

УДК 524.338.5:520.82

МАЛОМАССИВНЫЙ ПРОТОПЛАНЕТНЫЙ ДИСК ЗВЕЗДЫ Ae ХЕРБИГА DD Ser: ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЫЛИ И ВЕРОЯТНОЕ НАЛИЧИЕ МАССИВНЫХ ПЛАНЕТ

© 2015 К. А. Антонюк^{1,2,3*}, Д. Н. Шаховской^{1,2}, С. П. Белан¹, А. Н. Ростопчина¹

¹Крымская астрофизическая обсерватория, Научный, 298409 Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, 117997 Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 1 апреля 2015 года; принята в печать 25 мая 2015 года

Обнаружено тепловое ИК-излучение пыли у DD Ser — малоактивной звезды типа UX Ori, источником которого является диск сложной структуры (внутреннее кольцо с температурой пыли около 900 К и внешний диск с температурой менее 300 К). Обнаруженный в многолетних фотометрических наблюдениях период 15.1 года указывает на возмущение этого кольца маломассивным спутником (возможно планетой) с радиусом орбиты около 8 а.е. В целом, выявленные характеристики диска DD Ser (наличие пылевого кольца, плотность которого модулируется с периодом более 10 лет, присутствие во внутренней полости этого кольца компактных пылевых сгустков) практически идентичны характеристикам диска RZ Psc, в котором предполагается наличие активного астероидного пояса внутри орбиты планеты или другого маломассивного компаньона. Хотя предположение о «столкновительном» источнике пыли в этих системах не бесспорно, сложная структура дисков, проявляющаяся в форме ИК-спектра и фотометрической переменности, в особенности долгопериодическая переменность, являются свидетельством наличия уже сформировавшихся массивных планет в этих системах.

Ключевые слова: *протопланетные диски — планеты и спутники: формирование — планеты и спутники: обнаружение — звёзды: переменные: Т Тельца, Ae/Ве Хербига — звёзды: индивидуальные: DD Ser*

1. ВВЕДЕНИЕ

DD Ser — сравнительно слабо исследованная Ae звезда с непериодическими минимумами блеска глубиной до 1^m [2, 3], похожая по картине фотометрической переменности на молодые звезды типа UX Ori [4]. Ее спектральный класс определен как A5 [5], имеется слабая переменная эмиссия в линии $H\alpha$ [6]. Эволюционный статус DD Ser не вполне очевиден. Хотя она расположена вблизи молекулярного облака и области звездообразования, ее долгое время не классифицировали как звезду Ae Хербига из-за отсутствия наблюдаемого ИК-избытка и слабости эмиссионных линий. Пугач и Ковальчук [6, 7] относили ее вместе с RZ Psc и некоторыми похожими объектами к отдельному классу переменных, переменность которых похожа на переменность звезд типа UX Ori, но на стадии эволюции после главной последовательности. К настоящему времени получены убедительные доказательства эволюционной молодости RZ Psc [8, 9].

При этом особенности распределения энергии в ИК-области и фотометрической кривой блеска позволяют считать RZ Psc уникальным случаем звезды типа UX Ori с «остаточным» диском. Большая часть вещества диска потеряна в результате формирования планетной системы, однако наблюдается плотное пылевое кольцо, постоянно пополняемое в результате столкновений крупных тел [1]. Поскольку по ряду характеристик (малая частота и продолжительность минимумов, отсутствие избытка в ближней ИК-области, слабая эмиссия в балмеровских линиях) DD Ser подобна RZ Psc, интересной и требующей проверки является гипотеза об аналогичном «пост-UX Ori» статусе DD Ser. В данной работе представлен анализ доступных в каталогах ИК-наблюдений DD Ser, а также многолетних *UBVRI* фотометрических и поляриметрических наблюдений авторов, подтверждающий эту гипотезу.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Фотометрические и поляриметрические наблюдения с 1988 по 2014 гг. проводились в КрАО в

*E-mail: antoniuk@crao.crimea.ua

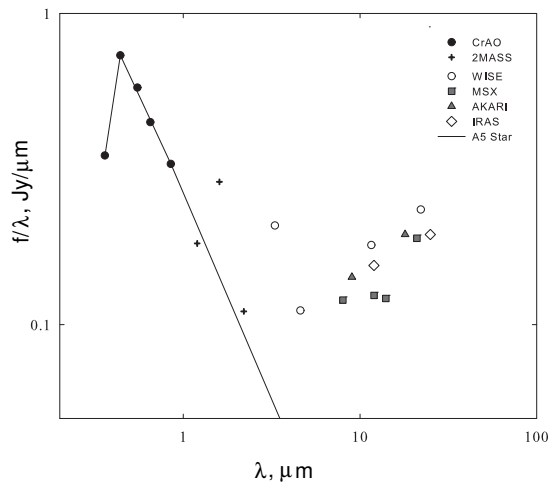


Рис. 1. Распределение энергии в спектре DD Ser. Линией показан фотосферный спектр звезды спектрального класса A5. Источники данных описаны в тексте.

рамках долговременной программы мониторинга молодых звезд на 1.25-м телескопе АЗТ-11 с помощью *UBVRI*-фотометра-поляриметра [10]. В качестве звезды сравнения использовалась звезда «с» из [11]. Данные о потоках в разных частях ИК-диапазона получены из каталогов следующих обзоров: IRAS (каталожный идентификатор звезды — J18386–0201) — для длин волн 12 и 25 мкм [12]; AKARI (J1841131–015804) — для 9 и 18 мкм [13]; 2MASS (J18411316–0158053) — для полос *J, H, K* [14]; Midcourse Space Experiment Point Source Catalogue — для 8, 12, 14, 21 мкм [15]; WISE (J184113.18–015805.9) — для 3.35, 4.6, 11.6, 22.1 мкм [16]. Каталожные координаты перечисленных источников отличаются от координат DD Ser не более чем на 20 секунд дуги.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В СПЕКТРЕ

Распределение энергии в спектре (SED) DD Ser, построенное по данным оптических и ИК-наблюдений, представлено на рис. 1. Для построения SED в каждой из полос *UBVRI* использовались величины «яркого состояния», равные медианным значениям по десяти датам с наибольшим блеском в полосе *V*. Межзвездное покраснение учитывалось в предположении, что избыток цвета $E(B - V)$ этого яркого состояния относительно стандартного значения $B - V$ для звезды A5 обусловлен межзвездным поглощением со стандартным показателем $R = 3.1$. Полученная таким образом оценка межзвездного поглощения $A_V = 0.3$. Ошибки потока (ордината на рис. 1) не приведены, поскольку они доступны не для всех каталожных данных. О точности измерений можно

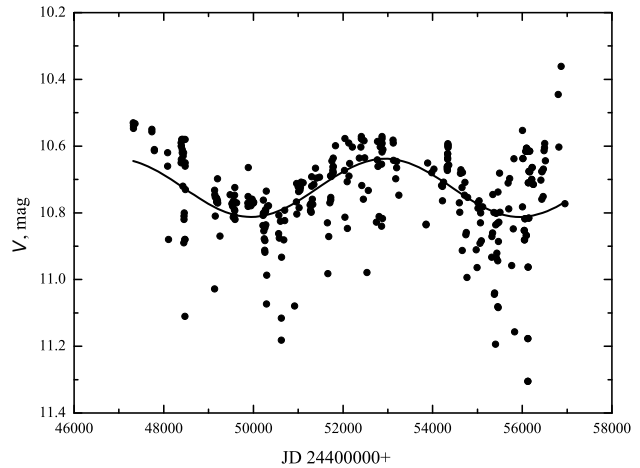


Рис. 2. Кривая блеска DD Ser в полосе *V* по наблюдениям в КрАО. Линией представлена синусоида с периодом 5500 дней.

судить по разбросу измерений разных спутников на близких длинах волн.

Обращают на себя внимание необычно резкие скачки SED в области 1–10 мкм. Очевидно, что такой спектр не может быть интерпретирован ни чернотельным излучением с одной температурой, ни протяженным диском с непрерывным диапазоном температур. Если считать, что источники резких пиков на длинах волн 1.6 и 3.3 мкм имеют тепловую природу, это соответствует температурам около 2000 К и 900 К соответственно. Форма SED в более длинноволновом диапазоне характерна для протяженного холодного диска с максимальной температурой около 300 К. Интегральная величина ИК-избытка относительно болометрической светимости (fractional luminosity) составляет около 14% (это является оценкой снизу, т.к. в обзорах не зарегистрировано излучение с длиной волны более 25 мкм).

4. ПЕРЕМЕННОСТЬ БЛЕСКА

Долговременная кривая блеска в полосе *V* приведена на рис. 2. Кроме коротких минимумов амплитудой около $0^m.4$ заметны долговременные изменения блеска с амплитудой $0^m.2$. Характерное время этой переменности составляет около 15 лет. На рис. 2 представлена аппроксимация кривой блеска синусоидой. Период наилучшей аппроксимации составляет 5500 дней. Корреляции между фазой долгопериодической переменности с глубиной и частотой коротких минимумов не обнаруживается.

Малая амплитуда переменности DD Ser затрудняет анализ показателей цвета с целью оценки размера поглощающих пылевых частиц. Корреляция показателей цвета с блеском довольно слабая

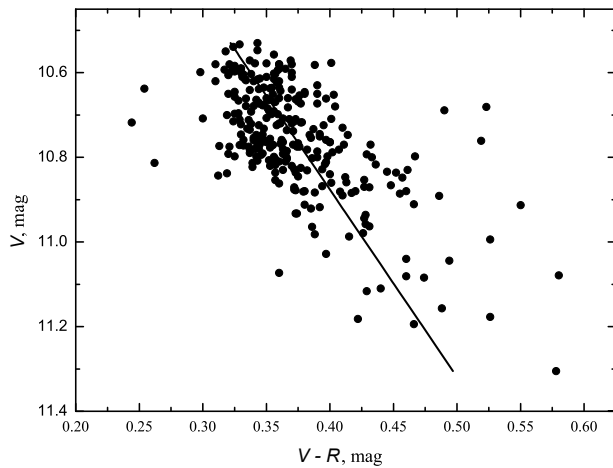


Рис. 3. Зависимость «показатель цвета—величина» на примере показателя $V - R$. Линией показана линейная регрессия с угловым коэффициентом 4.3.

(рис. 3), однако в среднем наблюдается заметное покраснение с ослаблением блеска. Как и у большинства звезд типа UX Ori, основное поглощение обеспечивают субмикронные частицы, сравнимые по характерным размерам с межзвездной пылью. Тем не менее, слабая корреляция блеска и показателя цвета не может быть полностью списана на ошибки измерений, которые составляют $0^{\text{m}}02$ – $0^{\text{m}}03$, или разность фотометрических систем, поскольку все наблюдения выполнены с одной аппаратурой. Видимо, показатель поглощения непостоянен, что может быть связано с переменной долей частиц разного размера в поглощении или с наличием компактных оптически толстых сгустков, поглощение которыми определяется не оптической толщиной пыли, а фактором скважности относительно диска звезды. Для DD Ser последняя возможность представляется менее вероятной, поскольку такие сгустки должны иметь очень малый размер для наблюдаемой малой глубины минимумов.

5. ПОЛЯРИМЕТРИЯ

Наиболее вероятным механизмом фотометрической переменности является переменное околозвездное поглощение, вызванное появлением на луче зрения фрагментов газопылевого протопланетного диска (как у классических звезд типа UX Ori [4]). В таком случае должна наблюдаться характерная для звезд типа UX Ori переменность поляризации амплитудой несколько процентов. Как видно по рис. 4, у DD Ser амплитуда переменности гораздо меньше и составляет 0.5–1%. Это не противоречит предположению об околозвездной пыли как источнике переменности, поскольку в отличие от классических звезд типа UX Ori, у DD Ser не наблюдается ослаблений

блеска более чем на $0^{\text{m}}7$. Наиболее значимая корреляция блеска и поляризации имеется в полосе V , коэффициент корреляции $P = 0.33$. Корреляция является значимой, с вероятностью ложного обнаружения по критерию Стьюдента меньше 10^{-5} в полосах $BVRI$. Малость коэффициента корреляции, вероятно, объясняется значительными по сравнению с амплитудой поляризационной переменности ошибками измерений (0.1–0.3%). Таким образом, несмотря на отсутствие характерной для звезд типа UX Ori картины переменности поляризации, само наличие такой переменности и значимая корреляция ее с переменностью блеска подтверждают механизм околозвездной экстинкции как основную причину переменности DD Ser.

6. ОБСУЖДЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдаемые характеристики диска DD Ser близки к считающейся уникальной системе RZ Psc [1]. Распределение энергии сложной формы с «провалами» и иногда выделяющимися «монотемпературными» компонентами характерно как для «переходных» дисков (transitional disks) звезд на поздних стадиях формирования планетных систем [17], так и для так называемых «теплых осколочных дисков» (warm debris disks) [18], обнаруживаемых в основном у более проэволюционировавших звезд, находящихся на ГП.

В обоих случаях это указывает на сложную структуру дисков с плотными кольцами и пробелами между ними, в простейшем и самом распространенном случае это пустая полость во внутренней части диска.

Отличие в том, что если в «переходных» дисках составляющее их вещество считается сохранившимся от исходного протопланетного диска, в осколочных дисках происходит постоянное пополнение вещества за счет столкновений крупных тел.

В случае DD Ser источник пика на 1.6 мкм трудно интерпретировать пылевой структурой типа кольца из-за слишком высокой для стабильного существования пыли температуры 2000 К, но источник с температурой около 900 К может быть аналогом «кольца» RZ Psc (с температурой 600 К, согласно [1]).

Интересно, что подобная структура диска: внутреннее кольцо с $T \sim 900$ К, имеющее с учетом правдоподобных предположений о светимости звезды А5 радиус около 3 а.е., и пробел между ним и внутренним радиусом холодного диска примерно на 20 а.е. — согласуется с расположением гипотетической планеты, порождающей фотометрический период 5500 дней (около 8 а.е.). Планета на такой орбите и должна породить подобный пробел в диске.

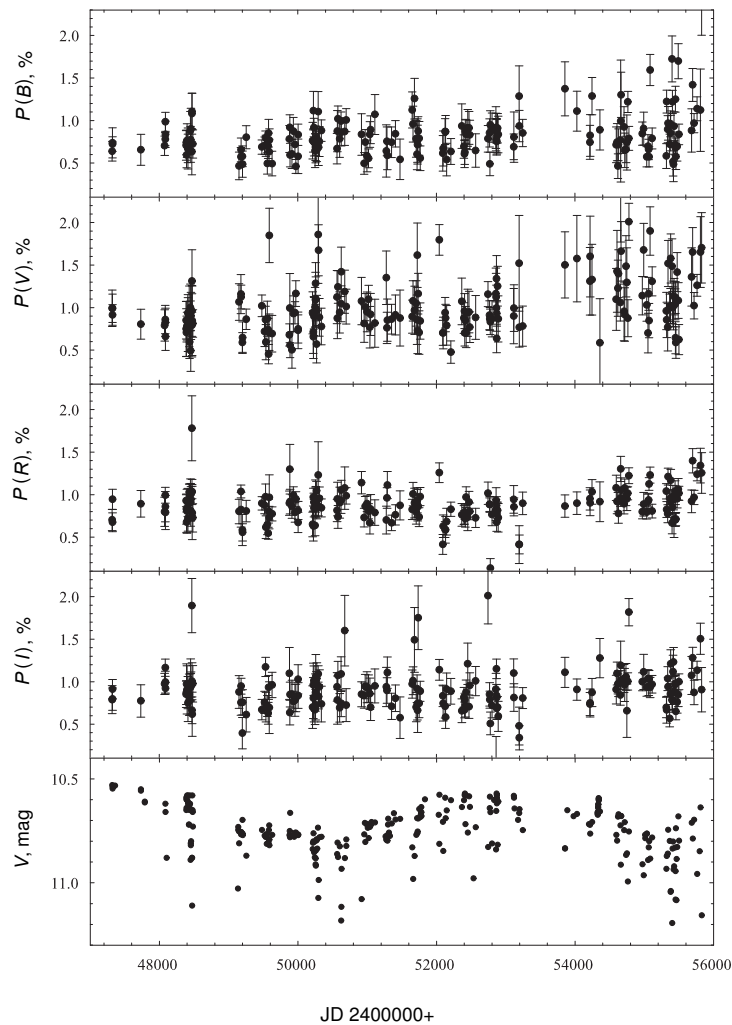


Рис. 4. Переменность блеска в полосе V и степени поляризации в полосах $BVRI$ по наблюдениям в КрАО.

Касательно эволюционного статуса диска DD Ser определенности меньше, чем в случае RZ Psc, поскольку нет оценок возраста самой звезды. Однако, наличие внешнего холодного диска позволяет предположить, что диск является скорее «промежуточным», чем «осколочным».

Представляется, что различие между этими категориями не вполне обоснованно, поскольку в значительной степени опирается на чисто теоретические представления о сроках формирования планетных систем и основанный на них тезис о невозможности сохранения остатков первичного вещества диска в системах с возрастом более 20–30 млн лет (возраст RZ Psc). К тому же оно игнорирует возможность вторичной аккреции межзвездного вещества в уже значительно эволюционировавшей системе [19].

С учетом этой критики концепции «теплых осколочных дисков» и учитывая, что образование

центральных полостей в «переходных» дисках может быть следствием не только динамического взаимодействия массивного тела (планеты) и вещества диска, но и ускоренной диссипации мелких пылевых частиц в условиях высокой плотности (благоприятной для коагуляции и роста крупных частиц) и температуры, факт существования полости не является доказательством наличия в системе сформировавшихся планет.

Важным аргументом в пользу наличия массивных планет как для RZ Psc, так и для DD Ser является периодическая переменность блеска. Следует отметить, что в кривой блеска DD Ser она проявляется гораздо более явно, и для звезды A5 не подходит альтернативная интерпретация многолетней переменности как цикла магнитной активности, приемлемая для RZ Psc.

Отличительной особенностью RZ Psc и DD Ser, кроме фотометрической переменности, является

большая абсолютная величина ИК-избытка — 8% и 14%, что указывает не только на значительную плотность вещества вне «пустых» зон дисков, но и на их заметную геометрическую толщину. В случае с RZ Psc этот вывод подкрепляется и значительной интенсивностью рассеянного диском видимого излучения, определяемого по фотометрической и поляризационной переменности [20]. Вероятно, что фотометрическая активность также является следствием большой геометрической толщины плотных зон дисков, которая повышает вероятность благоприятной для обнаружения переменности ориентации диска.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Российский научный фонд (проект 14-50-00043) и за поддержку той части программы, которая посвящена исследованию экзопланет. Анализ результатов проведен при поддержке РФФИ (гранты 15-02-06178 и 15-02-09191).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. J. de Wit, V. P. Grinin, I. S. Potravnov, et al., *Astron. and Astrophys.* **553**, L1 (2013).
2. L. Meinunger, *Mitt. Veränderl. Sterne* **3**, 9 (1965).
3. В. П. Цесевич, Б. А. Драгомирецкая, *Звезды типа RW Возничего* (Наукова думка, Киев, 1973).
4. V. P. Grinin, N. N. Kiselev, G. P. Chernova, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **186**, 283 (1991).
5. Л. В. Тимошенко, *Астрофизика* **21**, 314 (1984).
6. A. F. Pugach and G. U. Kovalchuk, *Astron. and Astrophys.* **347**, 937 (1999).
7. G. U. Kovalchuk and A. F. Pugach, *Astron. and Astrophys.* **325**, 1077 (1997).
8. V. P. Grinin, I. S. Potravnov, and F. A. Musaeov, *Astron. and Astrophys.* **524**, A8 (2010).
9. I. S. Potravnov and V. P. Grinin, *Astronomy Letters* **39**, 776 (2013).
10. V. Pirola, *Observ. Astrophys. Labor. Univ. Helsinki Rep.* **6**, 151 (1984).
11. А. Ф. Пугач, *Антивспыхивающие звезды*, Препринт (Институт теоретической физики, Киев, 1981).
12. G. Helou and D. W. Walker, *Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases* (1988).
13. D. Ishihara, T. Onaka, H. Kataza, et al., *Astron. and Astrophys.* **514**, A1 (2010).
14. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, et al., *VizieR Online Data Catalog*, II/246 (2003).
15. A. J. Clarke, R. D. Oudmaijer, and S. L. Lumsden, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **363**, 1111 (2005).
16. R. M. Cutri, et al., *VizieR Online Data Catalog*, II/307 (2011).
17. J. Hernández, L. Hartmann, T. Megeath, et al., *Astrophys. J.* **662**, 1067 (2007).
18. C. Melis, B. Zuckerman, J. H. Rhee, and I. Song, *Astrophys. J.* **717**, L57 (2010).
19. P. Scicluna, G. Rosotti, J. E. Dale, and L. Testi, *Astron. and Astrophys.* **566**, L3 (2014).
20. D. N. Shakhovskoi, V. P. Grinin, and A. N. Rostopchina, *Astronomy Reports* **47**, 580 (2003).

Low-Mass Protoplanetary Disk of the Herbig Ae Star DD Ser: Thermal Radiation of Dust and Possible Presence of Massive Planets

K. A. Antonyuk, D. N. Shakhovskoy, S. P. Belan, and A. N. Rostopchina

We detected thermal IR radiation from DD Ser, a low-activity UX Ori-type star, the source of which is a disk with a complex structure (an inner ring with the dust temperature of about 900 K and an outer disk with the temperature below 300 K). The 15.1-year period, which we estimated from our long-term photometric observations, indicates the perturbation of this ring by a low-mass companion (a planet perhaps) with an orbital radius of 8 a.u. In general, the detected characteristics of the DD Ser disk (a dust ring with the density modulated with a 10-year scale period, the presence of compact dust clumps inside the ring's inner lobe) are almost identical to the characteristics of the RZ Psc disk, where an active asteroid belt inside the orbit of a planet or a similar low-mass companion is assumed. Although the suggestion about a collisional source of the dust in these systems is disputable, the complex structure of their disks, manifested in the IR spectrum shape and photometric variability, especially the long-period variability, gives evidence for massive planets already formed in these systems.

Keywords: *protoplanetary disks—planets and satellites: formation—planets and satellites: detection—stars: variables: T Tauri, Herbig Ae/Be—stars: individual: DD Ser*