

УДК 524.3

**М. К. Кузнецов<sup>1</sup>, Я. В. Павленко<sup>1</sup>, Д. Пинфилд<sup>2</sup>, Г. Джонс<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680

<sup>2</sup>Centre for Astrophysics Research, University of Hertfordshire  
College lane, Hatfield, AL10 9AB, UK

### **Физические параметры компонентов двойной звезды CM Dra**

*Проведено детальное спектральное исследование затменной двойной звезды CM Dra, состоящей из двух карликов спектрального класса M. Используются эшелле-спектры высокого разрешения ( $R = 47000$ ), полученные на 4.2-м телескопе Уильяма Гершеля. С помощью метода моделирования звездных атмосфер определены значения температуры и металличности для обоих компонентов системы:  $T = 3100 \pm 100$  K,  $\lg g = 5.0 \pm 0.2$ ,  $[M/H] = -0.5 \pm 0.2$ . Эти оценки хорошо согласуются с данными других исследований.*

*ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ КОМПОНЕНТІВ ПОДВІЙНОЇ ЗІРКИ CM Dra, Кузнецов М. К., Павленко Я. В., Пінфілд Д., Джонс Г. — Проведено детальні спектральні дослідження затмінної подвійної зорі CM Dra, що складається з двох карликів спектрального класу M. Використано ешелле-спектри високого розділення ( $R = 47000$ ), отримані на 4.2-м телескопі Уільяма Гершеля. За допомогою методу синтетичних спектрів визначено температури і металічності для обох компонентів системи:  $T = 3100 \pm 100$  K,  $\lg g = 5.0 \pm 0.2$ ,  $[M/H] = -0.5 \pm 0.2$  dex. Ці оцінки добре узгоджуються з даними інших досліджень.*

*PHYSICAL PARAMETERS OF BINARY STAR CM DRA COMPONENTS, by Kuznetsov M. K., Pavlenko Ya. V., Pinfield D., Jones H. — Detailed spectral study of the eclipsing binary star CM Draconis, consisting of two M dwarfs, has been held. The high-resolution echelle spectra ( $R = 47000$ ), which were obtained on the 4.2 meter Willam Hershel telescopes has been used. The temperature and metallicity for both components of the system were got using the method of modeling stellar atmospheres. Temperature component is  $3100 \pm 100$  K,  $\lg g = 5.0 \pm 0.2$ , metallicity  $[M/H] = -0.5 \pm 0.2$  dex, which is in good agreement with the results obtained by other authors.*

**ВВЕДЕНИЕ**

SM Dra — затменная двойная звезда, оба компонента которой являются почти идентичными холодными карликами М-класса с массами  $M_1 = 0.23M_\odot$  и  $M_2 = 0.21M_\odot$  [10]. Период системы составляет  $P = 1.368$  сут [9]. Высокие относительные скорости компонентов позволяют наблюдать две системы линий в спектре двойной и исследовать каждый из компонентов независимо. Звезда SM Dra обладает высокой собственной скоростью [8] и низкой металличностью [14], вследствие чего ее относят к звездам Населения II [10]. Любопытной особенностью орбиты SM Dra является ненулевой эксцентриситет орбиты. Согласно современным представлениям у близких двойных звезд вследствие гравитационного взаимодействия должна происходить циркуляризация орбиты. Возраст SM Dra оценивается в  $(4.1 \pm 0.8) \cdot 10^9$  лет [10]. За это время орбита должна была стать круговой. Однако эксцентриситет орбиты отличен от нуля ( $e = 0.00051$ ) [10], что может указывать на наличие третьего компонента в системе. Компоненты SM Dra — холодные карлики. Их спектральный класс оценивается как dM4.5 [9]. Оба компонента являются активными звездами. На рис. 1 представлен участок спектра SM Dra в окрестности линии H $\delta$ . Спектр получен с разрешением  $R = 47000$  в фазах  $\phi = 0.19, 0.31, 0.70$ . Видны мощные эмиссионные линии H $\delta$  от обоих компонентов, разделенные за счет эффекта Доплера. То обстоятельство, что система является затменной двойной, делает возможным определить орбиту с высокой точностью и рассчитать массы компонентов без дополнительных предположений. Точные данные для масс компонентов и большое

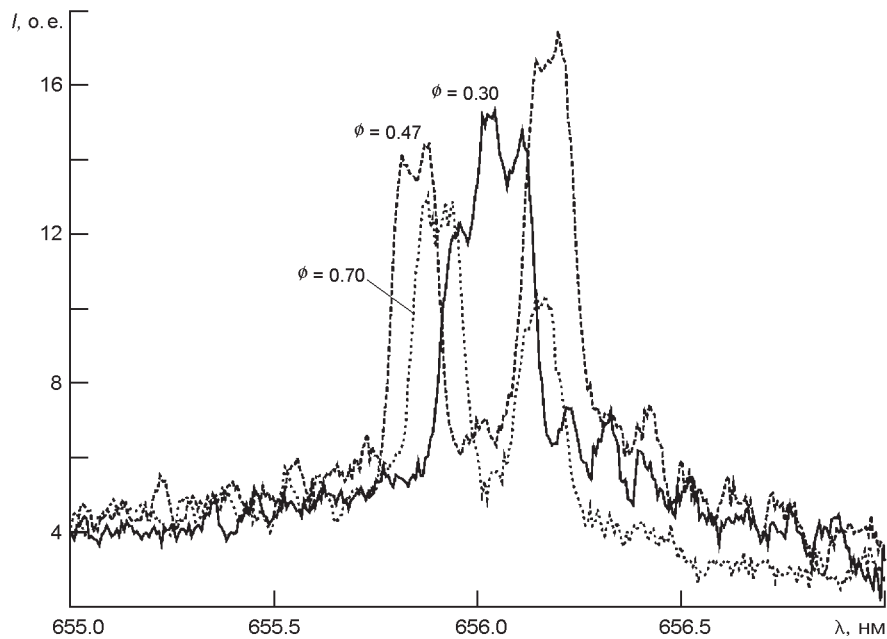


Рис. 1. Участок спектра SM Dra в окрестности линии H $\delta$  для разных фаз:  $\phi = 0.30, 0.47, 0.70$

количество наблюдательных данных делают CM Dra хорошим тест-объектом для теории атмосфер холодных звезд.

Целью работы является детальное изучение двойной звезды CM Dra методом синтетических спектров и определение фундаментальных параметров ее компонентов.

## НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Мы использовали эшелные спектры, взятые из архива наблюдений The Isaac Newton Group of Telescopes (ING) [<http://casu.ast.cam.ac.uk>]. Спектры CM Dra были получены на спектрографе UES 4.2-м телескопа Уильяма Гершеля с 20 по 23 мая 1997 г. За этот период было получено 64 эшеле-спектра для разных фаз объекта с разрешением  $R = 47000$  в широком спектральном диапазоне  $\lambda = 450 \dots 1000$  нм. Обработка спектрального материала была проведена с помощью пакетов программ IRAF и dech20 [1]. Программа IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) распространяется Национальной оптической астрономической обсерватории, которая находится под руководством Ассоциации университетов по исследованиям в области астрономии (AURA), согласно соглашению о сотрудничестве с Национальным научным фондом. В спектрах компонентов системы CM Dra доминируют широкие полосы поглощения молекул TiO, VO. Ширина этих полос может быть большей или сравнимой с размерами порядка эшелного спектра (в нашем случае примерно 10 нм). Наблюдаемое распределение энергии внутри порядка является сверткой функции квантовой эффективности светоприемника и распределения энергии в наблюдаемом объекте.

Таким образом, определить уровень непрерывного спектра достаточно сложно. Для нормировки спектра был применен метод псевдоконтинуума. В качестве образца формы псевдоконтинуума использовался спектр «звезды-дивайзера» HD 6170. Такое применение концепции псевдоконтинуума дало хорошее согласие между нормированным наблюдаемым и синтетическим спектрами. В качестве основного инструмента исследования CM Dra мы использовали немногочисленные сильные линии металлов, которые можно было выделить на фоне молекулярных полос.

## РАСЧЕТ СИНТЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА CM DRA И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ

Для учета двойственности CM Dra мы применили процедуру расчета синтетического спектра, отличную от той, которая обычно применяется при анализе одиночных звезд. Здесь представлены результаты расчетов, которые проводились для интегрального потока  $F^l$  от диска звезды. Рассчитанные синтетические спектры сворачивались с ин-

струментальным профилем, соответствующем разрешению  $R = 47000$ , и профилем вращения звезды, который рассчитывался по методике Грея [4]. Нами были рассчитаны синтетические потоки  $F^l$  для обоих компонентов системы по отдельности. После этого рассчитанные потоки компонентов были сложены со смещением, соответствующем относительной скорости компонентов в наблюдаемой фазе. Полученные синтетические спектры сравнивались с наблюдаемыми спектрами для получения хорошего согласия между ними для заданного набора параметров ( $T_{\text{эф}}$ ,  $\lg g$ ,  $[M/H]$ ,  $V_i$ ,  $v \sin i$ ).

Синтетические спектры компонентов были рассчитаны с помощью программы WITA6 [11] для моделей атмосфер NextGen [5]. Расчет проводился в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) для одномерной атмосферы без источников энергии, находящейся в гидростатическом равновесии.

WITA использует источники непрозрачности в континууме из программы ATLAS9 [7]. В работе были использованы списки атомных линий VALD [6] и списки линий TiO, рассчитанные Плезом [12].

Профиль коэффициентов поглощения атомных и молекулярных линий определялся функцией Фойгта, постоянные затухания брались из баз данных или рассчитывались по методике Унзольда [3].

Расчет ионизационно-диссоциативного равновесия (ИДР) проводился в рамках приближения ЛТР для смеси из сотни молекул, которые, по современным представлениям, наиболее распространены в атмосферах холодных звезд. Для расчета системы уравнений ИДР были использованы константы из работ [2] и [13]. Расчеты синтетических спектров производились с шагом  $\lambda = 2$  пм.

Были рассчитаны синтетические спектры для сетки моделей с различными температурами и металличностями, а также с различными собственными скоростями вращения компонентов и микротурбулентными скоростями. Анализ профилей линий металлов показывает значения  $v \sin i$  и  $V_i = 3$  км/с для обоих компонентов.

Значения температур и металличностей компонентов были определены путем сравнения наблюдаемых и синтетических спектров линий металлов, которые можно выделить на фоне мощных полос TiO: Na I 818.5, 819.7 нм, Rb I 781.8 нм и Ca I 671.9 нм.

#### **Анализ субординатных линий натрия Na I 818.5 и 819.7 нм.**

Субординатные линии натрия Na I 818.5 и 819.7 нм формируются в глубоких слоях звездных атмосфер. Они находятся в спектральной области, где влияние молекулярного поглощения относительно мало, что делает эти линии хорошим инструментом для исследования фундаментальных параметров звезд. В нашем случае для наблюдений был использован светоприемник, чувствительный в красной области. Благодаря этому соотношение сигнал/шум в области  $\lambda = 819.0$  нм достаточно велико. К сожалению, в этой спектральной области достаточно много интенсивных теллурических спектральных линий, которые сильно искажают наблюдаемый спектр. Для того чтобы минимизировать влияние теллурического спектра, мы поделили наблюдаемые

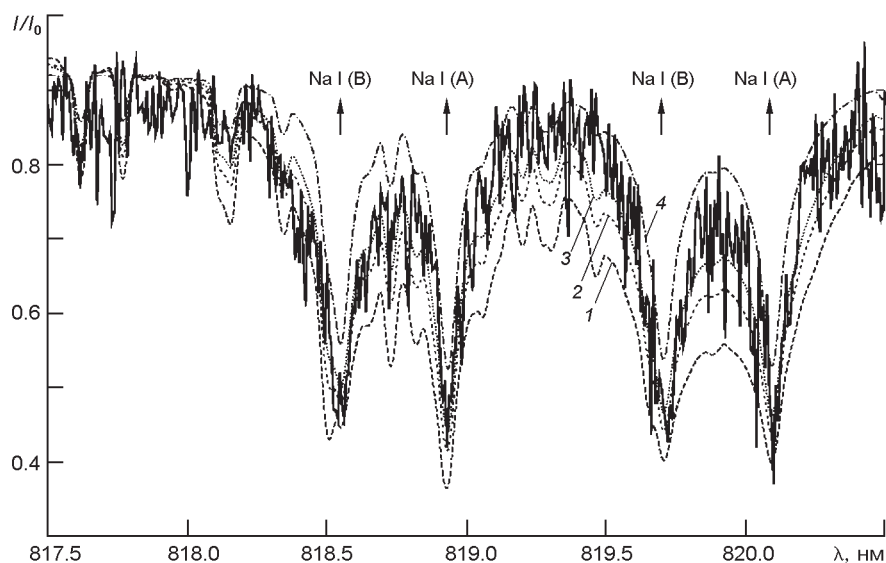


Рис. 2. Спектры CM Dra в окрестности субординатных линий натрия Na I 818.5 и 819.7 нм: жирная сплошная линия — наблюдаемый спектр, кривые 1–4 — синтетические спектры, рассчитанные при  $V_r = 3.0$  м/с для  $T_{\text{эф}} = 2800, 3000, 3100$  и  $3400$  К соответственно

спектры на спектр «звезды-дивайзера» HD 6170 (горячая звезда с высокой скоростью вращения). Спектры HD 6170 были получены в те же ночи на том же приборе что и спектры CM Dra. Дивайзер был выбран с таким расчетом, чтобы зенитное расстояние между объектом и дивайзером было минимальным. На рис. 2 сравниваются наблюдаемый и синтетический спектры CM Dra, рассчитанные для различных  $T_{\text{эф}}$  в окрестности линий натрия Na I 818.5, 819.7 нм. Синтетические спектры рассчитывались для интервала температур  $T_{\text{эф}} = 2800$ – $3400$  К. Лучшее соответствие между наблюдаемым и синтетическим спектром достигается при  $T_{\text{эф}} = 3100$  К. Заметим, что изменение металличности в моделях мало влияет на профили насыщенных линий Na I 818.5, 819.7 нм.

**Резонансная линия рубидия Rb I 780.2 нм.** Резонансная линия рубидия Rb I 780.2 нм формируется в более высоких слоях звездных атмосфер, чем субординатные линии натрия Na I 818.5 и 819.7 нм. При этом она расположена в области с большим количеством абсорбционных линий TiO, которые сильно блендируют эту линию. Счастливым обстоятельством является то, что в ее окрестности нет сильных теллурических линий. Здесь мы пренебрегли сверхтонким расщеплением линии Rb I 780.2 нм, поскольку в исследуемых спектрах она достаточно сильна. Линия рубидия Rb I 780.2 нм достаточно чувствительна к изменениям металличности. Нами были рассчитаны синтетические спектры для моделей с солнечной металличностью ( $\lg N(\text{Rb}) = 2.56$  dex,  $\lg N(\text{Na}) = 6.29$  dex), а также для моделей с металличностью, на 0.5 и на 1.0 dex меньшей за солнечную.

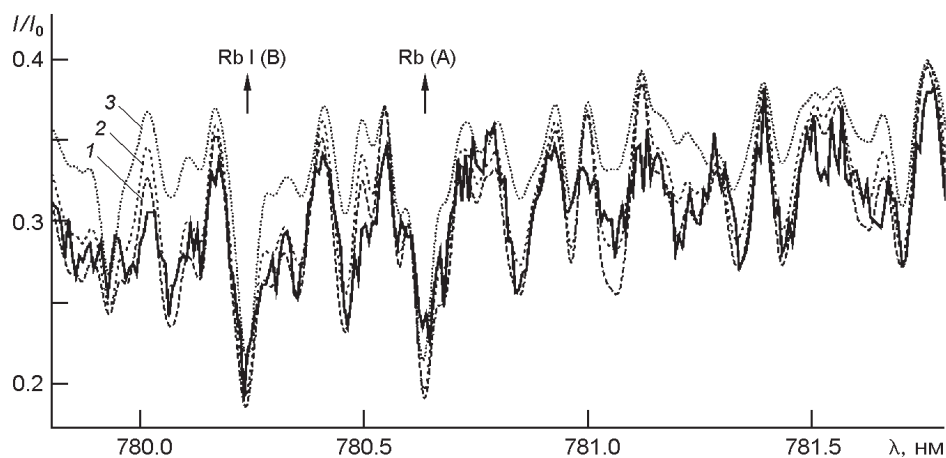


Рис. 3. Спектры CM Dra в окрестности резонансной линии рубидия Rb I 780.2 нм: жирная сплошная линия — наблюдаемый спектр, кривые 1–3 — синтетические спектры, рассчитанные для металличностей  $[M/H] = 0.0, -0.5$  и  $-1.0$  соответственно при  $T_{\text{эф}} = 3100$  К

На рис. 3 сравниваются наблюдаемый и синтетические спектры CM Dra, рассчитанные для различных значений металличности  $[M/H]$  (0.0,  $-0.5$  и  $-1.0$ ) при  $T_{\text{эф}} = 3100$  К в окрестности линии рубидия Rb I

780.2 нм. Наилучшее соответствие наблюдениям достигается при  $[M/H] = -0.5$  dex. Полученные нами параметры звездных атмосфер компонентов хорошо согласуются с предыдущими исследованиями CM Dra [10, 14].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Работа с эшеле-спектрами в случае холодных звезд представляет некоторые трудности, поскольку для таких объектов большое значение имеет распределение энергии в больших масштабах (широкие молекулярные полосы, крылья резонансных линий металлов, сложная форма непрерывного спектра). Нами было предложено использовать спектр «звезды-дивайзера», полученный в ночь наблюдений объекта, для проведения псевдоконтинуума.

CM Dra — представитель спектрально двойных звезд с двумя системами спектральных линий, состоящая из двух холодных карликов класса M. В силу наличия большого числа молекулярных линий, которые бывает сложно моделировать, расчет синтетического спектра таких объектов является нетривиальной задачей. Наличие спектральных линий от двух компонентов, чьи спектральные линии могут быть по-разному смещены друг относительно друга в зависимости от наблюдаемой фазы, еще сильнее усложняет построение синтетического спектра CM Dra и затрудняет отождествление атомных линий. Нами была разработана методика анализа спектров двойных звезд поздних спектральных классов.



С помощью метода моделей звездных атмосфер мы уточнили температуры и металличности обоих компонентов двойной системы CM Dra  $T_{\text{эф}} = 3100 \pm 100$  К;  $[M/H] = -0.5 \pm 0.2$  dex. Отметим, что результаты были получены из анализа субординатных линий Na I 818.5 и 819.7 нм и резонансной линии Rb I 780.2 нм, которые формируются на разных глубинах в атмосферах компонентов CM Dra. Это повышает достоверность наших исследований по сравнению с предыдущими работами.

Исследования выполнялись при поддержке гранта RoPACS: Rocky Planets Around Cool Stars. A Marie Curie Initial Training Network. В работе использована база данных SIMBAD (Страсбург, Франция).

Авторы благодарят Др. Р. Куруца за предоставленную версию ATLAS12 и списки молекулярных линий, группу VALD за создание базы спектральных линий. Авторы благодарят также рецензента за ряд полезных замечаний.

1. *Галазутдинов Г. А.* Система обработки звездных эшеле-спектров. I. Обработка изображений. II. Обработка спектров. — Нижний Архыз, 1992. — 52 с. — (Препринт / Российская АН. Спец. астрофиз. обсерватория; № 92).
2. *Гурвиц Л. В., Вейц И. В., Медведев В. А. и др.* Термодинамические свойства индивидуальных веществ. — М.: Наука, 1982. — Т. 1. — 496 с.
3. *Унзольд А.* Физика звездных атмосфер. — М.: Госуд. изд-во иностр. лит., 1949. — 598 с.
4. *Gray D. F.* The observation and analysis of stellar photospheres. — New York: Cambridge Univ. Press, 2005. — 533 p.
5. *Hauschildt P., Allard F., Baron E.* The NextGen model atmosphere grid for 3000  $T_{\text{эф}} = 10000$  K // *Astrophys. J.*—1999.—**512**, N 1.—P. 377—385.
6. *Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., et al.* VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1999.—**138**.—P. 119—133.
7. *Kurucz R.* CD ROM N 1—22. — Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1993.
8. *Lacy C. H.* Radii of nearby stars: an application of the Barnes-Evans relation // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1977.—**34**.—P. 479—492.
9. *Metcalf T. S., Mathieu R. D., Latham D. W., Torres G.* The low-mass double-lined eclipsing binary CM Draconis: a test of the primordial helium abundance and the mass-radius relation near the bottom of the main sequence // *Astrophys. J.*—1996.—**456**.—P. 356—365.
10. *Morales J. C., Ribas I., Jordi C., et al.* Absolute properties of the low-mass eclipsing binary CM Draconis // *Astrophys. J.*—2009.—**691**.—P. 1400—1411.
11. *Pavlenko Ya. V.* Analysis of the spectra of two Pleiades brown dwarfs: Teide 1 and Calar 3 // *Astrophys. and Space Sci.*—1997.—**253**.—P. 43—53.
12. *Plez B.* A new TiO line list // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**337**.—P. 495—500.
13. *Tsuji T.* Molecular abundances in stellar atmospheres. II // *Astron. and Astrophys.*—1973.—**23**.—P. 411—431.
14. *Viti S., Jones H. R. A., Maxted P., Tennyson J.* The metallicity of CM Draconis // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**329**.—P. 290—300.

Поступила в редакцию 07.04.11