ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ПРЕДКАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

В. В. Шиманский[1], Н. В. Борисов[2], И. Ф. Бикмаев[1], Д. Н. Нуртдинова[1], С. А. Позднякова[1], В. В. Власюк[2], А. И. Галеев[1], Н. А. Сахибуллин[1], О. И. Спиридонова[2], Н. Н. Шиманская[1]

© 2009

[1] *Казанский государственный университет, Казань, Россия*
e-mail: `Slava.Shimansky@ksu.ru`

[2] *Специальная астрофизическая обсерватория, Н. Архыз, Россия*

В работе выполнено исследование четырех новых двойных систем с их классификацией и определением наборов фундаментальных параметров. Показано, что объекты Abell 65 и HS 1857+5144 являются молодыми предкатаклизмическими переменными (ПП), SDSS J172406+562003 – старой ПП, а SDSS J143947-010606, вероятно, – катаклизмической в высоком состоянии.

ВВЕДЕНИЕ

Предкатаклизмические переменные являются одним из классов тесных двойных систем (ТДС), однократно прошедших стадию общей оболочки, и характеризуются полным разделением компонентов и отсутствием явления аккреции [1]. Всесторонние исследования данных систем были начаты только в конце 90-х годов прошлого столетия, однако к настоящему времени для значительной части объектов уже определены наборы фундаментальных параметров, условия формирования видимого излучения и внутренние физические процессы. В результате проведена [2] их внутренняя классификация на старые ПП и молодые ПП с sdB, sd0 и DAO главными компонентами. Последние две группы включают относительно небольшое число известных объектов, многие из которых достаточно изучены. Поэтому актуальной становится проблема поиска новых систем подобного типа, их классификация и комплексное исследование излучения. При этом особенно эффективными оказываются наблюдения и анализ источников жесткого излучения из обзоров [3, 4] и ядер планетарных туманностей [5]. В рамках данной работы мы провели подобные исследования для объектов Abell 65, HS 1857+5144, SDSS J172406+562003 (далее – SDSS J172406), SDSS J143947-010606 (далее – SDSS J143947) и показали их принадлежность к ТДС разных классов.

НАБЛЮДЕНИЯ

Спектры умеренного разрешения всех объектов получены в 2006–2009 гг. с применением редуктора светосилы SCORPIO [6] в режиме спектроскопии с длинной щелью и EEV 42-40 ПЗС-приемника (2048×2048), установленных в первичном фокусе телескопа БТА САО РАН. При наблюдениях использовалась гризма VPHG1200g (1200 штрихов/мм), обеспечивающая разрешение $\Delta\lambda = 5.5$ Å в интервале длин волн $\Delta\lambda$ 3950–5700 Å при среднем отношении сигнал/шум S/N = 45–80. В результате наблюдений, проводимых в хороших и удовлетворительных климатических условиях, получены 31 спектрограмма Abell 65, 28 – HS 1857+5144, 23 – SDSS J172406, 22 – SDSS J143947 с одинаковой продолжительностью экспозиций в 300 секунд. Для выполнения калибровок длин волн и потоков излучения одновременно регистрировались спектры Ar–Ne–He-лампы и стандартов HZ 44 и BD $+28.^\circ4211$ из обзора [7]. Результаты наблюдений обработаны с использованием пакета редукции астрономических данных системы IDL, разработанного и предоставленного нам В. Л. Афанасьевым, и отнормированы с применением графического пакета Origin 4.0. Примеры наблюдаемых спектров двух систем для разных фаз орбитальных периодов представлены на рис. 1.

Фотометрические наблюдения Abell 65 проводились на телескопе РТТ150 в Национальной обсерватории ТЮБИТАК в 2005–2007 гг. с использованием ПЗС-матрицы ANDOR (2048×2048 пикселов) с термоэлектрическим охлаждением и прибора TFOSC, оснащенного азотно-охлаждаемой ПЗС-матрицей. Всего получено 896 изображений в полосе V с продолжительностью экспозиций в 60 секунд и длиной наблюдательного ряда более 22 часов. Наблюдения остальных систем выполнены в 2007–2009 гг. на

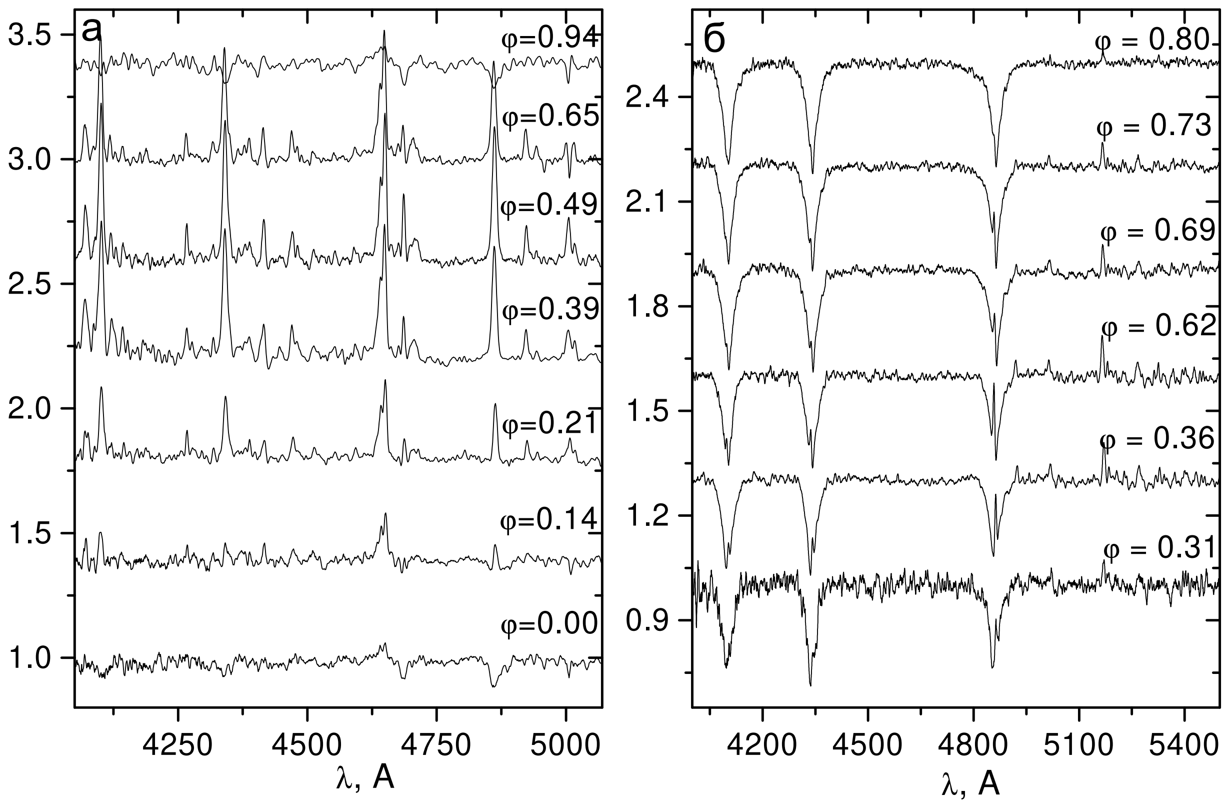

Рис. 1. Наблюдаемые спектры Abell 65 (*а*) и SDSS J172406 (*б*) для различных фаз. Спектры имеют последовательный сдвиг вдоль вертикальной оси на 0.4

мультиполосном фотометре телескопа Цейс-1000 САО РАН одновременно в полосах B, V и R с применением матрицы EEV CCD 42-40 азотного охлаждения размером 2068×2048 пикселов. В результате получено по 64 ПЗС-изображения HS 1857+5144, 138 – SDSS J172406, 63 – SDSS J143947 в каждой фотометрической полосе с продолжительностью экспозиций 60 с (полосы R и V) и 120 с (полоса B). Все фотометрические данные обработаны с применением пакета Maxim DL. Сравнение блеска постоянных звезд в поле ПЗС-изображений показало, что ошибки дифференциальной фотометрии Abell 65 составляют до $\Delta m_V = 0.05^m$, а остальных систем – $\Delta m_V = 0.02^m$–0.03^m.

ЭФЕМЕРИДЫ И ОРБИТАЛЬНЫЕ ПЕРИОДЫ

Эфемериды всех объектов найдены на основе анализа фотометрических наблюдений с их последующим частичным уточнением при исследовании кривых лучевых скоростей. Эфемерида HS 1857+5144

$$HJD = 2452831.5475\ (\pm\ 0.0017) + 0.26633331\ (\pm\ 0.0000001) \cdot E$$

вычислена на основе сравнения моментов минимумов ее блеска, полученных из наших наблюдений и наблюдений, опубликованных в работе Юнгеровита и др. [8].

Для получения эфемерид и орбитальных периодов остальных объектов использована программа WINEFK В. Горанского (ГАИШ). Поиск значений периодов проводился в диапазоне $P_{\rm orb} = 0.2^d - 1.5^d$ с шагом $\Delta P_{\rm orb} = 0.0000001^d$. В результате получены следующие эфемериды:

$$HJD = 2454300.298\ (\pm\ 0.001) + 1.003729\ (\pm\ 0.000007) \cdot E \qquad \text{для Abell 65},$$

$$HJD = 2454772.0956\ (\pm\ 0.0007) + 0.333013\ (\pm\ 0.000002) \cdot E \qquad \text{для SDSS J172406},$$

$$HJD = 2454913.2033\ (\pm\ 0.0005) + 0.278703\ (\pm\ 0.000004) \cdot E \qquad \text{для SDSS J143947}.$$

Примеры итоговых кривых блеска для двух систем представлены на рис. 2.

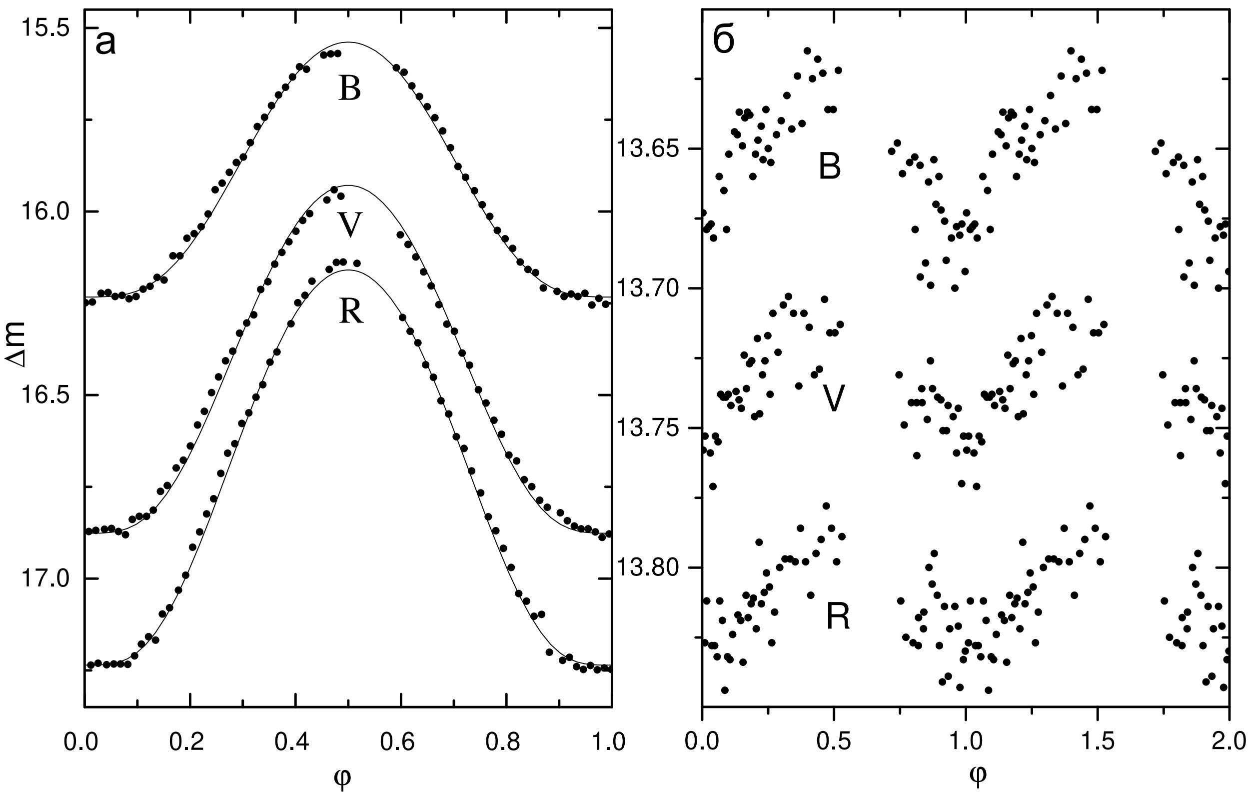

Рис. 2. Наблюдаемые точки и теоретические (линии) кривые блеска HS 1857+5144 (*а*) и SDSS J143947 (*б*)

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ И ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

В спектрах Abell 65 и HS 1857+5144 (рис. 1) наблюдаются узкие и сильные эмиссионные линии H I, He I и тяжелых элементов в высоких стадиях ионизации, характерные для излучения молодых ПП типа BE UMa и V664 Cas [9]. Анализ этих линий указывает на строгую корреляцию их интенсивностей с блеском объектов, что характерно для действия эффектов отражения излучения горячих компонентов на поверхности холодных спутников. Одновременно наличие эмиссионной линии He II $\lambda\,4686$Å в спектрах Abell 65 говорит о более сильных эффектах облучения в данной системе. Кроме того, в спектрах обоих объектов вблизи фаз минимума блеска наблюдаются абсорбционные профили линий H I и He II, формирующиеся на поверхности главных компонентов. Их форма и интенсивность свидетельствуют о существовании в HS 1857+5144 горячего белого карлика типа DAO, а в Abell 65 – sdO-субкарлика, что согласуется с наличием у системы планетарной туманности. В целом спектры позволяют однозначно классифицировать Abell 65 и HS 1857+5144 как молодые ПП с мощными эффектами отражения.

В наблюдаемых спектрах SDSS J172406 доминируют (рис. 1) мощные линии поглощения бальмеровской серии, характерные для излучения белых карликов умеренных температур ($T_{эф} = 35\,000$–$45\,000$ K). Их меньшая интенсивность в спектрах SDSS J143947 указывает на более высокую температуру белого карлика или на доминирование в спектрах горячего аккреционного диска. Одновременно в фазах максимума блеска наблюдаются и слабые узкие эмиссионные ядра линий H I, He I и атомов металлов. Отношение их интенсивностей в спектрах SDSS J172406 хорошо согласуется с аналогичными данными для старых ПП типа LM Com. В спектрах SDSS J143947 эмиссионная бленда MgFe $\Delta\lambda = 5165$–5175 Å полностью отсутствует, а линии He I усиливаются. Таким образом, на основании анализа наблюдаемых спектров SDSS J172406 классифицирована нами как старая ПП с умеренно горячим белым карликом, а SDSS J143947 – как ТДС класса старых ПП или катаклизмических переменных с малым углом наклона аккреционного диска.

Измерение лучевых скоростей V_r вторичных компонентов Abell 65 и HS 1857+5144 выполнено при анализе доплеровских смещений эмиссионных линий He I, C II, C III, O II, а главного компонента HS 1857+5144 – абсорбционной линии He II $\lambda\,4686$ Å методом кросс-корреляции спектров. Для определения

V_r главных компонентов SDSS J172406 и SDSS J143947 использовались абсорбционные части профилей линий H_β, H_γ, а их вторичных компонентов – эмиссионные линии H I, He I, Fe I и Mg I. В дальнейшем полученные значения V_r были скорректированы за учет эффектов блендирования и различий скоростей вторичного компонента и горячего пятна на его поверхности, а их зависимости от фаз орбитальных периодов аппроксимированы в рамках моделей круговой и эллиптической орбит. В результате были найдены следующие наборы амплитуд лучевых скоростей: $K_1 = 131.8 \pm 4.0$ км/с и $K_2 = 199.2 \pm 3.6$ км/с для HS 1857+5144, $K_2 = 121.3 \pm 4.1$ км/с для Abell 65, $K_1 = 50.9 \pm 3.7$ км/с и $K_2 = 129.2 \pm 4.2$ км/с для SDSS J172406, $K_2 = 157.8 \pm 7.2$ км/с для SDSS J143947. Последующее моделирование кривых блеска Abell 65, HS 1857+5144 и SDSS J172406 позволило определить углы наклона их орбит как $i = 69° \pm 2°$, $i = 75° \pm 3°$ и $i = 36° \pm 2°$ соответственно. В результате мы получили следующие оценки масс компонентов: $M_1 = 0.61 \pm 0.04\,M_\odot$ и $M_2 = 0.41 \pm 0.03\,M_\odot$ для HS 1857+5144, $M_1 = 0.56 \pm 0.04\,M_\odot$ и $M_2 = 0.33 \pm 0.06\,M_\odot$ для Abell 65, $M_1 = 0.57 \pm 0.05\,M_\odot$ и $M_2 = 0.23 \pm 0.03\,M_\odot$ для SDSS J172406.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ КРИВЫХ БЛЕСКА

Наблюдаемые кривые блеска Abell 65, HS 1857+5144 и SDSS J172406 имеют форму, близкую к синусоидальным с амплитудами, возрастающими в красной области спектра (рис. 2). Такой характер изменений полностью соответствует действию эффектов отражения в системах, где в оптическом диапазоне доминирует излучение главного компонента. Для определения параметров систем мы выполнили теоретическое моделирование их спектров и кривых блеска и согласовали их с наблюдаемыми. Расчеты проведены с применением программного комплекса SPECTR [2], реализующего метод моделирования атмосфер и спектров звезд с внешним облучением в двухпотоковом приближении [10, 11]. Он предусматривает определение форм поверхностей звезд в ТДС, определение для набора площадок на их поверхности локальных параметров внешнего облучения и атмосферы, моделирование ее структуры и расчет излучаемых ей потоков. Последующее суммирование излучений площадок с учетом условий их видимости позволяет получить спектры излучения и кривые блеска ТДС. Угол наклона орбиты системы, температуры и радиусы компонентов являются в данном моделировании свободными параметрами и могут быть найдены при согласовании теоретических и наблюдаемых данных. В рамках работы мы варьировали их значения для воспроизведения формы и амплитуд наблюдаемых кривых блеска изучаемых систем. Нами получены следующие результаты:

1. Главным компонентом Abell 65 является sdO-субкарлик с $T_{эф}(1) = 102\,000 \pm 8\,000$ K и $R_1 \approx 0.12\,R_\odot$, находящийся в конечной фазе сжатия к стадии белого карлика. Вторичный компонент системы ($T_{эф}(2) = 4950 \pm 250$ K и $R_2 = 0.59\,R_\odot$) обладает 12-кратным избытком светимости относительно звезд ГП аналогичной массы, что характерно для эволюционно близких ПП V477 Lyr и V664 Cas. Время жизни системы после выхода из стадии общей оболочки составляет $t \approx 130\,000$ лет.
2. В HS 1857+5144 главный компонент принадлежит к классу остывающих DAO-карликов с $T_{эф}(1) = 80\,000 \pm 10\,000$ K и $R_1 \approx 0.02\,R_\odot$ с наличием в атмосфере существенной доли гелия и тяжелых элементов. Избыток светимости вторичного компонента ($T_{эф}(2) = 4300 \pm 200$ K и $R_2 = 0.31\,R_\odot$) не превышает 30%, что объясняется значительным временем его эволюции после выхода из стадии общей оболочки ($t \approx 900\,000$ лет).
3. Белый карлик, являющийся главным компонентом SDSS J172406, – один из самых горячих ($T_{эф}(1) = 37\,500$ K) среди известных старых ПП. Параметры вторичного компонента ($T_{эф}(2) < 3400$ K и $R_2 \approx 0.19\,R_\odot$) соответствуют параметрам звезд ГП солнечной или близкой металличности. В кривых блеска SDSS J172406 наблюдаются нерегулярные изменения малой амплитуды, характерные для холодных звезд с сильным магнитным полем и запятненностью поверхности. Это может свидетельствовать о наличии сильных магнитных полей у вторичных компонентов сразу после их выхода из стадии общей оболочки, т. е. о их реликтовой природе.

Кривая блеска SDSS J143947 характеризуется значительной продолжительностью фаз максимума и ростом амплитуды изменений в синем диапазоне спектра. Подобный характер вариаций блеска не совместим с действием эффектов отражения в модели ПП. Возможно, они связаны с колебаниями аккреционного диска значительной оптической толщины относительно картинной плоскости. Поэтому мы пришли к выводу, что SDSS J143947, вероятно, является катаклизмической переменной в высоком состоянии с малым углом наклона орбиты. Дальнейшие исследования этого объекта остаются актуальными для окончательной его классификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования Abell 65 и HS 1857+5144 позволяют расширить список молодых ПП с полным набором известных параметров до девяти объектов. Анализ характеристик их главных и вторичных компонентов позволяет сделать следующие выводы:

1. Параметры главных компонентов согласуются с прогнозами теории эволюции одиночных ядер планетарных туманностей [12].
2. В окрестности Солнца (до 2 кпк) существует несколько сотен неоткрытых молодых ПП, содержащих горячие DAO-карлики в качестве главных компонентов.
3. Вторичные компоненты систем обладают избытками светимости, амплитуда которых уменьшается со временем эволюции систем после выхода из стадии общей оболочки. Анализ зависимости избытков светимости от возраста показывает, что около 70% избыточной энергии в недрах вторичных компонентов аккумулировано в виде энергии излучения.

Анализ двух новых ТДС из обзора SDSS показывает, что часть объектов, предварительно классифицированных как ПП, может являться объектами других типов. Найденный набор параметров SDSS J172406 и флуктуации в ее кривой блеска указывают на возможность существования магнитных полей у достаточно молодых ПП со временем существования до 5 млн лет.

Исследования, проведенные в рамках данной работы, поддержаны Комитетом по тематике больших телескопов САО РАН (КТБТ) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (09–02–97017–р) и Программы “Ведущие научные школы” (НШ–4224.2008.2).

[1] *Ritter H.* // Astron. and Astrophys. – 1986. – **169**. – P. 139.

[2] *Шиманский В. В., Борисов Н. В., Шиманская Н. Н.* // Астрон. журн. – 2003. – **80**. – С. 712.

[3] *Silvestri N. M., Hawley S. L., West A. A., et al.* // Astron. J. – 2006. – **131**. – P. 1674.

[4] *Engels D., Hagen H. J., Cordis L., et al.* // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1998. – **128**. – P. 507.

[5] *Miszalski B., Acker A., et al.* // Astron. and Astrophys. – 2009. – **496**. – P. 813.

[6] *Afanas'ev V. L., Gazhur E. B., et al.* // Bull. SAO. – 2004. – **58**. – P. 90.

[7] *Bohlin R. C.* // Astron. J. – 1986. – **111**. – P. 1743.

[8] *Aungwerojwit A., Gansicke B. T., Rodriguez-Gil P., et al.* // Astron. and Astrophys. – 2007. – **377**. – P. 898.

[9] *Шиманский В. В., Борисов Н. В., Сахибуллин Н. А., Сурков А. Е.* // Астрон. журн. – 2004. – **81**. – С. 620.

[10] *Сахибуллин Н. А., Шиманский В. В.* // Астрон. журн. – 1996. – **73**. – С. 793.

[11] *Иванова Д. В., Сахибуллин Н. А., Шиманский В. В.* // Астрон. журн. – 2002. – **79**. – С. 433.

[12] *Bloecker J.* // Astron. and Astrophys. – 1995. – **299**. – P. 755.