

УДК 524.314-76

ОБНАРУЖЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДВОЙСТВЕННОСТИ (SB2) ЗВЕЗДЫ BD –6°1178 = IRAS 05238–0626

© 2008 В. Г. Клочкова^{1*}, Е. Л. Ченцов¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 27 марта 2008 г.; принята в печать 22 апреля 2008 г.

По спектрам высокого спектрального разрешения, полученным с эшелле спектрографом НЭС 6-метрового телескопа БТА, впервые обнаружена спектральная двойственность (SB2) звезды BD–6°1178, отождествляемой с ИК-источником IRAS 05238–0626. Компоненты имеют близкие спектральные классы и классы светимости F5 IV–III и F3 V. Для 4-х моментов наблюдений в 2004–2005 г.г. измерена гелиоцентрическая лучевая скорость обоих компонентов. Скорости вращения обеих звезд близки и составляют 24 и 19 км/с. Не подтверждена классификация BD–6°1178 как сверхгиганта на стадии перехода к планетарной туманности. BD–6°1178, вероятно, является молодой звездой до ГП. Не исключено ее членство в подгруппе 1c ассоциации Oгi OB1.

Key words: звезды — свойства и классификация

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной статье мы продолжаем публиковать результаты спектроскопии звезд с ИК-избытками (основные результаты см. в работах [1–5] и в ссылках, приведенных в них). Звезда BD–6°1178 является оптическим компонентом ИК-источника IRAS 05238–0626 (галактические координаты $l = 208.9^\circ$, $b = -21.8^\circ$). На основании наблюдаемого избытка излучения в области 12–60 мкм и с учетом положения на диаграмме ИК-цветов, этот объект считается кандидатом в протопланетарные туманности (PPN) [6–8]. Напомним, что, согласно современным представлениям (см., например, [9]), на кратковременной эволюционной стадии молодой планетарной (протопланетарной) туманности наблюдаются звезды промежуточных масс, которые эволюционируют от стадии асимптотической ветви гигантов (AGB) к стадии планетарной туманности. Исходная масса этих звезд на Главной Последовательности (ГП) находится в интервале 3–8 M_\odot . На стадии AGB эти звезды испытали большую потерю вещества в виде мощного звездного ветра, вследствие чего звезда на стадии PPN представляет собой вырожденное углеродно-кислородное ядро с типичной массой около 0.6 M_\odot , окруженное расширяющейся газопылевой оболочкой. Интерес астрономов к PPN обусловлен, во-первых, возможностью изучать потерю вещества за счет звездного ветра, а во-вторых, уникальной возможностью наблюдать результат звездного

нуклеосинтеза, процессов перемешивания и выноса в поверхностные слои продуктов ядерных реакций в ходе предшествующей эволюции звезды.

Действительно, среди изученных кандидатов в PPN были выявлены около дюжины объектов с избытками тяжелых металлов, синтез которых идет за счет нейтронизации ядер железа в условиях низкой плотности нейтронов (так называемый *s*-процесс). Из анализа свойств PPN выяснилось, что ожидаемые избытки элементов *s*-процесса наблюдаются только в атмосферах обогащенных углеродом (C-rich) звезд, в ИК-спектрах которых имеется эмиссия на длине волны 21 мкм [1, 5, 10, 11]. Подавляющее же число PPN не имеют ни избытка углерода (O-rich звезды), ни избытка тяжелых металлов (см., например, [1, 12, 13]). Обнаруженная корреляция между избытком тяжелых металлов в атмосфере звезды и особенностью ИК-спектра оболочки этой звезды требует объяснения, а, следовательно, и расширения выборки изученных PPN.

К настоящему времени о звезде BD–6°1178 известно немного. Видимые координаты на эпоху 2000 года: $\alpha = 05^h 26^m 19.8^s$, $\delta = -6^\circ 23' 57''$. Видимые звездные величины в фильтрах $V = 10.52^m$ и $B = 10.96^m$ [8]. Найдены признаки фотометрической переменности: по каталогу NSVS [14] средняя звездная величина в системе, близкой к фильтру R, меняется в интервале 10.78–10.87^m при средней ошибке порядка 0.01^m. Моделирование распределения энергии в видимой и ближней ИК областях спектра, полученного из многоцветной фотометрии,

*E-mail: valenta@sao.ru

дает величину эффективной температуры T_{eff} от 8000 К [6] до 7400 К [8], что соответствует поздним подклассам А — ранним подклассам F.

Что касается спектроскопии BD-6°1178, то пока опубликованы лишь спектры низкого разрешения, примерно 5 Å/пиксель. По ним получены следующие оценки спектрального класса: F2 II [7], F4 [15], F5 [16]. С учетом вышесказанного, становится очевидной необходимость детального изучения оптического спектра звезды. В данной статье мы представляем результаты многократных спектральных наблюдений BD-6°1178 с высоким спектральным разрешением, выполненных на 6-м телескопе БТА. Цель нашего исследования — двумерная количественная спектральная классификация, поиск вероятной спектральной переменности, изучение поля скоростей в атмосфере и оболочке звезды, а также уточнение ее эволюционного статуса. В разделе 2 кратко описаны методы наблюдений и редукиции, в разделе 3 мы приводим и анализируем полученные наблюдательные данные и в разделе 4 кратко суммируем основные результаты.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

Спектральные данные для BD-6°1178 получены в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопе БТА Специальной Астрофизической Обсерватории РАН с эшелльным спектрографом НЭС [17]. Наблюдения выполнены с использованием крупноформатной ПЗС-матрицы 2048 × 2048 элементов и с резателем изображений [17]. Спектральное разрешение составляет 60000. Экстракция данных из двумерных эшелле-спектров выполнена с помощью модифицированного [18] контекста ECHELLE комплекса программ MIDAS. Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух спектров, полученных последовательно один за другим. Калибровка по длинам волн осуществлялась с использованием спектров Th-Ag лампы с полым катодом. Полученные по этим спектрам и приводимые ниже в Табл. 1 лучевые и ротационные скорости найдены путем совмещения прямых и зеркальных изображений профилей линий. Контроль и коррекция инструментального рассогласования спектров звезды и лампы с полым катодом выполнены по теллурическим линиям O₂ и H₂O, остаточные систематические ошибки не превышают ошибок измерения (около 1 км/с по одной линии).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Спектральная двойственность

Основной результат нашей работы заключается в том, что мы впервые выявили двойственность

BD-6°1178. Это двухспектровая спектрально-двойная с довольно узкими хорошо разделяемыми линиями. Как видно из Табл. 1, максимальный зафиксированный нами взаимный сдвиг спектров компонентов около 120 км/с, что по крайней мере в 5 раз превышает ширину линий. Глубины абсорбций в спектрах компаньонов, а, следовательно, и их спектральные классы и светимости, близки друг к другу. Первым назван компаньон, в спектре которого абсорбции несколько глубже и шире (центральные глубины больше в среднем на 8%, ширины — на 25%, эквивалентные ширины — на 35%). На Рис. 1 показаны спектры вблизи линии D2 NaI для разных дат наблюдений. Гелиоцентрические лучевые скорости для межзвездных компонентов: $V_r = 4$ и 20 км/с.

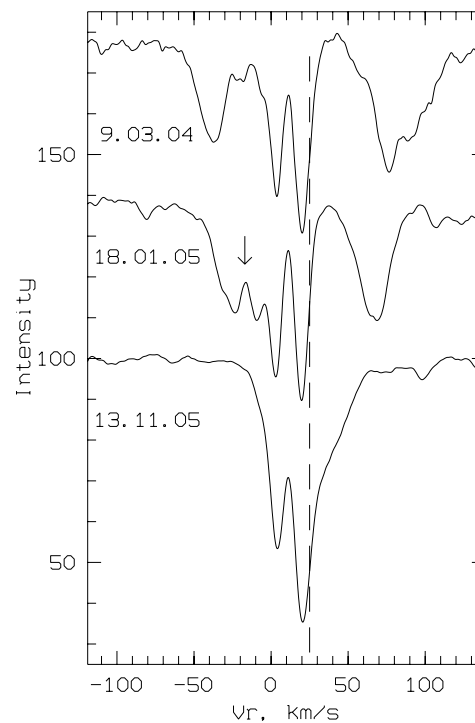


Рис. 1. Сопоставление спектров BD-6°1178 вблизи линии D2 NaI. Стрелкой на спектре 18.01.05 помечена теллурическая эмиссия. Вертикальной штриховой линией указана принятая величина системной скорости $V_{sys} \approx 25$ км/с.

Дифференциальные сдвиги заметны только у линии H β и H α . У H β сдвиги невелики и могут быть следствием блендирования широких компонентов, в спектре от 24.09.05 скорости для компонентов абсорбции H β составили 87 и -20 км/с, а от 13.11.05 скорость для ядра нерасщепленной абсорбции составила 26 км/с. В случае H α рас-

Таблица 1. Журнал наблюдений BD-6°1178, средние гелиоцентрические лучевые скорости V_r для обоих компонентов; в скобках указаны скорости вращения $V \sin i$.

Дата	JD	$\Delta\lambda, \text{\AA}$	$V_r (V \sin i), \text{ км/с}$
9.03.04	074.2	5300–6770	85 (24) –36 (18)
18.01.05	389.2	5300–6770	–20 (24) 66 (19)
24.09.05	637.5	4190–5520	84 (24) –34 (20)
13.11.05	688.4	4560–6010	21 (25:) 33: (–)

цепление исчезает, возможно, из-за более сложной формы профилей компонентов. В зарегистрированной нами области спектра это единственная линия, в которой можно предполагать присутствие эмиссии. Иначе трудно объяснить резкое различие формы профилей $H\alpha$ и $H\beta$ (см. Рис. 2), которые в спектрах обычных F-звезд мало отличаются друг от друга (что демонстрируют, например, спектральные атласы высокого разрешения [19, 20]).

У нас нет спектров, содержащих обе эти линии, но мы можем сопоставить их профили в близких фазах: $H\alpha$ 9.03.04 и $H\beta$ 24.09.05. На Рис. 2 они наложены друг на друга, вертикальной прямой отмечена предполагаемая γ -скорость системы ($V_{sys} \approx 25 \text{ км/с}$). В профиле $H\beta$ от 24.09.05 хорошо видны оба компонента, их вклады в общий профиль различаются больше, чем у остальных линий, 1-й ($V_r = 87 \text{ км/с}$) глубже 2-го ($V_r = -20 \text{ км/с}$) на 22%. Профиль $H\alpha$ от 9.03.04 асимметричен, поглощение в его красной половине значительно сильнее, чем в синей. Ясно виден только 1-й компонент (скорость по нему 75 км/с), он глубже, чем у $H\beta$; 2-й компонент, возможно, содержит эмиссию, поднимающуюся до уровня континуума на $V_r \approx -130 \text{ км/с}$.

3.2. Спектральная классификация

Двумерная спектральная классификация F-звезд довольно сложна. Наш материал позволяет выполнить ее, сопоставляя интенсивности линий нейтральных металлов и их ионов. Калибровочные кривые для пар линий (FeII 4731/FeI 4737, FeII 4924/FeI 4921 и др.) строились по спектрам высокого разрешения из атласа Ключковой и др. [20] и из библиотеки ELODIE.3 [21]. Для примера на Рис. 3 приведена зависимость отношения центральных глубин абсорбций от спектрального класса и класса светимости для пары линий FeII 4924 \AA и FeI 4921 \AA .

Отношения глубин абсорбций FeII/FeI, свойственные спектру BD-6°1178, наблюдаются в интервале классов МК от F4V до G0I. Но показатель цвета BD-6°1178 ($B-V \approx 0.44-0.47$) ограничивает

спектральный класс: он должен быть не позднее F6 V-III или F7 II-I, поэтому вариант сверхгиганта должен быть отброшен. Это видно и из спектра низкого разрешения BD-6°1178, приведенного в статье [7]: бленда ИК-триплета кислорода OI 7774 \AA в нем значительно слабее, чем в спектрах F-сверхгигантов. По нашему спектру от 13.11.05 (фаза, близкая к соединению компонентов) средний спектральный класс системы F5 IV, по остальным спектрам для главного компонента спектральный класс немного позднее, а светимость выше, чем для вторичного: F5IV-III и F3V, соответственно. Межзвездное поглощение мало, причем не только для BD-6°1178 (не более 0.15^m), но и для соседних звезд. С его учетом и, конечно, с учетом двойственности звезды, расстояние до нее около 450 пк.

В спектре сверхгиганта на стадии post-AGB можно было бы ожидать аномальных значений эквивалентных ширин линий химических элементов, содержания которых подвержены изменениям в ходе эволюции звезды. Это относится прежде всего к элементам CNO-группы и тяжелым металлам, ядра которых синтезируются в процессах медленной нейтронизации (Sr, Y, Zr, Ba). Однако, сопоставляя спектр BD-6°1178 со спектрами непроэволюционировавших звезд близких спектральных классов, мы не нашли серьезных различий. Для иллюстрации на Рис. 4 сопоставлены фрагменты спектров BD-6°1178 и Проциона (F5IV-V), содержащие линии BaII $\lambda 5853 \text{\AA}$ и Si $\lambda 5380 \text{\AA}$. Таким образом мы получили дополнительное подтверждение нашей спектральной классификации BD-6°1178 как системы из звезд низкой светимости.

3.3. Проблема эволюционного статуса BD-6°1178

Выше мы отмечали ограниченность опубликованных сведений о BD-6°1178. Необходимо также подчеркнуть противоречивость определений расстояния до звезды и ее эволюционного статуса: Фьюджи и др. [8] классифицировали BD-6°1178 как post-AGB звезду на расстоянии около 10 кпк,

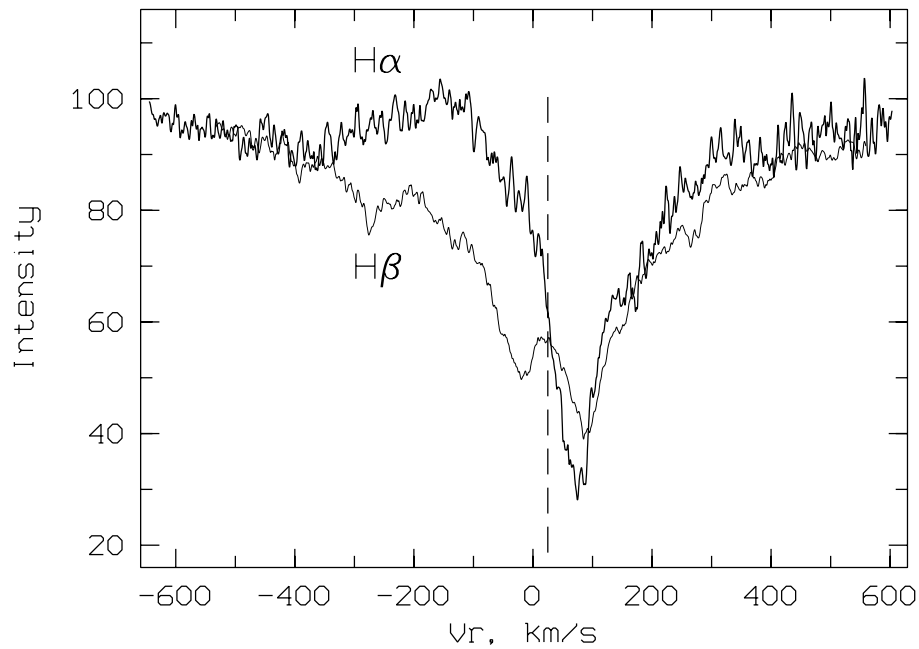


Рис. 2. Профили линий $H\alpha$ (9.03.04) и $H\beta$ (24.09.05, тонкая линия). Вертикальной штриховой линией указана принятая величина $V_{sys} \approx 25$ км/с.

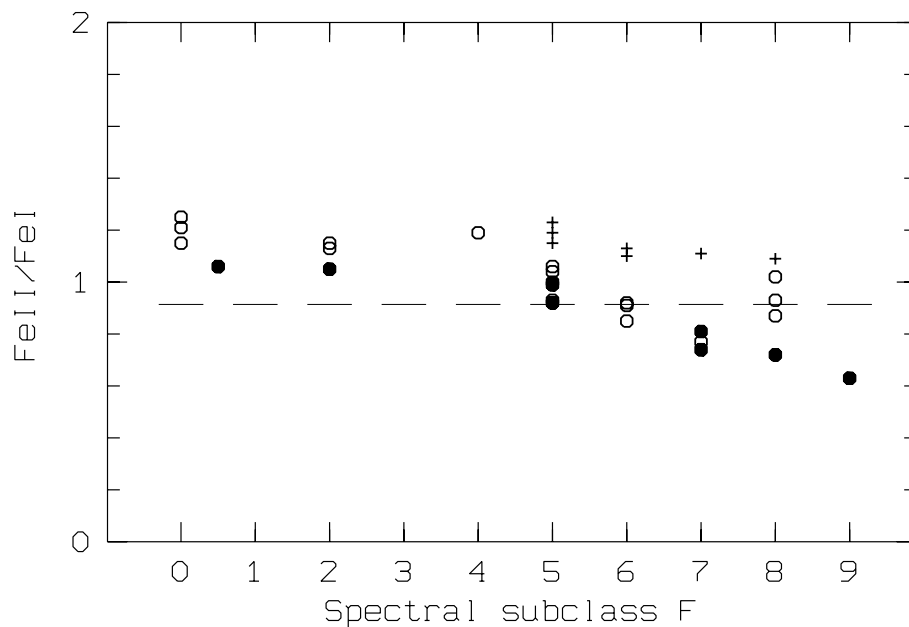


Рис. 3. Зависимость отношения центральных глубин абсорбций $R(\text{FeI } 4924)/R(\text{FeI } 4921)$ от спектрального класса и класса светимости. Заполненные кружки — класс светимости V, открытые — IV–III, крестики — II–I. Штриховой линией нанесено отношение глубин для BD–6°1178 в фазе слияния компонентов 13.11.05.

в то время как Суарец и др. [15] по оптическим спектрам низкого разрешения отнесли ее к молодым звездам. Наша оценка расстояния до этой пары — порядка 450 пк — согласуется с результатами из [15].

Гарсиа-Ларио и др. [22] получили и проанализировали фотометрические данные в ближнем ИК-диапазоне для обширной выборки из 225 источников, включая источник IRAS 05238–0626. Оказалось, что на двухцветной диаграмме (H–K, J–H)

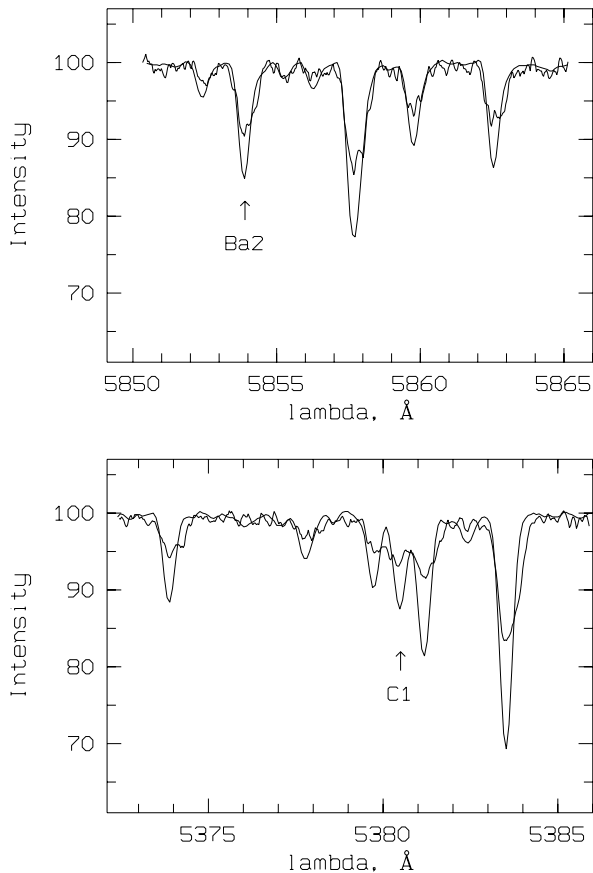


Рис. 4. Линии Ba II $\lambda 5853 \text{ \AA}$ и Si I $\lambda 5380 \text{ \AA}$ в спектрах BD $-6^{\circ}1178$ (13.11.05, толстая линия) и Прокциона (тонкая линия).

IRAS 05238–0626 попадает в область, преимущественно заселенную post-AGB звездами. Однако, в этой области не исключено присутствие и молодых звезд типа T Tau и Ae/Be Хербига. В связи с этим авторы [22] пришли к выводу о неопределенности эволюционного статуса IRAS 05238–0626: или post-AGB, или T Tau.

В Табл. 4 работы [8], где дана сводка параметров 26 кандидатов в PPN, источник IRAS 05238 – 0626 выделяется достаточно высокой эффективной температурой и низким темпом потери вещества. Последнее обстоятельство противоречит тому, что на диаграмме ИК-цветов Вена-Хабинга [23] этот источник попадает в область IV. По определению [23], в этой области диаграммы локализованы переменные звезды с большой потерей вещества, создающей мощную околозвездную оболочку. Кроме того, источник IRAS 05238 – 0626 отличается от типичных PPN и низким ИК-поток. Поток в полосе $\lambda 12 \text{ мкм}$ $F_{12}=0.59 \text{ Jy}$, что на 1–1.5 порядка ниже, чем у таких хорошо изученных post-AGB объектов, как IRAS 04296+3429

($F_{12}=12.74 \text{ Jy}$), IRAS 23304+6147 ($F_{12}=8.56 \text{ Jy}$), IRAS 07331+0021 ($F_{12}=15.32 \text{ Jy}$).

Редди и Партасарати [7], изучив выборку из 14 кандидатов в PPN, в том числе и BD $-6^{\circ}1178$, пришли к выводу, что BD $-6^{\circ}1178$ — это далеко проэволюционировавшая post-AGB звезда, у которой наблюдается остывший остаток околозвездной оболочки. Принимая типичную для post-AGB звезды массу ядра $0.6 M_{\odot}$, Редди и Партасарати [7] пришли к высокой оценке светимости $\lg(L/L_{\odot}) = 3.79$ и, соответственно, к большой удаленности звезды от Солнца (7 кпк). При этом авторы [7] отметили отсутствие источников молекулярного излучения, ассоциированных с BD $-6^{\circ}1178$, в то время как для post-AGB звезд характерно присутствие теплового и мазерного излучения молекул CO, SiO, H₂O и др. (см. ссылки в обзорах [10, 24]). Например, уже упомянутые нами ИК-источники IRAS 04296+3429 и 23304+6147 являются мощными источниками CO-излучения [25]. Более того, наличие молекулярных деталей, сменяющих друг друга в ходе эволюции PPN, позволило Льюису [26] проследить закономерности в хронологической последовательности молекулярных спектров у звезд в разных фазах эволюции после AGB.

С учетом перечисленных фактов и результатов нашей спектральной классификации, мы предположили, что спектрально-двойная звезда BD $-6^{\circ}1178$ (F5 IV–III + F3V) может быть молодым объектом диска Галактики. Обратим внимание на то, что координаты и расстояние порядка 450 пк позволяют заподозрить принадлежность BD $-6^{\circ}1178$ к ассоциации Ogi OB1. Согласно сводке [27] расстояний до звездных ассоциаций, определенных по данным Hipparcos, подгруппа 1c в ассоциации Ogi OB1 удалена от Солнца на 506 ± 37 пк. Отметим также, что принятая величина V_{sys} и измеренные скорости для компонентов межзвездных линий NaI(1) не противоречат значениям скоростей (15–28 км/с), взятым из базы данных SIMBAD для 19 звезд в радиусе 2.5° от BD $-6^{\circ}1178$ в интервале расстояний 0.2–0.7 кпк.

Ранее Торрес и др. [16], исследуя выборку кандидатов в звезды типа T Tau, включили в нее и BD $-6^{\circ}1178$. На основе анализа спектральных и фотометрических данных, они нашли 17 новых звезд типа T Tau и 13 новых звезд типа Ae/Be Хербига. Однако ни в одну из этих групп они не смогли включить BD $-6^{\circ}1178$, отнеся ее к группе объектов смешанного типа (“miscellaneous”).

В целом, мы не видим оснований относить BD $-6^{\circ}1178$ к звездам на стадии post-AGB. Отметим также, что обнаружение спектральной двойственности типа SB2 дает нам дополнительный повод сомневаться в классификации BD $-6^{\circ}1178$

как post-AGB звезды, поскольку среди известных звезд на этой эволюционной стадии нет двойных SB2. Ряд post-AGB звезд являются двойными системами SB1. Природа невидимого компаньона неизвестна, так как его спектральные детали в спектрах двойных post-AGB звезд не наблюдаются. Хорошо изученным [28] примером двойной системы среди post-AGB звезд может служить HD 101584. Эта система содержит горячую post-AGB звезду B9II и маломассивный компаньон неизвестной природы. Это может быть либо белый карлик, либо маломассивная звезда GP [28].

4. ВЫВОДЫ

Результаты количественной спектральной классификации звезды BD-6°1178 привели к выводу о ее спектральной двойственности. Оба компонента являются F-звездами: F5IV-III + F3V. Для 4-х моментов наблюдений измерены величины гелиоцентрической лучевой скорости обоих компонентов двойной системы. Мы не получили оснований для классификации BD-6°1178 как post-AGB звезды. Координаты BD-6°1178 и расстояние до нее 450 пк позволяют предположить ее членство в ассоциации Ogi OB1. Таким образом, BD-6°1178 может быть молодым объектом диска Галактики на стадии до GP.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны В. Е. Панчуку и М. В. Юшкину за помощь в наблюдениях на БТА. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 08-02-00072 а), программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Протяженные объекты во Вселенной” и программы Президиума РАН “Происхождение и эволюция звезд и галактик”. В работе использованы базы данных SIMBAD и CDS Страсбургского центра астрономических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. G. Klochkova, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **272**, 710 (1995).
2. V. G. Klochkova, R. Szczerba, V. E. Panchuk and K. Volk, Astronom. and Astrophys. **345**, 905 (1999).
3. В. Г. Клочкова, Р.Щерба, В. Е. Панчук, Письма в АЖ **26**, 115 (2000).
4. В. Г. Клочкова, Р.Щерба, В. Е. Панчук, Письма в АЖ **26**, 510 (2000).

5. V. G. Klochkova and T. Kipper, Baltic Astron. **15**, 395 (2006).
6. P. Garcia-Lario, A. Manchado, S. R. Pottash, et al., Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. **82**, 497 (1990).
7. B. E. Reddy and M. Parthasarathy, Astronom. J. **112**, 2053 (1996).
8. T. Fujii, Y. Nakada and M. Parthasarathy, Astronom. and Astrophys. **385**, 884 (2002).
9. T. Blöcker, Astrophys. and Space Sci. **275**, 241 (2001).
10. V. G. Klochkova, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **44**, 127 (1997).
11. L. Decin, H. Van Winckel, C. Waelkens and E. J. Bakker, Astronom. and Astrophys. **332**, 928 (1998).
12. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, E. L. Chentsov and M. V. Yushkin, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **62**, 217 (2007).
13. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, Н. С. Таволжанская, Pis'ma Astronom. Zh. **28**, 49 (2002).
14. P. R. Wozniak, W. T. Vestrand, C. W. Akerlof, et al., Astronom. J. **127**, 2436 (2004).
15. O. Suárez, P. Garcia-Lario, A. Manchado, et al., Astronom. and Astrophys. **458**, 173 (2006).
16. C. A. O. Torres, G. Quast, A. de la Reza, et al., Astronom. J. **109**, 2146 (1995).
17. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin and I. D. Najdenov, in *The UV Universe: stars from birth to death. Proceedings of the Joint Discussion No.4 during the IAU General Assembly of 2006*. Eds. A. I. Gomez de Castro and M. A. Barstow., p. 179 (2007).
18. М. В. Юшкин, В.Г. Клочкова, Препринт №206 (САО РАН, Нижний Архыз, 2005).
19. D. Montes and E. L. Martin., Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. **128**, 485 (1998).
20. V. G. Klochkova, G. Zhao, V. E. Panchuk and S. V. Ermakov., Chinese J. Astronom. and Astrophys. **4**, 279 (2004).
21. P. Prugniel and C. Soubiran, astro-ph/0409214.
22. P. Garcia-Lario, A. Manchado, W. Pych and S. R. Pottash, Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. **126**, 479 (1997).
23. W. E. C. J. van der Veen and H. J. Habing, Astronom. and Astrophys. **194**, 125 (1988).
24. S. Kwok, Astronom. Astrophys. Rev. **31**, 63 (1993).
25. B. J. Hrivnak and J. H. Bieging, Astrophys. J. **624**, 331 (2005).
26. B. M. Lewis., Astrophys. J. **338**, 234 (1989).
27. P. T. de Zeeuw, R. Hoogerwerf and J. H. J. de Bruijne, Astrophys. J. **117**, 354 (1999).
28. E. J. Bakker, H. J. G. L. M. Lamers, L. B. F. M. Waters, et al., Astronom. and Astrophys. **307**, 869 (1996).

**DETECTION OF THE SPECTROSCOPIC BINARY (SB2) NATURE OF
BD $-6^{\circ}1178 =$ IRAS 05238–0626****V. G. Klochkova, E. L. Chentsov**

The star BD $-6^{\circ}1178$, which is identified with the IRAS 05238–0626 source, is shown for the first time to be a spectroscopic binary (SB2) by analyzing the high-resolution spectra taken with the NES echelle spectrograph of the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. The components of the binary have close spectral types and luminosity classes: F5 IV–III and F3 V. The heliocentric radial velocities are measured for both components at four time instants in 2004–2005. The two stars have close rotation velocities, which are equal to 24 and 19 km/s. We do not confirm the classification of BD $-6^{\circ}1178$ as a supergiant in the state of becoming a planetary nebula. BD $-6^{\circ}1178$ probably is a young pre-MS stars. It is possibly a member of the 1c subgroup of the Ori OB1 association.