

УДК 524.334; 524.338.5; 524.383:520.83

HD 52721 КАК КВАДРУПОЛЬНАЯ СИСТЕМА

© 2021 М. А. Оболенцева^{1*}, В. В. Дьяченко², М. А. Погодин³,
М. Ю. Ховричев^{1,3}, С. Е. Павловский³, Ю. Ю. Балага²,
А. С. Бескакетов², А. А. Митрофанова², А. Ф. Максимов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 23 февраля 2021 года; после доработки 12 мая 2021 года; принята к публикации 12 мая 2021 года

Представлены результаты исследования кратной системы HD 52721 методом спекл-интерферометрии в 2019–2020 гг. на 6-м телескопе САО РАН. Ранее HD 52721 была известна как тройная (6.93 (B2V + B2V; $P = 1^d6101570$) + 7.88; 0".65). В нашей работе система разрешена как спекл-интерферометрическая тройная, таким образом общая кратность системы увеличена до четырех компонентов (6.80 (B2V+B2V; $1^d6101570$)+8.95 (B9V+B9V, 0".03); 0".64). Нами использованы опорно-зависимый и не зависящий от опоры методы измерения позиционных параметров и разностей блеска между компонентами. Полученные измерения разностей блеска хорошо согласуются с наблюдаемой фотометрической кривой затменной пары.

Ключевые слова: *звезды — до Главной последовательности — звезды: переменные: Ae/Be Хербига — двойные: визуальные — техника: высокое угловое разрешение*

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезды Хербига Ae/Be — молодые звезды с массами 2–10 M_{\odot} (Vioque et al. 2018) раннего спектрального типа (B или A) и выраженной эмиссией в бальмеровских линиях (Herbig 1960). Они пребывают на стадии до Главной последовательности и погружены в пылевую оболочку, о чем свидетельствует инфракрасный избыток в их спектрах (Finkenzeller and Mundt 1984). Изучение кратности звезд Хербига как молодых и массивных объектов дает информацию о параметрах компонентов систем и играет важную роль в определении механизмов звездообразования.

Спекл-интерферометрические наблюдения на БТА звезд ранних спектральных классов уже были посвящены как разрешению отдельных массивных молодых систем (Weigelt et al. 1999), так и обзорам кратности членов OB-ассоциаций (Balega et al. 2017). В нашей работе представлены результаты спекл-интерферометрического исследования звезды Be Хербига HD 52721 (GU CMa, NU 112, HIP 33868) — одной из наиболее ярких ($V = 6.58$) в области звездообразования, связанной с ассоциациями отражательных туманностей CMa R1 (Shevchenko et al. 1999). Ранее она была известна

как визуальная пара (ADS 5713) с расстоянием между компонентами $\rho = 0".65$ и разностью блеска $\Delta m = 0.95$ (Hussey 1900, Perryman et al. 1997). При этом главный компонент является затменной переменной (период $P = 1^d6101570$ (Pavlovskiy et al. 2015)). Единственным способом разделения компонентов для столь тесных систем является применение методов высокого углового разрешения.

В 2019–2020 гг. нами была проведена серия спекл-интерферометрических наблюдений, в ходе которых визуальная пара HD 52721 была впервые разрешена как тройная. С учетом затменной двойной следует считать эту систему квадрупольной.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдения HD 52721 проводились 8 апреля, 15 ноября 2019 г. и 4 марта 2020 г. на 6-м телескопе САО РАН. Нами был использован спекл-интерферометр на базе EMCCD Andor iXon Ultra 897 (Maksimov et al. 2009). Были получены серии от 1000 до 4000 изображений в фильтрах 550/20 и 800/100 нм в обоих сетах 2019 г., а также в полосах 550/20, 694/10, 700/50 и 800/100 нм в 2020 г.

*E-mail: marta.obolentseva@yandex.ru

Для учета атмосферных искажений и аберраций зеркала телескопа в методах высокого углового разрешения используются серии точечных источников. Хорошим их приближением являются спекл-интерферометрически неразрешимые — так называемые опорные — звезды. В этой работе в качестве опорных нами использовались серии 18 Leo в 2019 г. в фильтре 550/20 нм и HD 51700 в 2020 г. во всех фильтрах. Время экспозиции на кадр составляло 20 мс для всех серий, кроме изображений 18 Leo 8 апреля 2019 г., записанных с 50 мс.

Для всех кадров была выполнена процедура по удалению вклада темнового сигнала детектора и компенсации плоского поля. Затем для каждой серии объекта и опорной звезды был вычислен средний спектр мощности.

Угловое расстояние, позиционный угол (позиционные параметры) и разности блеска спекл-интерферометрической тройной HD 52721 были определены путем аппроксимации спектра мощности $F(u, v)$ простой аналитической моделью:

$$F(u, v) = S(u, v) \times \left(\sum_{i=1,3} I_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1,3 \\ j \neq i}} I_i I_j \cos[2\pi(u(x_i - x_j) + v(y_i - y_j))] \right),$$

где u и v — координаты в частотной области, I_i — интенсивность i -того компонента, а x_i и y_i — его декартовы координаты в системе поля. $S(u, v)$ — спектральная мощность точечного источника, иначе — передаточная функция. Для компенсации этой составляющей применялся метод разделения спектра мощности на узкие кольца (Pluzhnik 2005), в пределах которых $S(u, v)$ можно считать постоянной. В этом приеме сделано предположение о радиальной симметрии передаточной функции, однако оно не всегда справедливо, поэтому мы реализовали два метода измерения параметров системы: опорно-независимый и опорно-зависимый. В последнем мы дополнительно делим спектр мощности объекта на спектр мощности опорной — спекл-интерферометрически неразрешимой — звезды, тем самым исключая аберрации, вносимые зеркалом телескопа. В обоих случаях для каждого кольца с помощью алгоритма локальной оптимизации L-BFGS-B (Zhu et al. 1997) были подобраны наилучшие параметры аналитической модели спектра мощности тройной звезды. Затем из выборки были исключены центральные кольцевые области спектра, содержащие в себе атмосферный профиль, а также значения с квадратами относительных невязок фитирования выше

0.05%. Ошибки определения параметров рассчитаны с учетом стандартного отклонения значений в выборке, неопределенностей, связанных с отклонением в расположении детектора, неточностями определения масштаба (Mitrofanova et al. 2020).

Изложенный выше алгоритм был реализован в виде пакета программ на языке Python 3. При помощи современных библиотек методов локальной оптимизации L-BFGS-B удалось сократить время подбора модели звезды в 10 раз по сравнению с ранее используемым программным обеспечением. Особенности новой архитектуры также упростили процесс дальнейшей модификации алгоритма для повышения точности получаемых результатов.

На рис. 1 приведен пример полученной модели для опорно-зависимого метода. На карте невязок видны следы остаточной недокомпенсации опоры, проявляющиеся преимущественно на высоких частотах. Наличие следов спектра мощности объекта позволяет рассчитывать на достижение лучших значений ошибок измерения при более корректном учете изменения атмосферного профиля и искажений оптической системы.

Изображения были восстановлены методом биспектрального анализа (Lohmann et al. 1983).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены восстановленные изображения системы HD 52721 в фильтрах 550/20 и 800/100 нм на эпохи B2019.2685 и B2019.8744 соответственно. Затменная пара расположена в центре кадра, при этом методом спекл-интерферометрии она не разрешима. Изменение яркости в этой паре должно приводить к вариации в разности блеска для разных наблюдательных эпох. Отсчет фазы ($\varphi = 0$) можно вести от максимума, соответствующего JD2455252.832–0.733P (Pogodin et al. 2013), где $P = 1^d 6101570$ — период затменной пары. В таблице 1 представлены результаты измерений позиционных параметров и разностей блеска. В столбцах показаны эпохи наблюдений в долях бесселианского года; фазы переменности затменной пары; фильтры; компоненты подсистемы; данные в последних 12 столбцах соответствуют двум вариантам подбора модели: опорно-зависимому и не зависящему от опоры. В каждом из двух вариантов приведены позиционный угол в градусах, угловое расстояние в миллисекундах дуги и разности блеска с соответствующими ошибками. Прочерки соответствуют данным, записанным в ночи без пригодных опорных звезд.

Позиционные параметры компонентов, полученные разными методами, совпадают в пределах ошибок для всех эпох, кроме ночи B2019.8744, когда на зеркале телескопа наблюдалась кома.

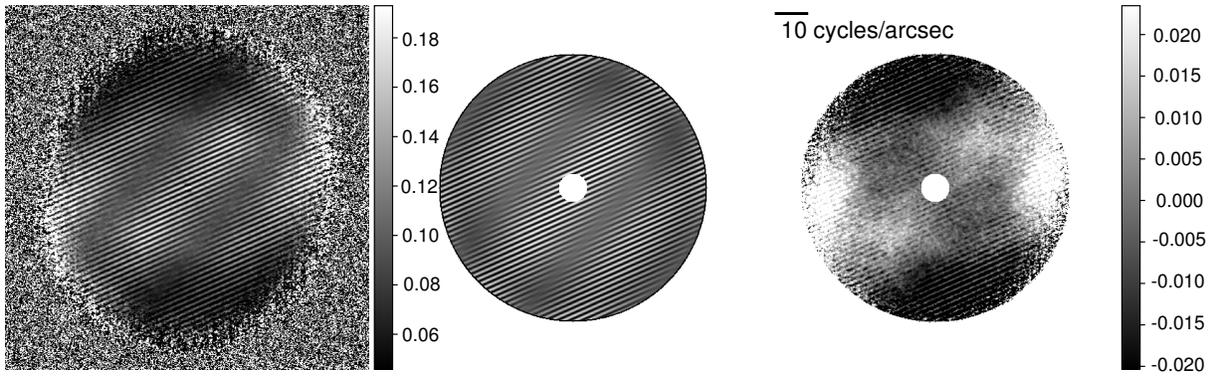


Рис. 1. Результаты моделирования опорно-зависимым методом наблюдений 15 ноября 2019 г. в фильтре 550/20 нм. Слева направо: восстановленный спектр мощности, модель, карта невязок.

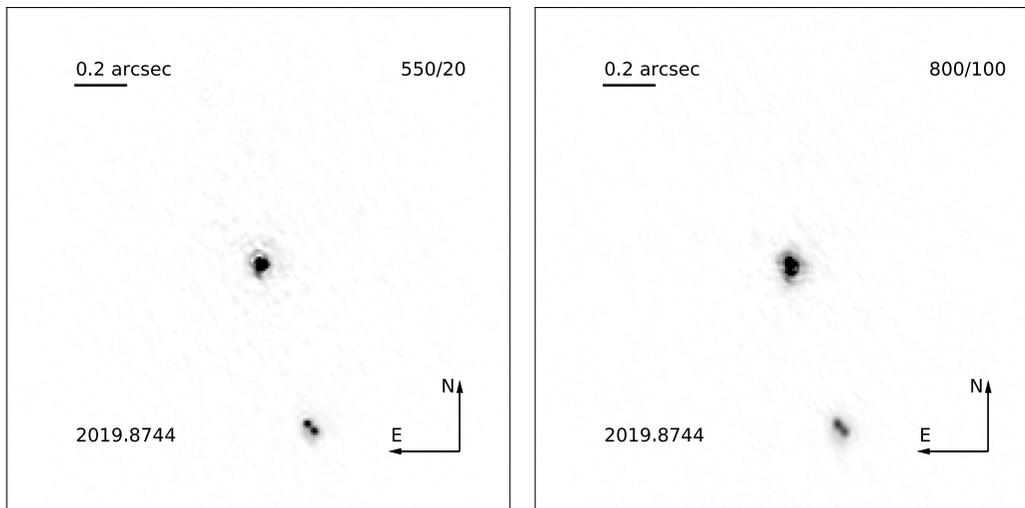


Рис. 2. Восстановленные изображения.

Различие в позиционном угле на эту эпоху составляет порядка 0.1° . При этом, в отличие от данных без использования опоры для этой ночи, результаты опорно-зависимого метода согласуются с общим ростом θ за весь период наблюдений, что демонстрирует его эффективность в применении к оптически-искаженным изображениям. Анализ движения компонентов ВС как целого за последние 50 лет

- эпоха 1900.25, $\theta = 191^\circ 0$, $\rho = 0''.55$ (Hussey 1900);
- эпоха 1972.092, $\theta = 191^\circ 4$, $\rho = 0''.63$ (Worley 1972);
- эпоха 1983.0150, $\theta = 192^\circ 6$, $\rho = 0''.655$ (Hartkopf et al. 1993);
- эпоха 1989.3083, $\theta = 194^\circ 6$, $\rho = 0''.649$ (McAlister et al. 1990);

- epoch 1989.9335, $\theta = 194^\circ 7$, $\rho = 0''.646$ (Hartkopf et al. 1997);
- эпоха 1991.25, $\theta = 195^\circ$, $\rho = 0''.654$ (Perryman et al. 1997)

в совокупности с нашими результатами показал изменение позиционного угла на 7° , что делает систему пригодной для регулярных спеклинтерферометрических наблюдений с целью построения орбит её компонентов.

Разности блеска, измеренные обоими методами, хорошо согласуются в фильтрах 550/20 и 694/10 нм, за исключением данных на эпоху В2019.8744, что связано с наблюдавшейся в эту ночь комой. Полученные значения Δm соответствуют наблюдаемой фотометрической кривой затменной пары (Pavlovskiy et al. 2015). Согласно результатам измерений разностей блеска в филь-

Таблица 1. Позиционные параметры и разности блеска компонентов

Эпоха	φ	$\lambda/\Delta\lambda$	Комп.	Опорно-зависимый						Опорно-независимый					
				θ , град.	σ_θ , град.	ρ , mas	σ_ρ , mas	Δm	$\sigma_{\Delta m}$	θ , град.	σ_θ , град.	ρ , mas	σ_ρ , mas	Δm	$\sigma_{\Delta m}$
2019.2685	0.26	550/20	AB	196.47	0.06	627	4	2.03	0.10	196.47	0.07	625	4	2.09	0.06
2019.2685	0.26	550/20	AC	197.72	0.07	658	4	2.18	0.09	197.73	0.04	659	4	2.18	0.06
2019.2685	0.27	800/100	AB	—	—	—	—	—	—	196.54	0.05	625	4	1.93	0.09
2019.2685	0.27	800/100	AC	—	—	—	—	—	—	197.79	0.05	660	4	1.99	0.09
2019.8744	0.70	550/20	AB	196.47	0.04	625	4	1.83	0.02	196.40	0.05	625	3	2.00	0.03
2019.8744	0.70	550/20	AC	197.89	0.04	658	4	1.93	0.03	197.99	0.06	657	4	2.13	0.04
2019.8744	0.70	800/100	AB	—	—	—	—	—	—	195.91	0.16	626	5	1.81	0.12
2019.8744	0.70	800/100	AC	—	—	—	—	—	—	196.73	0.16	658	5	1.92	0.14
2020.1748	0.85	550/20	AB	196.51	0.03	627	4	2.15	0.05	196.52	0.05	627	4	2.20	0.10
2020.1748	0.85	550/20	AC	198.00	0.05	660	4	2.28	0.05	197.99	0.04	659	4	2.33	0.12
2020.1749	0.87	694/10	AB	196.57	0.05	626	4	2.07	0.04	196.55	0.11	627	4	2.01	0.14
2020.1749	0.87	694/10	AC	198.07	0.05	660	3	2.19	0.04	198.06	0.12	660	4	2.12	0.17
2020.1749	0.86	700/50	AB	196.62	0.03	625	4	2.05	0.05	196.67	0.08	626	4	1.93	0.07
2020.1749	0.86	700/50	AC	198.09	0.02	656	4	2.15	0.07	198.06	0.08	655	4	2.01	0.12
2020.1748	0.85	800/100	AB	196.60	0.07	628	4	2.18	0.05	196.56	0.11	627	4	2.04	0.09
2020.1748	0.85	800/100	AC	198.07	0.05	661	4	2.31	0.04	198.00	0.09	661	4	2.12	0.12

трах 550/20 и 800/100 нм на эпоху B2020.1748, соответствующую максимуму блеска компонента А, и фотометрическим данным HIPPARCOS ($V = 6.55$; $V - I = 0.040$) (Leeuwen 2007) спектральный класс компонентов В и С принадлежит диапазону B5V–A1V для опорно-зависимого метода, при этом средние значения соответствуют B9V (Pecaut and Mamajek 2013). Метод, свободный от опоры, дает более широкие диапазоны: B9.5V–A8V для В-компонента и B9V–F1V для С со средними значениями A2V и A3V.

Анализ звезд с подобными собственными движениями и светимостями в поле $1' \times 1'$ показывает, что удаленные пары в системе HD 52721 не являются оптической проекцией, а физически связаны.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами был реализован метод измерения позиционных параметров и разностей блеска тройных спекл-интерферометрических систем по спектру мощности. Новая реализация пакета программ обработки спекл-интерферометрических тройных

позволила сократить время подбора модели более чем в 10 раз. Метод допускает два вида построения модели: опорно-зависимый и не зависящий от опоры. Важной особенностью новой реализации этого пакета программ является универсальность, что обеспечит возможность использования моделей иных конфигураций как двойных звезд, так и объектов более высокой кратности.

В ходе наблюдений на 6-м телескопе САО РАН звезда Ве Хербига HD 52721, одна из ближайших и ярчайших звезд такого типа, была обнаружена как спекл-интерферометрическая тройная. Измеренные разности блеска компонентов системы согласуются с изменениями, обусловленными переменностью яркого компонента системы, представляющего собой затменную пару. Смещение компонентов системы за год и анализ распределения звезд поля в её окрестностях говорят о физической связанности наблюдаемых компонентов. Результаты годичного мониторинга HD 52721 позволяют рассчитывать в дальнейшем на построение орбит звезд внутри данной системы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-32-70120 и № 18-02-00554. Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Y. Balega, V. Dyachenko, A. Maksimov, et al., ASP Conf. Ser. **510**, 325 (2017).
2. U. Finkenzeller and R. Mundt, Astron. and Astrophys. Suppl. **55**, 109 (1984).
3. W. I. Hartkopf, B. D. Mason, D. J. Barry, et al., Astron. J. **106**, 352 (1993).
4. W. I. Hartkopf, H. A. McAlister, B. D. Mason, et al., Astron. J. **114**, 1623 (1997).
5. G. H. Herbig, Astrophys. J. Suppl. **4**, 337 (1960).
6. W. J. Hussey, Astron. J. **21**, 35 (1900).
7. F. van Leeuwen, Astron. and Astrophys. **474** (2), 653 (2007).
8. A. W. Lohmann, G. Weigelt, and B. Wirtzner, Applied Optics **22**, 4028 (1983).
9. A. F. Maksimov, Y. Y. Balega, V. V. Dyachenko, et al., Astrophysical Bulletin **64** (3), 296 (2009).
10. H. A. McAlister, W. I. Hartkopf, and O. G. Franz, Astron. J. **99**, 965 (1990).
11. A. Mitrofanova, V. Dyachenko, A. Beskakotov, et al., Astron. J. **159** (6), 266 (2020).
12. S. E. Pavlovskiy, M. A. Pogodin, V. V. Kupriyanov, and D. L. Gorshanov, Astronomy Letters **41** (6), 289 (2015).
13. M. J. Pecaut and E. E. Mamajek, Astrophys. J. Suppl. **208** (1), 9 (2013).
14. M. Perryman, L. Lindegren, J. Kovalevsky, et al., Astron. and Astrophys. **500**, 501 (1997).
15. E. A. Pluzhnik, Astron. and Astrophys. **431**, 587 (2005).
16. M. A. Pogodin, N. G. Beskrovnaya, G. G. Valyavin, et al., Bull. Crimean Astrophys. Obs. **109** (1), 23 (2013).
17. V. S. Shevchenko, O. V. Ezhkova, M. A. Ibrahimov, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **310** (1), 210 (1999).
18. M. Vioque, R. D. Oudmaijer, D. Baines, et al., Astron. and Astrophys. **620**, id. A128 (2018).
19. G. Weigelt, Y. Balega, T. Preibisch, et al., Astron. and Astrophys. **347**, L15 (1999).
20. C. E. Worley, Astron. J. **77**, 878 (1972).
21. C. Zhu, R. H. Byrd, P. Lu, and J. Nocedal, ACM Transactions on Mathematical Software, **23** (4), 550 (1997).

HD 52721 as a Quadruple System

M. Obolentseva¹, V. V. Dyachenko², M. A. Pogodin³, M. Yu. Khovritchev^{1,3}, S. E. Pavlovskiy³, Yu. Yu. Balega², A. S. Beskakotov², A. A. Mitrofanova², and A. F. Maximov²

¹Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 198504 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz, 369167 Russia

³Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

We present the study of the multiple system HD 52721 by means of speckle interferometry in 2019–2020 at the 6-m telescope of the SAO RAS. Formerly, HD 52721 was known as triple (6.93 (B2V + B2V; $P = 1^d6101570) + 7.88; 0''.65$). In our work, the system is resolved as a speckle interferometric triple system, i.e., the total system multiplicity increased up to four components (6.80 (B2V+B2V; $1^d6101570$)+8.95 (B9V+B9V, $0''.03; 0''.64$). We have used the reference-dependent and reference-independent methods for measuring positional parameters and magnitude differences between the components. The obtained measurements of the brightness differences agree with the observed light curve of the eclipsing pair.

Keywords: *stars: pre-main sequence—stars: variables: Herbig Ae/Be—binaries: visual—techniques: high angular resolution*