

УДК 524.33

Изменение линии H_{α} в спектрах звезд типа RR Лиры — DH Пегаса и RZ Цефея

Г. А. Гарбузов, Л. П. Зайкова

Исследовано изменение линии H_{α} в спектрах звезд подтипа RRc — DH Пегаса и RZ Цефея. В фазах максимального блеска обнаружены слабая кратковременная эмиссия и расщепление линии поглощения H_{α} на два компонента. Проведено сравнение наблюдаемых явлений у звезд подтипов RRab и RRc и сделан вывод о том, что ударная волна в атмосферах звезд подтипа RRc формируется в более высоких слоях, чем у звезд подтипа RRab.

VARIATIONS OF H_{α} LINE IN THE SPECTRA OF RR LYRAE STARS — DH PEG AND RZ CEP, by Garbuzov G. A., Zajkova L. P.—Variations of H_{α} line in the spectra of RRc stars — DH Peg and RZ Cep are investigated. The weak short-lived emission and the splitting of absorption H_{α} line into two components for the phases of maximum light are found. Comparison of the observed phenomena in RRab and RRc stars is carried out and a conclusion is made that the shock wave in RRc stars is formed upper in the atmosphere than in RRab stars.

Введение. Важная особенность многих физических переменных звезд — наличие в их спектрах эмиссионных линий. Появление линий излучения в спектрах пульсирующих звезд связывается с периодическим прохождением в атмосфере звезды ударной волны. Этой гипотезой удается объяснить основные особенности эмиссионного спектра.

Наблюдаемое излучение имеет рекомбинационный характер. Оно формируется в условиях высокой степени ионизации среды после прохождения ударной волны. Излучение из-за ударного фронта проявляется в частотах спектральных линий и в частотах непрерывного спектра, обуславливая наличие «горбов» и других деталей на кривых блеска. Линейчатое излучение наблюдается в виде эмиссионных компонентов в линиях поглощения.

Особенности эмиссионного спектра у пульсирующих звезд различных типов связаны с глубиной залегания зоны критической ионизации гелия и его содержанием, со структурой и протяженностью атмосферы, химическим составом звезды. Эти факторы определяют силу ударной волны, глубину формирования ударного фронта и диссипативные процессы в атмосфере звезды.

Среди звезд типа RR Лиры эмиссионный спектр лучше всего исследован у самой RR Лиры [10, 12]. Двухкомпонентная эмиссия в линиях бальмеровской серии водорода появляется в фазах восходящей ветви кривой блеска, соответствующих избытку на кривой показателя цвета $U - B$. Наблюдается она в течение менее 0.1 периода пульсации.

Непосредственно с прохождением ударной волны у звезд типа RR Лиры связано расщепление (раздвоение) линий поглощения. На кривой лучевых скоростей, построенной по линиям поглощения, это отмечается в виде разрыва лучевой скорости в соответствующих фазах. Разрыв в линии H_{α} достигает 100 км/с [10]. Расщепляются в основном линии серии Бальмера, а также линии H и K ионизованного кальция, формирующиеся высоко в атмосфере звезды. Расщепление линий поглощения наблюдается только у звезд с эмиссией в спектре.

Общепринята следующая интерпретация расщепления линий поглощения в спектрах пульсирующих звезд [8, 11]. Коротковолновый абсорбционный компонент образуется в слоях газа, примыкающих к области радиативного охлаждения ударной волны. После прохождения ударной волны нагретый и ионизованный газ охлаждается, степень ионизации и интенсивность эмиссионных линий начинают уменьшаться. После охлаждения газ снова будет интенсивно поглощать в частотах спектральных линий. Поскольку скорость движения этих слоев близка к скорости ударной волны, то линии будут

смещены в коротковолновую область относительно линий поглощения, формирующихся над ударной волной (длинноволновый абсорбционный компонент). Значительная разность лучевых скоростей абсорбционных компонентов обусловлена не только движением ударной волны, но и эффектом уровня в атмосфере (градиентом скорости), в результате чего разные слои атмосферы движутся с различными скоростями. По мере продвижения ударной волны к периферии происходит ослабление длинноволновой и усиление коротковолновой абсорбции.

Сильное расщепление и эмиссия наблюдаются в спектрах звезд подтипа RRab, обладающих асимметричными кривыми блеска с амплитудами более 0.5^m (V). В спектрах звезд подтипа RRC (почти симметричные кривые блеска, амплитуды до 0.5^m (V))

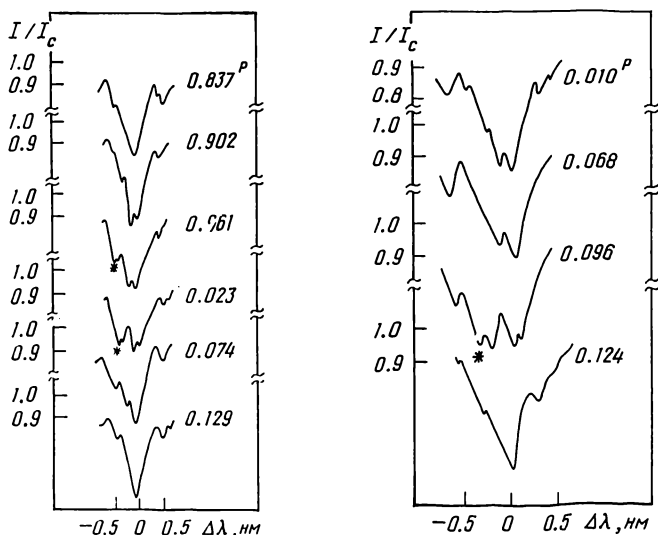


Рис. 1. Изменение профиля линии H_{α} в спектре DH Пегаса в интервале $J.D. \odot$ 2 445 251.2564 — 3144

Рис. 2. Изменение профиля линии H_{α} в спектре RZ Цефея в интервале $J.D. \odot$ 2 445 250.2503 — 2857

расщепление не наблюдалось. Так, не обнаружено признаков расщепления или эмиссии в линии H_{γ} у двух звезд подтипа RRC — DH Пегаса и Т Секстанта [9].

Наблюдения. Для исследования физических условий во внешних слоях атмосфер звезд подтипа RRC проведены спектральные наблюдения DH Пегаса и RZ Цефея в области водородной линии H_{α} . Наблюдения выполнены на 122-см рефлекторе Крымской астрофизической обсерватории АН СССР в октябре 1982 г. Спектрограммы получены на дифракционном спектрографе UAGS с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП), обладающим высоким разрешением [5]. Применение ЭОП позволило значительно повысить временное разрешение. Дисперсия — 7.9 нм/мм. Расширение спектрограмм — от 0.4 до 0.5 мм. Более подробно методика наблюдений и обработки описана в работе [1].

DH Пегаса. Наблюдения выполнены в течение двух ночей в октябре 1982 г. Всего получено 24 (8+16) спектрограммы. В ночь 8/9 октября 1982 г. наблюдениями охвачено 0.8 периода пульсации. Время экспозиции составляло 0.05—0.04 периода, время между экспозициями не превышало 0.5 мин.

Наибольшим изменениям в исследуемой области спектра DH Пегаса подвержено коротковолновое крыло линии поглощения H_{α} . Изменение профиля линии поглощения H_{α} в фазах восходящей ветви и максимума блеска представлено на рис. 1. На нем последовательно воспроизведены профили линии H_{α} , полученные в интервале $J.D. \odot$ 2 445 251.2564—3144. Фазы колебания блеска вычислены относительно линейных элементов [13]: $\text{Max } J.D. \odot = 2\ 436\ 503.399 + 0.255\ 510\ E$.

RZ Цефея. Спектрограммы в области H_{α} получены в течение трех ночей в октябре 1982 г. (13+15+13). Время экспозиции — 15 мин, что составляет около 0.03 периода пульсации.

Профили линии H_{α} в спектре RZ Цефея в интервале $J. D. \odot 2\ 445\ 250.2503 - 2857$ представлены на рис. 2. Фазы колебания блеска вычислены относительно линейных элементов [7]: $\text{Max } J. D. \odot = 2\ 442\ 635.374 + 0.308\ 685\ 3\ E$.

Обсуждение результатов. Проследим изменение профиля линии H_{α} в спектре звезды ДН Пегаса в фазах вблизи максимума блеска. В фазе 0.837^P профиль линии поглощения H_{α} — почти без особенностей, со слегка искаженным коротковолновым крылом. В фазе 0.902^P можно заподозрить появление слабой эмиссии в ядре линии. Коротковолновый абсорбционный компонент (на рис. 1, 2 отмечен звездочкой) уверенно фиксируется на следующей спектрограмме ($\varphi = 0.961^P$). В этих же фазах возрастают полуширина и эквивалентная ширина линии поглощения. В фазе 0.023^P полуширина линии в два раза больше, чем в фазе 0.837^P . Коротковолновый абсорбционный компонент уверенно фиксируется на двух спектрограммах, соответствующих фазам 0.961 и $0,023^P$, т. е. в течение менее 0.1 периода. В фазе 0.074^P наблюдается линия поглощения H_{α} без явных признаков расщепления, с сильно искаженным коротковолновым крылом. В остальных фазах колебания блеска (исключая фазы $0.6 - 0.7^P$) профиль линии не показывает каких-либо существенных особенностей.

Быстрые изменения профиля линии H_{α} в фазах вблизи максимума блеска характерны для пульсирующих звезд и могут быть поняты в рамках гипотезы о прохождении ударной волны в атмосфере звезды. В фазах $0.902 - 0.074^P$ в области формирования линии поглощения H_{α} распространяется ударная волна, что сопровождается эмиссией и расщеплением линии на два компонента. Вначале в фазе 0.902^P появляется эмиссионный компонент, образующийся в области радиативного охлаждения ударной волны. После радиативного охлаждения среда вновь станет поглощать в частотах спектральных линий, смещенных в коротковолновую область (ударная волна сообщает газу радиальное ускорение). Это приведет к образованию коротковолнового абсорбционного компонента линии H_{α} ($\varphi = 0.961^P$), интенсивность которого должна возрастать по мере распространения ударной волны к периферийным слоям. Длинноволновый абсорбционный компонент образуется при этом в слое газа, не возмущенном ударной волной.

До определенного момента, соответствующего $\varphi = 0.023^P$, изменения профиля линии H_{α} в спектрах ДН Пегаса и звезд RRab качественно сходны. В отличие от звезд RRab, у которых коротковолновый абсорбционный компонент продолжает усиливаться, у ДН Пегаса он практически исчезает ($\varphi = 0.074^P$ и далее).

Изменение линии H_{α} в спектре RZ Цефея имеет аналогичный характер. Так же, как у ДН Пегаса, в фазах максимального блеска в спектре RZ Цефея наблюдается расщепление линии H_{α} . Существенное различие заключается в значительно большей интенсивности эмиссии и поведении линии после фазы максимального расщепления. Максимальное смещение коротковолновой абсорбции относительно длинноволновой у обеих звезд оказывается значительным — до 100 км/с.

Представляют интерес особенности расщепления линии H_{α} у звезд подтипов RRab и RRc. Сравним изменение линии H_{α} в спектрах ДН Пегаса, RZ Цефея и RR Лиры (по наблюдениям [10]). Наиболее существенное различие состоит в следующем. У RR Лиры в процессе расщепления появляется коротковолновый абсорбционный компонент, который постепенно усиливается при соответствующем ослаблении (вплоть до полного исчезновения) длинноволновой абсорбции. Такая картина наблюдается при движении ударной волны из глубоких слоев атмосферы ($\tau_{H_{\alpha}} \gg 1$) к периферии, когда она последовательно проходит всю область формирования линии поглощения H_{α} . У звезд RRc появляется и исчезает коротковолновый абсорбционный компонент.

Эту особенность можно качественно понять, предположив, что ударные волны в атмосферах звезд подтипа RRc формируются выше, чем у звезд подтипа RRab, т. е. в слоях с $\tau_{H_{\alpha}} \leq 1$. Такое предположение подтверждается также отсутствием расщепления в линии H_{γ} , которая образуется глубже, чем H_{α} . Длинноволновый абсорбционный компонент формируется при этом в слоях атмосферы, расположенных ниже уровня возникновения ударной волны. Время существования коротковолновой абсорбции определяется временем, за которое притяжение звезды существенно уменьшит скорость радиального движения, сообщенную газу ударной волной.

Оценим приближенно концентрацию свободных электронов за фронтом ударной волны в атмосферах звезд подтипа RRc. Очевидно, что область формирования линии поглощения H_{α} будет прозрачна для излучения в бальмеровском континууме и непро-

зрачна для излучения в лаймановском континууме. Так как высвечивание водородной среды после прохождения ударной волны (т. е. после прекращения действия дополнительного источника ионизации) имеет чисто рекомбинационный характер, то время высвечивания приближенно определяется соотношением [2]:

$$\Delta t = 1/n_e \sum_{i=2}^{\infty} C_i,$$

где n_e — концентрация электронов сразу после прохождения ударной волны; $\sum_{i=2}^{\infty} C_i$ —

сумма коэффициентов рекомбинации водорода на все уровни, начиная со второго $\left(\sum_{i=2}^{\infty} C_i = 3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1} \right)$ [4]. Время высвечивания можно определить из наблюдений, приняв его равным интервалу между появлением эмиссии и коротковолновой абсорбции. Для ДН Пегаса и RZ Цефея $\Delta t \approx 20-30$ мин. Следовательно, $n_e \approx 10^{10}-10^9 \text{ см}^{-3}$. Эта оценка подтверждает предположение о том, что ударные волны у звезд подтипа RRc возникают в самых верхних слоях атмосферы.

Рассматривая вопрос о высвечивании, следует учесть, что пульсации и периодические ударные волны приводят к увеличению протяженности пульсирующей атмосферы. Ее характерные размеры могут на порядок и более (примерно в M^2 раз, где M — число Маха) превышать размеры невозмущенной атмосферы [3, 6].

Изменение профиля линии H_{α} в спектрах ДН Пегаса и RZ Цефея — результат сложных движений в их атмосферах. Различное проявление ударно-волновых эффектов у звезд подтипов RRab и RRc свидетельствует о существенных различиях физических и кинематических характеристик атмосфер этих звезд.

1. Гарбузов Г. А. Изменение контура линии H_{α} в спектре ДН Пегаса // Письма в Астрон. журн.—1983.—9, № 8.— С. 482—485.
2. Горбачкий В. Г., Минин И. Н. Нестационарные звезды.— М.: Физматгиз, 1963.— 355 с.
3. Климишин И. А. О влиянии периодических ударных волн на распределение плотности в атмосфере пульсирующей звезды // Астрофизика.—1967.—3, вып. 2.— С. 259—267.
4. Соболев В. В. Курс теоретической астрофизики.— М.: Наука, 1975.—293 с.
5. Тарасов А. К., Щербаков А. Г. О периодичности быстрых изменений профилей H_{α} в спектре Ве-звезды 59 Лебеда // Письма в Астрон. журн.—1983.—9, № 10.— С. 673—678.
6. Федорова О. В. О расширении атмосферы пульсирующей звезды под действием периодических ударных волн // Астрофизика.—1978.—14, вып. 2.— С. 239—257.
7. Фирманюк Б. Н. Дополнение к каталогу элементов звезд типа RR Лиры // Астрон. циркуляр.—1978.— № 979.— С. 7.
8. Ledoux P., Whitney C. A. Summary-introduction: velocity fields associated with thermodynamic variations in external layers of intrinsic variable stars // Nuovo cim. Suppl.—1961.—22, N 1.— Ser. 10.— P. 131—194.
9. Preston G. M., Paczyński B. Atmospheric phenomena in the RR Lyrae stars. I. The singly periodic variables // Astrophys. J.—1964.—140, N 1.— P. 181—213.
10. Sanford R. Radial velocities of RR Lyrae from coude spectrograms // Ibid.—1949.—109, N 1.— P. 208—214.
11. Schwarzschild M. Shock waves in the atmosphere of pulsating stars // Trans. IAU.—1952.—8.— P. 811—813.
12. Struve O. Peculiar hydrogen lines in the spectrum of RR Lyrae // Publ. Astron. Soc. Pacif.—1947.—59, N 1.— P. 192—194.
13. Zessewitch W. P. Ephemerides of RR Lyrae-type variables for the year 1964 // Roczn. astron.—1963.— N 38.— P. 119—125.

Астрон. обсерватория
Одес. ун-та им. И. И. Мечникова, Одесса

Поступила в редакцию 26.11.85,
после доработки 10.02.86