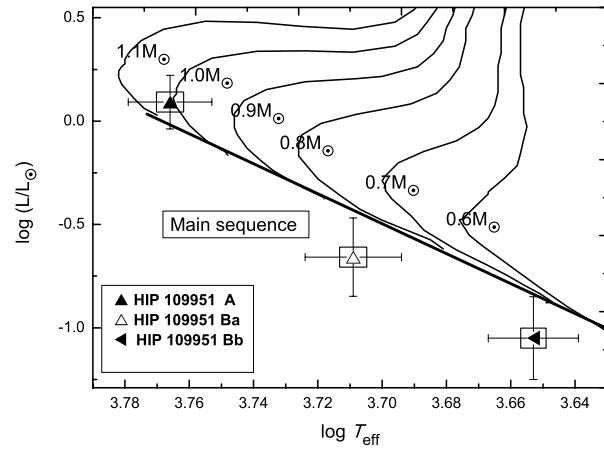


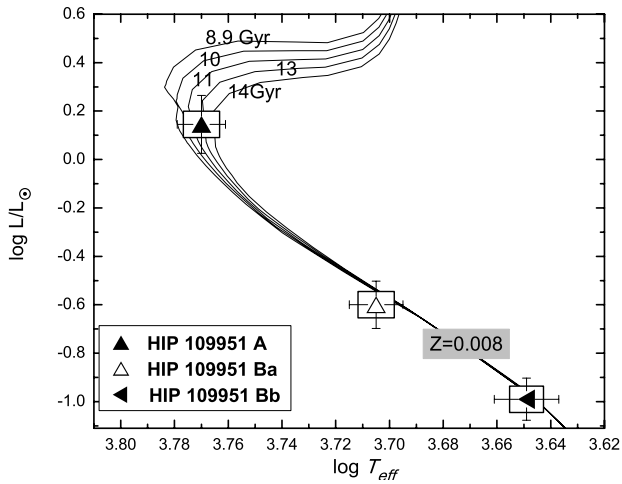
Рис. 3. Эволюционные треки компонентов HIP 109951 на диаграмме ГР для масс (0.6, 0.8, ..., 1.1  $M_{\odot}$ ), взятые из работы [4].

теми же звездными параметрами, за исключением радиусов трех компонентов, которые были следующими (рис. 1):  $R_{\text{A}} = 1.090 \pm 0.039 R_{\odot}$ ,  $R_{\text{Ba}} = 0.596 \pm 0.05 R_{\odot}$ , и  $R_{\text{Bb}} = 0.490 \pm 0.06 R_{\odot}$ .

Для тесной визуально-тройной системы существуют два решения: одно с параллаксом Gaia, другое с уточненным параллаксом HIPPARCOS. Однако вследствие смешанной функции распределения мощности двух компонентов, параллаксы Gaia для ярких звезд (особенно для тесных двойных) могут быть существенно искажены систематическими ошибками; высокая точность параллакса Gaia не является доказательством надежности этого значения для данной звезды [49]. Поэтому решение с уточненным параллаксом HIPPARCOS [7] лучше описывает физические и геометрические параметры тройной системы HIP 109951 с учетом ошибок наблюдаемого спектра и величин.

Используя упомянутые параметры тройной системы, получаем звездные светимости компонентов:  $L_{\text{A}} = 1.24 \pm 0.091 L_{\odot}$ ,  $L_{\text{Ba}} = 0.22 \pm 0.09 L_{\odot}$  и  $L_{\text{Bb}} = 0.09 \pm 0.05 L_{\odot}$ . Таким образом, отдельные болометрические величины составляют:  $M_{\text{bol}}^{\text{A}} = 4^{\text{m}}52 \pm 0^{\text{m}}08$ ,  $M_{\text{bol}}^{\text{Ba}} = 6^{\text{m}}39 \pm 0^{\text{m}}08$  и  $M_{\text{bol}}^{\text{Bb}} = 7^{\text{m}}36 \pm 0^{\text{m}}05$ .

На основании вычисленных физических и геометрических параметров, а именно по эффективным температурам ( $T_{\text{eff}}$ ) и светимостям звезд ( $L$ ), мы оценили массы, используя метод теоретических эволюционных треков с положениями компонентов на диаграмме ГР (рис. 3) следующим образом:  $M^{\text{A}} = 1.05 \pm 0.16 M_{\odot}$ ,  $M^{\text{Ba}} = 0.83 \pm 0.09 M_{\odot}$  и  $M^{\text{Bb}} = 0.67 \pm 0.04 M_{\odot}$ . Эти результаты позволили нам определить новые спектральные классы для тройной системы, а именно:  $Sp^{\text{A}} \approx G1.5$ ,  $Sp^{\text{Ba}} \approx K1.5$  и  $Sp^{\text{Bb}} \approx K7$ .



**Рис. 4.** Изохроны компонентов HIP 109951 на диаграмме ГР для диапазонов малых и средних масс: от  $0.15$  до  $7 M_{\odot}$  (и для звезд с составом  $[Z = 0.008, Y = 0.25]$  разных металличностей). Изохроны взяты из работы [3].

Полная масса системы была оценена методом Аль-Вардата как  $2.55 M_{\odot}$ , что совпадает в значительной степени со данными, получаемыми аналитическим методом Докобо по параллаксу Gaia —  $2.59 M_{\odot}$ .

Для оценки металличности и возрастов HIP 109951 нужно использовать синтетические треки изохран как функции металличности и возраста, приведенные в статье [50], когда известны  $T_{\text{eff}}$  и светимость двойной системы. Исходный химический состав всех фаз  $[Z = 0.0004, Y = 0.23]$ ,  $[Z = 0.001, Y = 0.23]$ ,  $[Z = 0.004, Y = 0.24]$ ,  $[Z = 0.008, Y = 0.25]$ ,  $[Z = 0.019, Y = 0.273]$  (солнечный состав) и  $[Z = 0.03, Y = 0.30]$  от звезды нулевого возраста Главной последовательности до первой фазы горения углерода. Видно, что металличность звезды зависит от положений компонентов системы на синтетических треках изохран. В результате металличность для HIP 109951 составляет  $Z = 0.008$ , как показано на рис. 4, а гелий в системе составляет  $Y = 0.25$ , тогда как возраст системы на синтетических треках изохран как функция возраста находится между 8.9 и 13 Gyr.

### 3.3.1. Синтетическая фотометрия

Для оценки параметров звезды с более высокой точностью вместе с показателями цвета была использована синтетическая фотометрия. Это количественный анализ для синтетического SED двойной системы, который применяется для модификации звездных параметров таким образом, чтобы предсказанные величины совпадали с наблюдаемыми. Он в основном базируется на следующем уравнении [51, 52], которое является ключевым

для вычисления полной и отдельных синтетических величин и показателей цвета звезд:

$$m_p[F_{\lambda,s}(\lambda)] = -2.5 \lg \frac{\int P_p(\lambda) F_{\lambda,s}(\lambda) \lambda d\lambda}{\int P_p(\lambda) F_{\lambda,r}(\lambda) \lambda d\lambda} + ZP_p, \quad (14)$$

где  $m_p$  — синтетическая величина в полосе  $p$ ,  $P_p(\lambda)$  — безразмерная функция чувствительности полосы  $p$ ,  $F_{\lambda,s}(\lambda)$  — синтетическое SED объекта, а  $F_{\lambda,r}(\lambda)$  — SED звезды сравнения. Здесь нулевые точки ( $ZP_p$ ) взяты из исследования [52].

Результат применения уравнения (14) к оцененному синтетическому SED должен совпадать с наблюдаемыми значениями из таблицы 2; в противном случае следует применить новый набор параметров.

Полученные с помощью уравнения (14) величины и показатели цвета в трех разных фотометрических системах: Джонсон–Козинс:  $U, B, V, R, U - B, B - V, V - R$ ; Стремгрен:  $u, v, b, y, u - v, v - b, b - y$ ; и Тихо:  $B_T, V_T, B_T - V_T$  компонента А и компонента В полной системы А–В приведены в таблице 6, а компонентов Ва и Вb подсистемы Ва–Вb полной системы В — представлены в таблице 7.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 4 показаны невязки  $\Delta\theta$  и  $\Delta\rho$  среднеквадратичного значения системы. Наши орбитальные параметры визуальной системы близки к параметрам из работы [5], но среднеквадратичное значение нашей орбиты было улучшено по  $\theta$  и  $\rho$  по сравнению с предыдущим. Более того, невязки лучевых скоростей, полученные с этими элементами, и параллакс Gaia имеют тот же порядок, что получил Токовинин [5] тем же методом, т.е. используя элементы визуальной орбиты Токовинина.

В таблице 5 собраны результаты точного орбитального решения тройной системы HIP 109951, полученные при использовании аналитического метода Докобо (показаны графически на рис. 2). Токовинин вычислил орбитальные параметры основной двойной системы А–В и двойной подсистемы Ва–Вb. В таблице 5 показаны орбитальные параметры основной двойной системы. Двойная подсистема имеет орбитальный период приблизительно 111 дней [5].

Используя данные спекл-интерферометрических измерений разности блеска, полных наблюдаемых SED из спектрофотометрии, а также моделирование атмосфер по комплексному методу Аль-Вардата, мы получили точное определение полного набора физических и геометрических параметров основной системы. Эти параметры представлены в таблице 8.

**Таблица 6.** Величины и показатели цвета составного синтетического спектра и отдельного компонента А и полной подсистемы В HIP 109951

| Система             | Фильтр                               | Полный синт.<br>$\sigma = \pm 0.03$ | HIP 109951 |       |
|---------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------|-------|
|                     |                                      |                                     | A          | B     |
| Johnson–<br>Cousins | <i>U</i>                             | 9.67                                | 9.76       | 12.43 |
|                     | <i>B</i>                             | 9.43                                | 9.57       | 11.74 |
|                     | <i>V</i>                             | 8.72                                | 8.90       | 10.78 |
|                     | <i>R</i>                             | 8.33                                | 8.54       | 10.24 |
|                     | <i>U – B</i>                         | 0.24                                | 0.19       | 0.69  |
|                     | <i>B – V</i>                         | 0.71                                | 0.67       | 0.96  |
|                     | <i>V – R</i>                         | 0.39                                | 0.36       | 0.54  |
| Strömgren           | <i>u</i>                             | 10.82                               | 10.91      | 13.63 |
|                     | <i>v</i>                             | 9.81                                | 9.93       | 12.29 |
|                     | <i>b</i>                             | 9.11                                | 9.27       | 11.28 |
|                     | <i>y</i>                             | 8.69                                | 8.87       | 10.72 |
|                     | <i>u – v</i>                         | 1.01                                | 0.98       | 1.34  |
|                     | <i>v – b</i>                         | 0.70                                | 0.66       | 1.01  |
|                     | <i>b – y</i>                         | 0.43                                | 0.41       | 0.55  |
| Tycho               | <i>B<sub>T</sub></i>                 | 9.61                                | 9.74       | 12.00 |
|                     | <i>V<sub>T</sub></i>                 | 8.80                                | 8.97       | 10.89 |
|                     | <i>B<sub>T</sub> – V<sub>T</sub></i> | 0.81                                | 0.77       | 1.11  |

**Таблица 7.** Величины и показатели цвета составного синтетического спектра и отдельного компонента Ва–Вb и полной подсистемы В HIP 109951

| Система             | Фильтр                               | Полный синт. В<br>$\sigma = \pm 0.03$ | HIP 109951 |       |
|---------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------|-------|
|                     |                                      |                                       | Ba         | Bb    |
| Johnson–<br>Cousins | <i>U</i>                             | 12.41                                 | 12.54      | 14.78 |
|                     | <i>B</i>                             | 11.74                                 | 11.93      | 13.71 |
|                     | <i>V</i>                             | 10.78                                 | 11.02      | 12.52 |
|                     | <i>R</i>                             | 10.23                                 | 10.52      | 11.80 |
|                     | <i>U – B</i>                         | 0.67                                  | 0.60       | 1.07  |
|                     | <i>B – V</i>                         | 0.96                                  | 0.91       | 1.19  |
|                     | <i>V – R</i>                         | 0.55                                  | 0.50       | 0.72  |
| Strömgren           | <i>u</i>                             | 13.60                                 | 13.71      | 16.13 |
|                     | <i>v</i>                             | 12.29                                 | 12.45      | 14.42 |
|                     | <i>b</i>                             | 11.28                                 | 11.50      | 13.15 |
|                     | <i>y</i>                             | 10.72                                 | 10.97      | 12.45 |
|                     | <i>u – v</i>                         | 1.32                                  | 1.26       | 1.71  |
|                     | <i>v – b</i>                         | 1.00                                  | 0.95       | 1.27  |
|                     | <i>b – y</i>                         | 0.56                                  | 0.53       | 0.70  |
| Tycho               | <i>B<sub>T</sub></i>                 | 12.00                                 | 12.19      | 14.02 |
|                     | <i>V<sub>T</sub></i>                 | 10.89                                 | 11.12      | 12.67 |
|                     | <i>B<sub>T</sub> – V<sub>T</sub></i> | 1.11                                  | 1.06       | 1.35  |

На рис. 1 показано наилучшее соответствие наблюдаемого и синтетического спектров по сетке моделей Куруча с солнечной металличностью для трех компонентов системы (А, Ва и Вb).

В таблице 9 приведены итоговые вычисленные величины и показатели цвета в трех разных фотометрических системах: Джонсона–Козинса: *U*, *B*, *V*, *R*, *U – B*, *B – V*, *V – R*; Стрёмгрена: *u*, *v*, *b*, *y*, *u – v*, *v – b*, *b – y*; и Тихо: *B<sub>T</sub>*, *V<sub>T</sub>*, *B<sub>T</sub> – V<sub>T</sub>* для полной системы и отдельных компонентов тройной системы. Синтетические величины отдельных компонентов ( $m_v^A$ ,  $m_v^{Ba}$  и  $m_v^{Bb}$ ) оказались схожими с наблюдаемыми.

Более того, разность блеска двойной подсистемы, полученная по синтетической фотометрии в таблице 9, схожа с наблюдаемой.

В таблице 10 приведены итоговые результаты. В ней дано сравнение синтетических величин и показателей цвета с наблюдаемыми. Конечно, выводы и сравнение привели к ясному и убедительному указанию на достоверность оцененных физических

и геометрических параметров отдельных компонентов тройной системы, приведенных в таблице 8.

На рисунке 3 показаны идеальные положения отдельных компонентов тройной системы HIP 109951 на теоретических эволюционных треках [4] на диаграмме ГР. Это указывает на то, что компонент А принадлежит к звездам Главной последовательности, тогда как компоненты двойной подсистемы находятся немного ниже Главной последовательности.

Мы вычислили полную массу системы HIP 109951 двумя независимыми методами: комплексным методом Аль-Вардата и аналитическим методом Докобо. Первый метод дал сумму масс  $2.55 \pm 0.38 M_{\odot}$ , распределенную следующим образом:  $M_A = 1.05 M_{\odot}$ ,  $M_{Ba} = 0.83 M_{\odot}$  и  $M_{Bb} = 0.67 M_{\odot}$ , тогда как второй метод дал сумму масс  $2.15 \pm 0.35 M_{\odot}$  при использовании уточненного параллакса HIPPARCOS и сумму масс  $2.59 \pm 0.40 M_{\odot}$  с параллаксом Gaia. Хорошее соответствие сумм масс в двух методах привело



**Таблица 8.** Физические параметры отдельных компонентов тройной системы HIP 109951

| Параметры                                    | Единицы измерения | HIP 109951       |                  |                 |
|--|-------------------|------------------|------------------|-----------------|
|  |                   | A                | Ba               | Bb              |
| $T_{\text{eff}} \pm \sigma_{T_{\text{eff}}}$ | K                 | $5836 \pm 80$    | $5115 \pm 80$    | $4500 \pm 80$   |
| $R \pm \sigma_R$                             | $R_{\odot}$       | $1.09 \pm 0.039$ | $0.596 \pm 0.05$ | $0.49 \pm 0.06$ |
| $\log g \pm \sigma_{\log g}$                 | cgs               | $4.45 \pm 0.06$  | $4.60 \pm 0.06$  | $4.65 \pm 0.06$ |
| $L \pm \sigma_L$                             | $L_{\odot}$       | $1.24 \pm 0.10$  | $0.22 \pm 0.09$  | $0.09 \pm 0.05$ |
| $M_{\text{bol}} \pm \sigma_{M_{\text{bol}}}$ | mag               | $4.52 \pm 0.08$  | $6.39 \pm 0.08$  | $7.36 \pm 0.09$ |
| $M^a \pm \sigma_M$                           | $M_{\odot}$       | $1.05 \pm 0.16$  | $0.83 \pm 0.16$  | $0.67 \pm 0.16$ |
| Sp. Type <sup>b</sup>                        |                   | G1.5             | K1.5             | K7              |

<sup>a</sup> См. эволюционные треки масс (0.7, 0.8, ..., 1.1  $M_{\odot}$ ) [4] (рис. 3).

<sup>b</sup> Спектральные классы из таблиц [47, 48] и соотношение  $M_V - S_P$ .

**Таблица 9.** Величины и показатели цвета составного синтетического спектра и отдельных компонентов HIP 109951

| Система         | Фильтр      | Полный синт.<br>$\sigma = \pm 0.03$ | HIP 109951 |       |       |
|-----------------|-------------|-------------------------------------|------------|-------|-------|
|                 |             |                                     | A          | Ba    | Bb    |
| Johnson-Cousins | $U$         | 9.67                                | 9.76       | 12.54 | 14.78 |
|                 | $B$         | 9.43                                | 9.57       | 11.93 | 13.71 |
|                 | $V$         | 8.72                                | 8.90       | 11.02 | 12.52 |
|                 | $R$         | 8.33                                | 8.54       | 10.52 | 11.80 |
|                 | $U - B$     | 0.24                                | 0.19       | 0.60  | 1.07  |
|                 | $B - V$     | 0.71                                | 0.67       | 0.91  | 1.19  |
|                 | $V - R$     | 0.39                                | 0.36       | 0.50  | 0.72  |
| Strömgren       | $u$         | 10.82                               | 10.91      | 13.71 | 16.13 |
|                 | $v$         | 9.81                                | 9.93       | 12.45 | 14.42 |
|                 | $b$         | 9.11                                | 9.27       | 11.50 | 13.15 |
|                 | $y$         | 8.69                                | 8.87       | 10.97 | 12.45 |
|                 | $u - v$     | 1.01                                | 0.98       | 1.26  | 1.71  |
|                 | $v - b$     | 0.70                                | 0.66       | 0.95  | 1.27  |
|                 | $b - y$     | 0.43                                | 0.41       | 0.53  | 0.70  |
| Tycho           | $B_T$       | 9.61                                | 9.74       | 12.19 | 14.02 |
|                 | $V_T$       | 8.80                                | 8.97       | 11.12 | 12.67 |
|                 | $B_T - V_T$ | 0.81                                | 0.77       | 1.06  | 1.35  |

**Таблица 10.** Сравнение наблюдаемых и полных синтетических величин и показателей цвета системы HIP 109951

| Фильтр               | Величина                 |  |
|----------------------|--------------------------|--|
|                      | наблюдаемая <sup>a</sup> | синтетическая <sup>b</sup> (данная работа) |
| $V_J$                | 8.72                     | $8.72 \pm 0.03$                            |
| $B_J$                | $9.43 \pm 0.03$          | $9.43 \pm 0.03$                            |
| $B_T$                | $9.58 \pm 0.03$          | $9.61 \pm 0.03$                            |
| $V_T$                | $8.82 \pm 0.02$          | $8.80 \pm 0.03$                            |
| $(B - V)_J$          | $0.71 \pm 0.002$         | $0.71 \pm 0.03$                            |
| $(u - v)_S$          | $0.96 \pm 0.003$         | $1.01 \pm 0.03$                            |
| $(v - b)_S$          | $0.68 \pm 0.003$         | $0.70 \pm 0.03$                            |
| $(b - y)_S$          | $0.44 \pm 0.003$         | $0.43 \pm 0.03$                            |
| $\Delta m_{A-B}$     | $1.88 \pm 0.003$         | $1.88 \pm 0.003$                           |
| $\Delta m_{Ba - Bb}$ | 1.50                     | $1.50 \pm 0.003$                           |

<sup>a</sup> Реальные наблюдения (см. таблицу 2).

<sup>b</sup> Полная синтетическая величина системы HIP 109951 (см. таблицу 9).

к надежному и точному анализу использованных методов.

Анализ HIP 109951 показал, что система является звездой со слегка пониженной металличностью [ $Z = 0.008$ ,  $Y = 0.25$ ] (рис. 4) и возрастом между 8.9 и 13 Гуг.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши вычисления дали наилучшие физические и геометрические параметры на сегодняшний день для исследуемой тройной системы с надежными параллаксами в обоих методах.

Полные динамические массы составили  $\sum M = 2.59 \pm 0.40 M_{\odot}$  и  $\sum M = 2.15 \pm 0.35 M_{\odot}$  по методу Докобо, основанному на параллаксе Gaia и уточненном параллаксе HIPPARCOS соответственно. Полная масса трех компонентов системы составила  $\sum M = 2.55 \pm 0.38 M_{\odot}$  по методу Аль-Вардата.

Кроме того для всей системы было с высокой точностью получено наилучшее соответствие между наблюдаемой фотометрией и синтетической фотометрией по величинам и показателям цвета в разных фотометрических системах (Джонсон:  $B, V, B - V$ ; Стремгрен:  $u - v, v - b, b - y$ ; и Тихо:  $B_T, V_T$ ).

## БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовались базы данных SAO/NASA, SIMBAD, Четвертый каталог интерферометрических измерений двойных звезд, система данных IPAC, программа Аль-Вардата для анализа тесных визуально двойных звезд, программа CHORIZOS для фотометрического и спектрофотометрического анализа данных. Авторы благодарят профессора Машхура Аль-Вардата за ценные замечания и предложения.

## FUNDING

Работа проводилась при финансовой поддержке испанского Министерства экономики, промышленности и конкурентоспособности по Проекту AYA-2016-80938-P (AEI/FEDER, UE) и Правительства Галисии в рамках гранта ED341DR 2016/022 программы Rede IEMath-Galicia.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O. Y. Malkov, S. G. Sichevskij, and D. A. Kovaleva, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **401**, 695 (2010).
2. L. Ghezzi and J. A. Johnson, *Astrophys. J.* **812**, 96 (2015).
3. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).
4. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *VizieR Online Data Catalog* **414**, 10371 (2000).
5. A. Tokovinin, *Astron. J.* **156**, 48 (2018).
6. Gaia Collab., *VizieR Online Data Catalog* **1345** (2018).
7. F. van Leeuwen, *Astron. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).

8. ESA, "The HIPPARCOS and Tycho Catalogues (ESA)" (1997).
9. M. A. Al-Wardat, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 51 (2002).
10. M. A. Al-Wardat, *Astronomische Nachrichten* **328**, 63 (2007).
11. M. Al-Wardat, *Publ. Astron. Soc. Australia* **29**, 523 (2012).
12. J. A. Docobo, *Celestial Mechanics* **36**, 143 (1985).
13. J. A. Docobo, in *Orbital Couples: Pas de Deux in the Solar System and the Milky Way*, Edited by F. Arenou and D. Hestroffer (2012), pp. 119–123.
14. J. A. Docobo, V. S. Tamazian, and P. P. Campo, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476**, 2792 (2018).
15. M. A. Al-Wardat, *Astronomische Nachrichten* **330**, 385 (2009).
16. M. A. Al-Wardat and H. Widyan, *Astrophysical Bulletin* **64**, 365 (2009).
17. M. A. Al-Wardat, Y. Y. Balega, V. V. Leushin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 198 (2014).
18. M. A. Al-Wardat, Y. Y. Balega, V. V. Leushin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 58 (2014).
19. M. A. Al-Wardat, *Astrophysical Bulletin* **69**, 454 (2014).
20. M. A. Al-Wardat, H. S. Widyan, and A. Al-thyabat, *Publ. Astron. Soc. Australia* **31**, e005 (2014).
21. M. A. Al-Wardat, M. H. El-Mahameed, N. A. Yusuf, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics* **16**, 166 (2016).
22. M. A. Al-Wardat, J. A. Docobo, A. A. Abushattal, and P. P. Campo, *Astrophysical Bulletin* **72**, 24 (2017).
23. S. G. Masda, M. A. Al-Wardat, and J. M. Pathan, *arXiv:1802.03804* (2018).
24. S. G. Masda, M. A. Al-Wardat, and J. M. Pathan, *Journal of Astrophysics and Astronomy* **39**, 58 (2018).
25. E. P. Horch, D. Falta, L. M. Anderson, et al., *Astron. J.* **139**, 205 (2010).
26. M. MacKnight and E. P. Horch, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts #204* (2004), *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 36, p. 788.
27. Z. Cvetković, R. Pavlović, and S. Ninković, *Astron. J.* **147**, 62 (2014).
28. R. L. Riddle, A. Tokovinin, B. D. Mason, et al., *Astrophys. J.* **799**, 4 (2015).
29. M. A. Al-Wardat, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **55**, 18 (2003).
30. R. Kurucz, *Solar abundance model atmospheres for 0,1,2,4,8 km/s* CD-ROM No. 19 (Cambridge, Smithsonian Astrophysical Observatory, 1994).
31. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
32. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
33. B. Hauck and M. Mermilliod, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **129**, 431 (1998).
34. E. Høg, C. Fabricius, V. V. Makarov, et al., *Astron. and Astrophys.* **355**, L27 (2000).
35. W. I. Hartkopf, H. A. McAlister, and B. D. Mason, *Astron. J.* **122**, 3480 (2001).

36. E. A. Pluzhnik, *Astron. and Astrophys.* **431**, 587 (2005).
37. I. Balega, Y. Y. Balega, A. F. Maksimov, et al., *Astron. and Astrophys.* **422**, 627 (2004).
38. E. P. Horch, R. D. Meyer, and W. F. van Altena, *Astron. J.* **127**, 1727 (2004).
39. I. I. Balega, A. F. Balega, E. V. Maksimov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **59**, 20 (2006).
40. E. P. Horch, W. F. van Altena, W. M. Cyr, Jr., et al., *Astron. J.* **136**, 312 (2008).
41. I. I. Balega, Y. Y. Balega, A. F. Maksimov, et al., *Astrophysical Bulletin* **62**, 339 (2007).
42. E. P. Horch, L. A. P. Bahi, J. R. Gaulin, et al., *Astron. J.* **143**, 10 (2012).
43. A. Tokovinin, B. D. Mason, and W. I. Hartkopf, *Astron. J.* **139**, 743 (2010).
44. E. P. Horch, S. E. Robinson, R. D. Meyer, et al., *Astron. J.* **123**, 3442 (2002).
45. A. Tokovinin, R. Cantarutti, R. Tighe, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122**, 1483 (2010).
46. A. Tokovinin, B. D. Mason, W. I. Hartkopf, et al., *Astron. J.* **150**, 50 (2015).
47. K. R. Lang, *Astrophysical Data I. Planets and Stars* (1992).
48. D. F. Gray, *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres* (2005).
49. M. N. Lund, W. J. Chaplin, L. Casagrande, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **128**, 124204 (2016).
50. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).
51. J. Maíz Apellániz, *Astron. J.* **131**, 1184 (2006).
52. J. Maíz Apellániz, *ASP Conf. Series* **364**, 227 (2007).

Переведено Е. Чмыревой

### Physical and Dynamical Parameters of the Triple Stellar System: HIP 109951

S. G. Masda, J. A. Docobo, A. M. Hussein, M. K. Mardini, H. A. Al-Ameryeen, P. P. Campo, A. R. Khan, and J. M. Pathan

The precise determination of the physical and dynamical parameters of the HIP 109951 triple star system (WDS J22161-0705AB) which is formed by the A, Ba, and Bb components are presented. The binary nature of component B was recently confirmed by studying the radial velocities. The analysis of the system follows Al-Wardat's complex method for analyzing CVBS which employs Kurucz (Atlas9) line blanketed plane-parallel atmospheres simultaneously with an analytic method for dynamical analysis (we used Docobo's method) to calculate the parameters of this triple system. The result of our study yielded the following parameters:  $T_{\text{eff}}^A = 5836 \pm 80$  K,  $R^A = 1.090 \pm 0.039 R_{\odot}$ ,  $\log g^A = 4.45 \pm 0.06$ ,  $M^A = 1.05 \pm 0.16 M_{\odot}$ ;  $T_{\text{eff}}^{\text{Ba}} = 5115 \pm 80$  K,  $R^{\text{Ba}} = 0.596 \pm 0.05 R_{\odot}$ ,  $\log g^{\text{Ba}} = 4.60 \pm 0.07$ ,  $M^{\text{Ba}} = 0.83 \pm 0.16 M_{\odot}$ ,  $T_{\text{eff}}^{\text{Bb}} = 4500 \pm 80$  K,  $R^{\text{Bb}} = 0.490 \pm 0.06 R_{\odot}$ ,  $\log g^{\text{Bb}} = 4.65 \pm 0.07$ , and  $M^{\text{Bb}} = 0.67 \pm 0.16 M_{\odot}$  based on the revised HIPPARCOS parallax. The orbital solution gave a total mass as  $M = 2.59 M_{\odot}$  based on Gaia parallax and  $M = 2.15 M_{\odot}$  based on the revised HIPPARCOS parallax. The synthetic spectral energy distributions (SED) and synthetic stellar photometry of the entire system and individual components are given and compared with the available observational ones. Finally, the positions of the system components on the HR diagram and the evolutionary tracks are given and their formation and the evolution of the system are discussed.

Keywords: *binaries: close—binaries: visual—stars: fundamental parameters—stars: individual: HIP 109951*