

УДК 52.524.338.5

Фотосферный спектр “пре-фуора” V1331 Cyg: звезда или диск?

П.П. Петров, Е.В. Бабина

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,
АР Крым, Украина, 98409
petrov@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 19 декабря 2013 г.

Аннотация. Переменная типа Т Тельца V1331 Cyg отличается интенсивным эмиссионным спектром, признаками высокого темпа потери массы, а также наличием кольцеобразных отражательных туманностей. По этим признакам звезда может быть отнесена к возможным кандидатам в “пре-фуоры”. Фотосферный спектр звезды до сих пор не был зарегистрирован. В данной работе анализируются спектры высокого разрешения V1331 Cyg, полученные Дж. Хербигом с помощью спектрографа HIRES на телескопе Keck-1 в 2004 и 2007 гг. Впервые удалось обнаружить многочисленные линии фотосферного спектра звезды и определить спектральный класс: G7–K0 IV. Проекция скорости вращения оказалась меньше ширины инструментального профиля ($v \sin i < 6 \text{ км с}^{-1}$), что указывает на малый угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения. Лучевая скорость звезды, определенная по линиям фотосферного спектра, $RV = -15.0 \pm 0.3 \text{ км с}^{-1}$. Различие в лучевой скорости между 2004 и 2007 гг. не превышает ошибки измерения. Фотосферный спектр значительно вуалирован, но фактор вуалирования (VF) не одинаков в разных спектральных линиях и зависит от интенсивности линии в спектре стандарта G7 IV. В наиболее слабых линиях ($EW = 5\text{--}10 \text{ м\AA}$ в спектре стандарта) $VF \approx 1$ и возрастает до 4–5 к более сильным линиям. Линии H α и H β имеют классический профиль типа P Cyg, указывающий на интенсивный ветер с максимальной скоростью $\approx 400 \text{ км с}^{-1}$. Кроме того, эмиссионные линии Fe II, Mg I, K I и некоторых других элементов сопровождаются узкими абсорбциями, смещенными в коротковолновую сторону на $-150\text{--}250 \text{ км с}^{-1}$. Эмиссионный спектр V1331 Cyg изобилует узкими ($FWHM = 30\text{--}50 \text{ км с}^{-1}$) линиями нейтральных и ионизованных металлов, указывающими на температуру возбуждения $T_{exc} = 3800 \pm 300 \text{ К}$. Оценены масса $M_* \approx 2.8 M_\odot$ и радиус $R_* \approx 5 R_\odot$ звезды.

PHOTOSPHERIC SPECTRUM OF THE PRE-FUOR V1331 CYG: A STAR OR A DISK?, by P.P. Petrov, E.V. Babina. The T Tauri variable V1331 Cyg is distinguished by its intensive emission line spectrum, spectral signatures of high mass-loss and the presence of circular reflection nebulae. With these characteristics the star can be considered as a candidate pre-FUor. The photospheric spectrum of the star has not been registered so far. In this paper we analyse the high-resolution spectra of V1331 Cyg, obtained by G. H. Herbig with the HIRES spectrograph at Keck-1 telescope in 2004 and 2007. For the first time the numerous photospheric lines of the star were detected and the spectral type was estimated: G7–K0 IV. Projected rotational velocity was found to be less than the width of instrumental profile ($v \sin i < 6 \text{ km s}^{-1}$), thus indicating a low inclination. Radial velocity of the star, derived from the photospheric lines, is $RV = -15.0 \pm 0.3 \text{ km s}^{-1}$, with no significant difference between 2004 and 2007. The photospheric spectrum is veiled considerably, but the amount of veiling is not the same in different lines. It depends on the line strength in the template spectrum of G7 IV star: the weakest measured lines

($EW = 5\text{--}10 \text{ m}\text{\AA}$ in template spectrum) are veiled by factor of ≈ 1 and rise to 4–5 in stronger lines. The $H\alpha$ and $H\beta$ lines show classical P Cyg profiles indicating a powerful wind with terminal velocity of $\approx 400 \text{ km s}^{-1}$. Besides of these, emission lines of Fe II, Mg I, K I and some other species are accompanied by narrow blue-shifted absorptions at $-150\text{...} - 250 \text{ km s}^{-1}$. The emission spectrum is rich in narrow ($FWHM = 30\text{--}50 \text{ km s}^{-1}$) lines of neutrals and ionised metals, indicating excitation temperature $T_{exc} = 3800 \pm 300 \text{ K}$. The stellar mass $M_* \approx 3 M_{\odot}$ and radius $R_* \approx 5 R_{\odot}$ are estimated.

Ключевые слова: звезды типа Т Тельца, фуоры, V1331 Cyg

1 Введение

Один из наиболее интересных аспектов физики звезд на ранних стадиях эволюции – эволюция углового момента. Звезды рождаются в процессе гравитационного сжатия плотных холодных ядер межзвездных облаков. В силу того, что родительское облако имеет ненулевой угловой момент, в результате сжатия должна образоваться быстро вращающаяся звезда, окруженная аккреционным диском. Однако из наблюдений известно, что скорости вращения молодых звезд малых масс – звезд типа Т Тельца – далеки от критической. Очевидно, должны существовать какие-то механизмы эффективного торможения молодой звезды. К звездам типа Т Тельца (TTS) относят звезды с массой менее $\approx 2 M_{\odot}$, находящиеся в стадии эволюции до главной последовательности. По наблюдаемым признакам это неправильные переменные спектральных классов G-K-M с характерным эмиссионным спектром низкого возбуждения, расположенные в областях звездообразования в нашей Галактике. Возраст большинства TTS находится в диапазоне 1–10 млн лет. Многие TTS еще не утратили связи со своими аккреционными дисками. Это так называемые классические TTS (сTTS), отличающиеся богатым эмиссионным спектром, переменностью блеска, избыточным излучением в коротковолновой и инфракрасной областях спектра и признаками интенсивной потери массы в виде звездного ветра и коллимированных джетов. Предполагается, что падение вещества диска на звезду (аккреция массы) является основным источником энергии наблюдаемой активности этих звезд. Обзоры наблюдаемых характеристик TTS и современных моделей этих звезд даны в (Петров, 2003; Бувье и др., 2007; Гюнтер, 2013).

Замagnetиченный ветер рассматривается как один из возможных механизмов торможения молодой звезды. Из наблюдений известно, что истечение вещества в виде ветра и коллимированных джетов наблюдаются только у тех сTTS, которые имеют признаки активных аккреционных дисков (Кэбрит и др., 1990). Отсюда был сделан вывод о том, что истечение массы у молодых звезд является следствием аккреции. Хотя связь аккреции и истечения подтверждается наблюдениями, механизмы образования и ускорения ветра остаются недостаточно исследованными. Газовые потоки в непосредственной окрестности звезды, в пределах $\approx 1 \text{ а. е.}$, регулируются сложными процессами взаимодействия вещества с магнитным полем звезды и диска (Кёнигл, 1991; Шу и др., 1994; Мэтт, Пудритц, 2005. См. также ссылки в обзоре Гюнтер, 2013).

Темп потери массы звездами сTTS, \dot{M}_{accr} , составляет от 10^{-10} до $10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$ (Хартигэн и др., 1995). Существует немногочисленный класс молодых звезд, где этот параметр на три порядка величины выше – это звезды типа FU Ori (фуоры). Феномен фуора – это резкое увеличение блеска молодой звезды на 4–6 зв. величин за время около года, с последующим медленным спадом в течение десятков лет. Типичный фуор имеет спектр G-сверхгиганта с признаками быстрого вращения и необычно высокого темпа потери массы. Только для одного из них, V1057 Cyg, известно, что до вспышки в 1970 г. это была звезда типа Т Тельца с характерным эмиссионным спектром (Хербиг, 1977). В спектрах фуоров не наблюдаются эмиссионные признаки звезд типа Т Тельца или признаки аккреции. Хотя блеск фуора V1057 Cyg к настоящему времени понизился уже до предвспышечного состояния, но по спектральным признакам это по-прежнему G-сверхгигант (Хербиг, 2009). Предполагается, что феномен фуора – это кратковременная и, возможно, неоднократно

повторяющаяся фаза в эволюции звезды типа Т Тельца. Предлагалось несколько различных вариантов объяснения феномена фуора (см. ссылки в статье Хербиг, 2009). Наиболее разработанной является аккреционная модель, согласно которой вспышка фуора – это резкое усиление темпа аккреции и, как следствие, усиление темпа потери массы (Хартманн, Кенйон, 1996). В этом случае увеличение светимости обусловлено повышением температуры аккреционного диска, а наблюдаемый спектр сверхгиганта принадлежит не звезде, а диску. Дифференциальное вращение диска и спад температуры от центральной части к периферии диска должны приводить к тому, что ширина фотосферных линий будет зависеть от длины волны. Этот эффект действительно подтверждается наблюдениями: в ближней ИК-области ширина молекулярных линий CO, выраженная в единицах скорости, заметно меньше, чем ширина фотосферных линий металлов в оптической области спектра. Следует отметить, однако, что в достаточно широком диапазоне спектра FU Ori, от 4000 до 8000 Å, ширина фотосферных линий не зависит от длины волны или потенциала возбуждения линии, как это предполагалось ранее (Петров и Хербиг, 2008).

Поскольку известных фуоров мало и причина их вспышек не вполне ясна, следует обратить внимание на те TTS, которые могут находиться в стадии, предшествующей вспышке фуора. По спектру V1057 Cyg, полученному Дж. Хербигом за 12 лет до вспышки, было видно, что звезда уже тогда отличалась необычно высоким темпом потери массы (Хербиг и др., 2003). Вероятно, это может служить одним из критериев для отбора кандидатов в “пре-фуоры” среди известных сTTS. В число возможных кандидатов попадают такие сTTS, как V1331 Cyg, LkHa 321 и AS 353 A. В спектрах этих звезд наблюдается аномальное отношение интенсивности эмиссионных линий H и K Ca II: излучение в линии H Ca II полностью поглощается в ветре звезды, поскольку длина волны H Ca II совпадает с длиной волны смещенной в коротковолновую сторону абсорбции водорода H ϵ . У большинства сTTS этот эффект не наблюдается, поскольку при умеренных темпах потери массы плотность ветра недостаточно велика, чтобы обеспечить поглощение в высоких членах Бальмеровской серии. V1331 Cyg и AS 353 A уже упоминались ранее в списках возможных кандидатов в “пре-фуоры” (Велин, 1976; Хербиг, 1989; МакМалдроч и др., 1993).

Объектом нашего исследования является звезда V1331 Cyg. Кроме признаков интенсивного истечения вещества, эта звезда отличается сильным эмиссионным спектром. При этом фотосферный спектр до сих пор не был зарегистрирован, и определение спектрального класса основывалось только на данных о распределении энергии в спектре, расстоянии до звезды и межзвездном поглощении. В ранних работах давались такие оценки спектрального класса: V0.5 (Коен, Куи, 1979), A8–F0 (Чаварриа, 1981), F0–F2 (Мундт и др., 1981), G0 (Колотилов, 1983). Эти разногласия вызваны, в частности, неопределенностью в расстоянии до звезды и особенно в величине межзвездного поглощения. В более позднем исследовании Хамэнн и Перссон (1992), на основании распределения энергии в широком диапазоне спектра звезды, дают спектральный тип G5 и светимость $L_* = 21 L_{\odot}$ при расстоянии $d = 700$ пс и межзвездном поглощении $A_V = 1.3$. V1331 Cyg является источником излучения в инфракрасном и миллиметровом диапазонах спектра (Хеннинг и др., 1998; МакМалдроч и др., 1993). В оптической области спектра звезда показывает нерегулярную переменность в диапазоне $V = 11.7–12.5$ (Зайцева, 1968; Колотилов, 1983).

Еще одно отличительное свойство V1331 Cyg – это кольцеобразная отражательная туманность вокруг звезды размером около 30 угловых секунд (Куи, 1964; Мундт, Эйслоффель, 1998). Такие туманности, наблюдаемые у многих фуоров, свидетельствуют об активных фазах истечения вещества в прошлой истории этих звезд (Гудрич, 1987). Кроме того, наблюдения на телескопе Хаббл позволили обнаружить еще одну кольцевую отражательную туманность меньшего размера (≈ 10 угловых секунд) вокруг V1331 Cyg (Кванц и др., 2007). Авторы делают вывод о том, что мы видим V1331 Cyg вдоль оси конусообразной туманности, с полюса вращения звезды и окружающего ее диска. В оптическом диапазоне эти туманности видны вследствие рассеяния света звезды на пылевых частицах. Наблюдения в миллиметровом диапазоне, на частотах излучения молекул CO, обнаруживают более сложные структуры: массивный ($\approx 0.5 M_{\odot}$) диск вокруг звезды, биполярные потоки и расширяющееся кольцо размером $\approx 10^4$ а. е. (МакМалдроч и др., 1993). Предполагается, что предыдущая вспышка фуора, сопровождавшаяся энергичным выбросом массы у этой звезды, произошла около четырех тысяч лет назад.

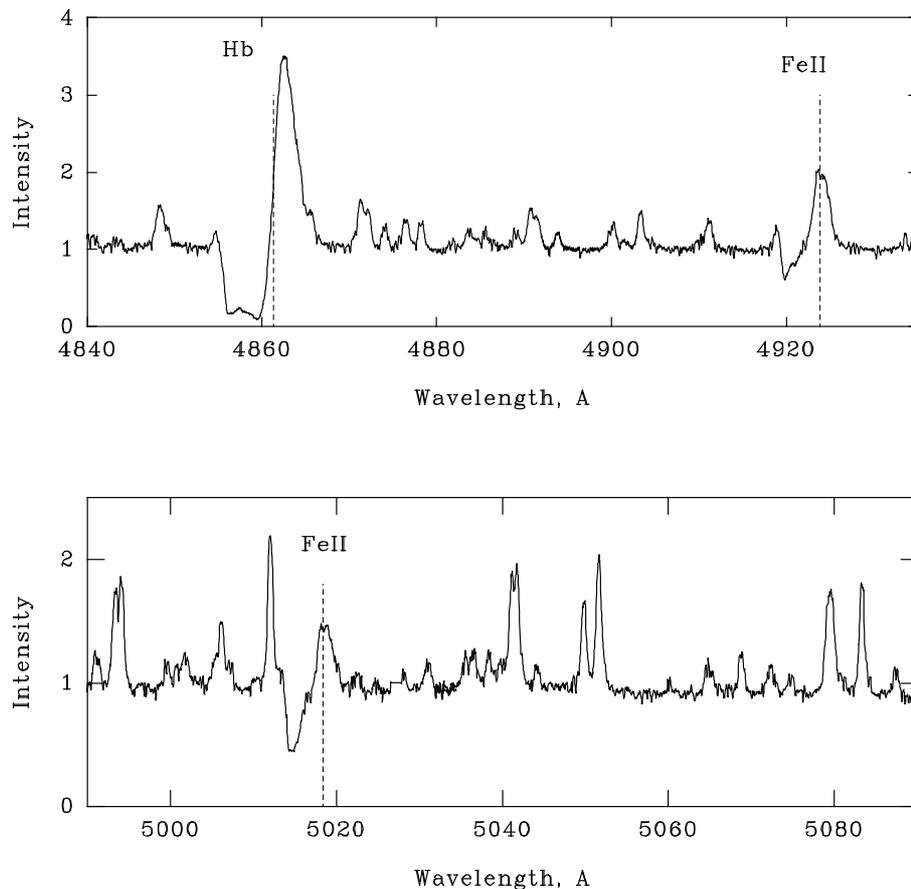


Рис. 1. Фрагменты спектров V1331 Cyg в области линии $H\beta$ и эмиссионных линий Fe II со смещенными в синюю сторону абсорбциями. Шкала длин волн на этом и последующих рисунках – астроцентрическая

Нашей задачей было проведение спектральной классификации V1331 Cyg и оценка ее основных параметров – температуры, ускорения силы тяжести и скорости вращения. Для этой цели мы использовали уникальные спектры V1331 Cyg, предоставленные в наше распоряжение Дж. Хербигом.

2 Наблюдательные данные

Два спектра V1331 Cyg были получены с помощью эшелювого спектрографа HIRES на телескопе Кек-1: 24 июля 2004 г. (JD = 2453210.553) и 23 ноября 2007 г. (JD = 2454427.726). В 2004 г. использовался ПЗС-детектор, позволявший перекрыть спектральный диапазон 4350–6750 Å. В 2007 г. использовалась мозаика из трех ПЗС-детекторов, перекрывавшая диапазон 4750–8690 Å. Спектры были обработаны стандартным образом с помощью программного пакета IRAF. Спектральное разрешение в обоих случаях составляло около 48000 ($\approx 6 \text{ км с}^{-1}$). Отношение сигнал/шум (в области 5000–7000 Å) $S/N = 150\text{--}250$ в обоих спектрах. На рис. 1–3 показаны фрагменты спектров V1331 Cyg.

Как и у многих классических TTS, спектр V1331 Cyg состоит из нескольких компонент:

- 1) узкие и сильно ослабленные линии фотосферного спектра звезды позднего класса;
- 2) многочисленные узкие эмиссионные линии нейтральных и ионизованных металлов;
- 3) широкие линии Бальмеровской и Пашеновской серий, с характерным профилем типа P Cyg;

- 4) узкие глубокие абсорбции, смещенные в коротковолновую сторону на $150\text{--}250\text{ км с}^{-1}$, принадлежащие линиям Fe II, Mg I, Na I и др.;
- 5) эмиссионные запрещенные линии [O I].

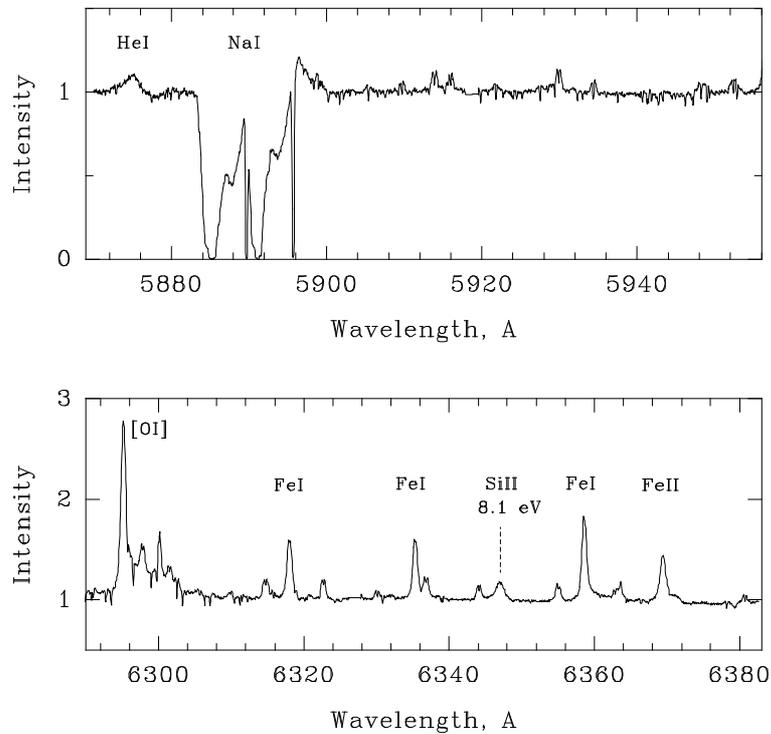


Рис. 2. Фрагменты спектров V1331 Cyg в области линий He I и Na I (вверху) и линий [O I] и Si II (внизу). Высокий эмиссионный пик линии [O I] 6300 Å находится на лучевой скорости -240 км с^{-1} относительно фотосферного спектра

В последующих разделах проводится анализ фотосферного спектра и кратко обсуждается происхождение других спектральных особенностей. Анализ P Cyg профилей Бальмеровских линий будет дан в другой статье.

3 Фотосферный спектр

Благодаря высокому спектральному разрешению и высокому отношению сигнал/шум впервые удалось обнаружить фотосферный спектр V1331 Cyg. (см. рис. 4).

Оказалось, что ширина фотосферных линий практически не превышает ширины инструментального профиля, $\text{FWHM} = 6\text{ км с}^{-1}$, то есть фотосферные линии не разрешаются и можно установить только верхний предел проекции скорости вращения звезды: $v \sin i \approx 6\text{ км с}^{-1}$. Это подтверждает вывод о том, что звезда наблюдается с полюса вращения. Как и ожидалось, спектр звезды значительно вуалирован: глубина фотосферных линий не превышает, в среднем, 10 % интенсивности континуума. Прежде чем определять спектральный тип звезды, следует обозначить некоторые особенности, связанные с вуалированием. Природа вуалирования фотосферного спектра cTTS не вполне ясна. Традиционное объяснение этого явления – непрерывное излучение горячего источника (пятна) на поверхности звезды в основании аккреционной колонки (*veiling continuum*). В этом случае глубина

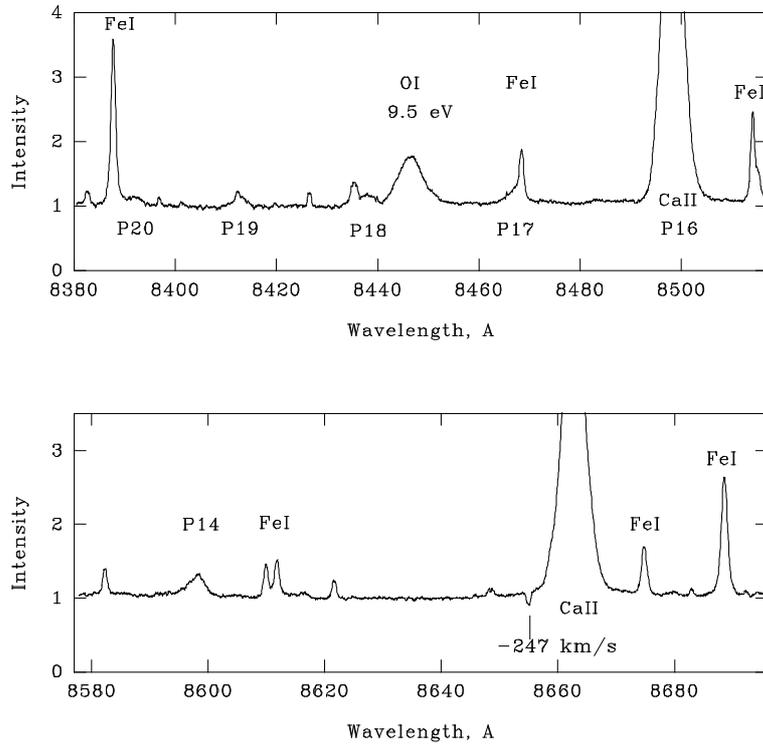


Рис. 3. Фрагменты спектров V1331 Cyg в области линий инфракрасного триплета Ca II и водородных линий Пашеновской серии. Абсорбционная деталь на -247 km s^{-1} принадлежит наиболее сильной линии Ca II 8662 Å

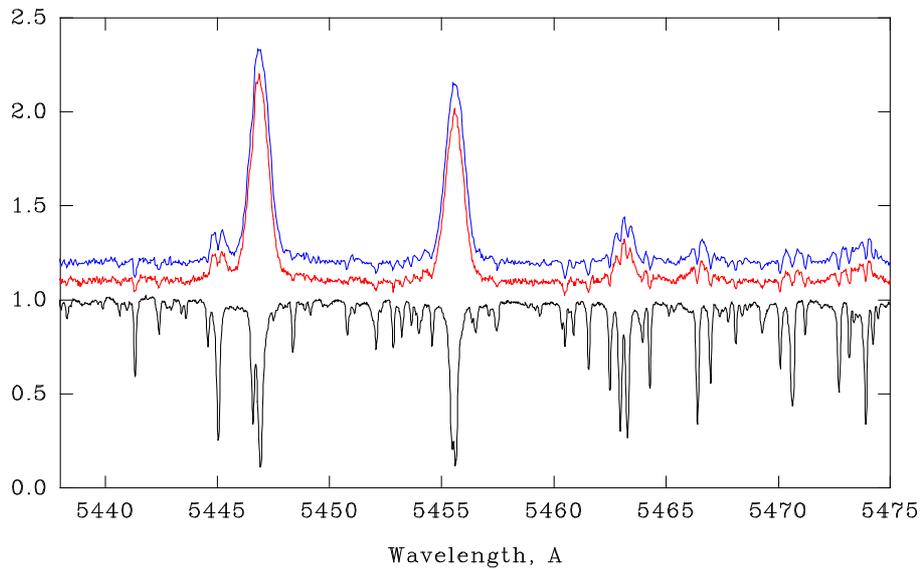


Рис. 4. Слабые фотосферные линии в спектрах V1331 Cyg 2004 г. (верхний) и 2007 г. (средний). Нижний спектр – стандарт G7 IV

всех фотосферных линий будет уменьшена на некоторый множитель VF (*veiling factor*), определяемый соотношением $EW(st)/EW(tts) - 1 = VF$, где $EW(tts)$ – эквивалентная ширина линии в спектре TTS, $EW(st)$ – эквивалентная ширина той же линии в спектре стандарта соответствующего спектрального класса. При этом величина вуалирования может существенно меняться с длиной волны, обычно возрастая в коротковолновую сторону. Более детальное изучение вуалированных спектров сTTS показало, однако, что степень вуалирования не одинакова даже для близко расположенных линий. Сравнивая спектр сTTS со спектром стандарта соответствующего спектрального типа можно заметить, что сильные линии в большей степени подвержены вуалированию, в то время как глубина наиболее слабых линий остается почти такой же, как и в спектре стандарта. Это, по-видимому, связано с аномальным строением атмосферы TTS в основании аккреционных каналов: нагрев верхних слоев атмосферы излучением ударной волны приводит к образованию хромосферного спектра. Узкие хромосферные эмиссии частично заполняют фотосферные линии и уменьшают их глубину, аналогично эмиссионным ядрам в линиях Ca II в солнечном спектре. Этот эффект наблюдался у многих TTS (Петров и др., 2011) и был промоделирован в работе (Додин, Ламзин, 2012). Самые слабые фотосферные линии, образующиеся в глубоких слоях фотосферы, остаются почти не искаженными. Это означает, что обычные критерии спектральной классификации, использующие отношения достаточно сильных спектральных линий, могут оказаться непригодными. Следует искать аналогичные критерии среди наиболее слабых линий и полагаться, скорее, на наличие или отсутствие каких-либо характерных линий, нежели на их относительную интенсивность.

При определении спектрального класса V1331 Cyg в качестве стандартов мы использовали спектр β Aqr (G0 Ib–II), полученный Дж. Хербигом на том же спектрографе, что и спектр V1331 Cyg в 2007 г., а также спектры высокого разрешения из библиотеки UVES/VLT¹ в диапазоне классов G5–K2, II–IV, в нескольких участках от 5000 до 7000 Å, наиболее свободных от сильных эмиссионных линий в спектре V1331 Cyg.

В результате было найдено, что спектральный класс V1331 Cyg находится в пределах G7–K0 IV. Лучевая скорость V1331 Cyg, определенная по нашим спектрам: $RV = -15.0$ км с⁻¹. Различие в RV между спектрами 2004 и 2007 гг. не превышает вероятной ошибки измерения ± 0.3 км с⁻¹. Средний (по слабым и сильным линиям) фактор вуалирования $VF \approx 3$, т. е. интенсивности всех линий уменьшены в ≈ 4 раза.

При определении светимости ($\log g$) мы использовали также синтетические спектры, вычисленные с помощью моделей Куруца и атомных данных VALD (Купка и др., 1999) для нескольких спектральных участков, содержащих линии ионов, чувствительные к изменению $\log g$. На рис. 5 показан один из таких участков. Видно, что спектр V1331 Cyg определенно не соответствует низкой светимости сверхгиганта и более похож на спектр с $\log g = 3-4$ (IV класс светимости).

4 Эффект вуалирования

После того, как были установлены спектральный класс и светимость, мы провели более детальное исследование вуалирования, используя в качестве стандарта спектр звезды G7 IV (HD 190248). Были измерены эквивалентные ширины более 200 фотосферных линий поглощения в спектрах V1331 Cyg и стандарта и для каждой линии вычислен фактор VF . При высоком отношении сигнал/шум ошибки измерения EW вызваны, в основном, ошибками в проведении уровня континуума, связанными с многочисленными бледами слабых линий. В спектре V1331 Cyg мы измеряли линии в диапазоне эквивалентных ширин EW от 2 до 10 mÅ. Для слабых линий ($EW < 5$ mÅ) ошибка EW составляла 30–50 %, для более сильных – 20–30 %.

Оказалось, что фактор вуалирования существенно различается у разных линий: чем сильнее линия в спектре стандарта, тем больше VF в спектре V1331 Cyg (рис. 6).

Это, по-видимому, тот хромосферный эффект, о котором шла речь выше. Разброс относительно этой зависимости вызван, в основном, ошибками измерений. Мы не обнаружили зависимость VF

¹ <http://www.eso.org/sci/observing/tools/uvespop/>

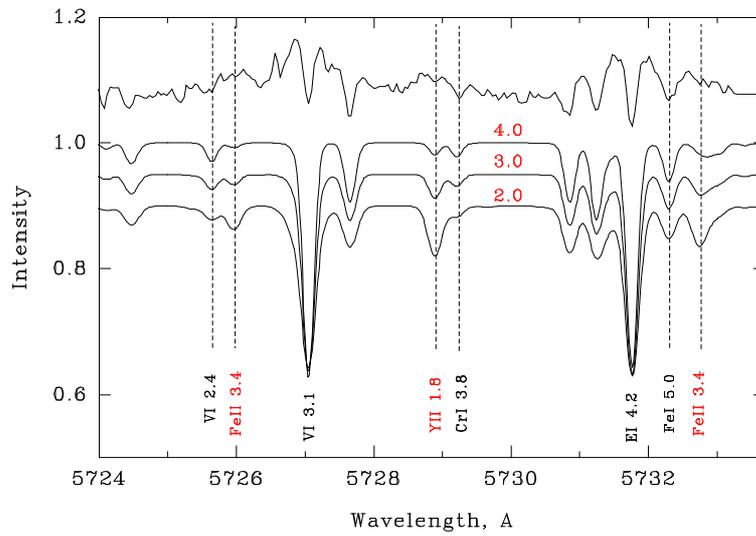


Рис. 5. Пары линий нейтральных и ионизованных металлов, использовавшиеся как критерий светимости. Вверху – спектр V1331 Cyg. Внизу – синтетические спектры с параметром $\log g = 2.0, 3.0$ и 4.0

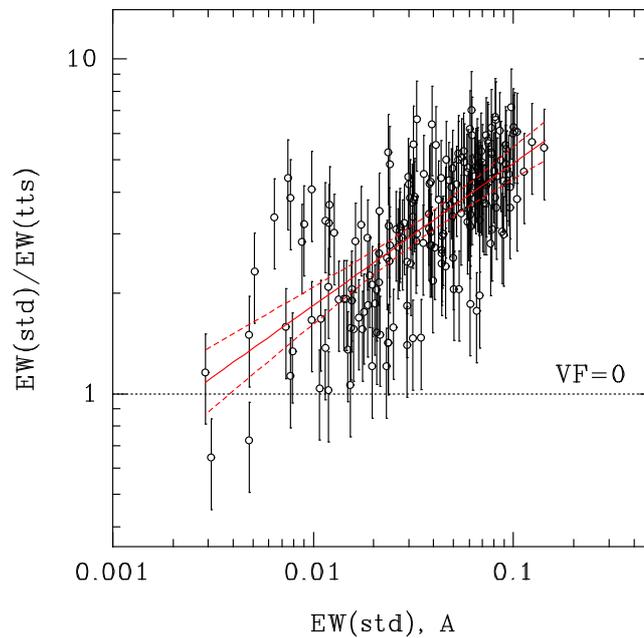


Рис. 6. Отношение эквивалентных ширин в спектре V1331 Cyg и стандарта G7 IV. Вуалирование минимально в самых слабых линиях и возрастает до $VF \approx 5$ у более сильных линий. Нулевой уровень вуалирования показан горизонтальной линией. Наклонная прямая – линия регрессии. Штриховыми линиями показаны границы 99 % достоверности

ни от длины волны в диапазоне 4400–8500 Å, ни от потенциала возбуждения нижнего уровня в диапазоне 0–6 eV, ни от потенциала ионизации элемента.

Зависимость, показанная на рис. 6, остается и в том случае, если мы используем более поздний стандарт, K1. Использовать более ранний стандарт (G5) не имеет смысла, так как при этом слабые линии у V1331 Cyg оказываются сильнее, чем у стандарта, что приводит к отрицательному значению VF. Более поздний (K3) стандарт также не приемлем, поскольку там появляются многочисленные линии металлов низкого возбуждения, которые заведомо отсутствуют в спектре V1331 Cyg.

5 Эмиссионный спектр

В спектрах классических TTS обычно выделяют два компонента эмиссионных линий – широкий ($\approx 100 \text{ км с}^{-1}$) и узкий ($\approx 30 \text{ км с}^{-1}$). Предполагается, что широкие линии образуются в магнитосфере и на внутренней границе аккреционного диска, а узкие – в области за ударной волной (post-shock) в основании аккреционного канала (Беристэйн и др., 1998; Муцеролле и др., 2001). Спектр V1331 Cyg изобилует сравнительно узкими эмиссионными линиями металлов, преимущественно нейтральных. Ширина линий на половине интенсивности от 20 до 50 км с⁻¹. Лучевые скорости эмиссионных линий не отличаются от скорости звезды, определенной по фотосферному спектру. Мы измерили эквивалентные ширины 32-х наименее блендированных эмиссионных линий Fe I, имеющих потенциалы возбуждения нижнего уровня от 0.9 до 4.5 eV и семи линий Fe II с потенциалами возбуждения от 2.9 до 3.9 eV. Метод кривой роста (Хербиг, 1990) дает оценку температуры возбуждения $T_{exc} = 3800 \pm 300 \text{ К}$ и электронной плотности $\log N_e = 8 \pm 0.5$.

В спектре V1331 Cyg присутствуют и широкие эмиссионные линии – это Бальмеровская и Пашеновская серии водорода, инфракрасный триплет Ca II, He I 5876 Å, а также O I 8446 Å. Примечательно то, что в спектре V1331 Cyg нет явных признаков аккреции – обратных P Cyg профилей, например, в линии He I 5876 Å, часто присутствующих в спектрах классических TTS. Можно заметить лишь асимметрию профиля He I 5876 Å, указывающую на возможную абсорбцию с красной стороны. Запрещенные линии [O I] 6300 и 6363 Å, и [S II] 6717 и 6731 Å, образующиеся в ветре и джете, имеют максимум интенсивности на лучевой скорости $-240 \dots -260 \text{ км с}^{-1}$.

6 Спектральные признаки “оболочки”

Отличительная особенность спектра V1331 Cyg – смещенные в коротковолновую сторону абсорбции, принадлежащие линиям металлов Fe II 4924 и 5118 Å, Mg I 5183 Å, Li I 6707 Å, K I 7699 Å и Na I D. В линиях Fe II и Mg I эти абсорбции более широкие, в диапазоне лучевых скоростей от -100 до -250 км с^{-1} относительно звезды, в то время как резонансные линии имеют только один узкий компонент на скорости около -240 км с^{-1} . Такие абсорбционные компоненты, называемые *shell-lines*, наблюдаются в спектрах фуоров (Мундт, 1984; Хербиг и др., 2003; Хербиг, 2009). Примечательна стабильность узкого компонента: в наших спектрах 2004 и 2007 гг. его положение в резонансных линиях не изменилось. Стабильность лучевой скорости и интенсивности этих линий на интервале порядка года указывает на то, что оболочка должна быть на достаточно большом расстоянии от звезды, так как при скорости 240 км с^{-1} оболочка проходит 50 а. е. в год. Рассматривая аналогичные линии оболочки в спектре фуора V1057 Cyg, Хербиг (2009) пришел к выводу о том, что линии образуются на большом расстоянии от звезды, в остатках (фрагментах) когда-то выброшенной оболочки.

В спектре V1331 Cyg узкий и наиболее стабильный компонент резонансных линий находится на той же лучевой скорости (-240 км с^{-1}), что и смещенный в синюю сторону эмиссионный пик запрещенной линии [O I] 6300 Å. Запрещенные линии образуются при низкой плотности, в больших объемах газа на больших расстояниях от звезды, и возбуждаются ударными волнами (Хартигэн и др., 1995). Можно предположить, что при малом угле наклона мы видим звезду сквозь джет, и смещенные в синюю сторону абсорбции в резонансных линиях образуются там же, где и эмиссия [O I], т. е. в джете звезды.

7 Обсуждение

Спектральный класс G7–K0 IV соответствует температуре звезды $T_{eff} = 5000\text{--}5250$ К. При $L_* \approx 21 L_\odot$ (Хамэнн, Перссон, 1992), используя сетку моделей звезд до главной последовательности (Сисс и др., 2000), находим массу $\approx 2.8 M_\odot$ и радиус $\approx 5 R_\odot$, что соответствует ускорению силы тяжести $\log g = 3.5$. Это примерно на границе между TTS и звездами Ae-Be Хербига. Как указывалось во Введении, распределение энергии в спектре V1331 Cyg соответствует более раннему спектральному классу, от F0 по ультрафиолетовой области (Мундт и др., 1981) до G5 по видимой области (Хамэнн и Перссон, 1992). Это может быть вызвано аккрецией – излучением горячего газа, падающего на поверхность звезды. Присутствие горячего газа в системе видно по эмиссионным линиям высокого возбуждения: Si II 6347 Å (8.1 eV), O I 8448 Å (9.5 eV). Так же, как и водородные линии Бальмеровской и Пашеновской серий, эти линии имеют широкий профиль (см. рис. 3) в отличие от многочисленных узких линий металлов низкого возбуждения. Признаки расширяющейся оболочки свидетельствуют об эпизодах энергичных выбросов массы в прошлом, а характерные P Cyg профили Бальмеровских линий означают высокий темп потери массы в настоящем. По этим признакам можно предположить, что V1331 Cyg находится в фазе, предшествующей вспышке фуора. Применима ли к этой звезде модель магнитосферной аккреции, как у классических TTS, или дисковой аккреции, как у фуоров? Спектр фуора, образующийся, предположительно, в атмосфере дифференциально вращающегося диска, отличается широкими фотосферными линиями и низким значением ускорения силы тяжести. В случае V1331 Cyg мы смотрим на звезду с полюса, под малым углом наклона, и по ширине фотосферных линий невозможно определить скорость вращения. Но ускорение силы тяжести (класс светимости IV) определенно указывает на то, что наблюдаемый спектр принадлежит звезде, а не диску.

Хербиг (2009) предположил, что явление фуора присуще молодым звездам, приближающимся к “кризису углового момента”. Вследствие интенсивного выброса массы звезда быстро теряет свой угловой момент и таким образом замедляет вращение. Классический P Cyg профиль Бальмеровских линий водорода с насыщенной абсорбцией и высокая скорость истечения газа указывают на большой темп потери массы. Насколько быстро вращается V1331 Cyg? Периоды вращения TTS определяются по модуляции блеска неоднородностями (пятнами) на поверхности. Однако при малом угле наклона оси вращения к лучу зрения этот метод практически не применим, так как трудно выявить малую амплитуду модуляции блеска на фоне непериодических изменений, вызванных аккрецией. Имеющиеся в литературе фотометрические данные (Колотилов, 1983) не обнаруживают какого-либо достоверного периода. Можно попытаться использовать эффект вращательной модуляции лучевых скоростей узких эмиссионных линий, наблюдающийся у многих TTS (Петров и др., 2011). Если эмиссионная область на поверхности звезды не идеально симметрична относительно оси вращения, такая модуляция может быть обнаружена даже при малой амплитуде колебаний скорости. Представляет интерес также измерение магнитного поля на поверхности этой звезды, видимой с полюса. Период вращения и напряженность магнитного поля – ключевые параметры в моделях аккреции и ветра молодых звезд.

8 Выводы

Фотосферный спектр V1331 Cyg принадлежит звезде спектрального класса G7–K0 IV. На диаграмме температура-светимость звезда попадает в область радиативного трека для массы $\approx 2.8 M_\odot$. Радиус звезды $\approx 5 R_\odot$, возраст ≈ 1.5 млн лет. Проекция скорости вращения $v \sin i < 6$ км с⁻¹. Лучевая скорость $RV = -15.0 \pm 0.3$ км с⁻¹, одинакова в 2004 и 2007 гг. Профили Бальмеровских линий указывают на максимальную скорость звездного ветра ≈ 400 км с⁻¹.

9 Благодарности

Авторы глубоко благодарны Дж. Хербигу (G.H. Herbig) за предоставленные спектры V1331 Cyg, а также М. Романовой (M. Romanova), Р. Куросаве (R. Kurosawa) и Ф. Гамейро (J.F. Gameiro) за плодотворные дискуссии.

Литература

- Беристэйн и др. (Beristain G., Edwards S., Kwan J.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 499. P. 828.
- Бувье и др. (Bouvier J., Alencar S.H.P., Harries T.J., Johns-Krull C.M., Romanova M.M.) // *Protostars and Planets V.* / Eds Reipurth B., Jewitt D. and Keil K. University of Arizona Press. Tucson. 2007. P. 479.
- Велин (Welin G.) // *Astron. Astrophys.* 1976. V. 49. P. 145.
- Гудрич (Goodrich R.W.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1987. V. 99. P. 16.
- Гюнтер (Guenter H.M.) // *Astron. Nachr.* 2013. V. 334. N. 1. P. 1.
- Додин А.В., Ламзин С.А. // *Письма в Астрон. журн.* 2012. Т. 38. С. 727.
- Зайцева Г.В. // *Переменные звезды.* 1968. V. 16. P. 435.
- Кванц и др. (Quanz S.P., Apai D., Henning Th.) // *Astrophys. J.* 2007. V. 656. P. 287.
- Кёнигл (Koenigl A.) // *Astrophys. J.* 1991. Part 2. V. 370. P. L39.
- Коен, Куи (Cohen V., Kuhl L.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1979. V. 41. P. 743.
- Колотилов Е.А. // *Письма в Астрон. журн.* 1983. Т. 9. С. 552.
- Куи (Kuhl L.V.) // *Astrophys. J.* 1964. V. 140. P. 1409.
- Купка и др. (Kupka F., Piskunov N.E., Ryabchikova T.A., Stempels H.C., Weiss W.W.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1999. V. 138. P. 119.
- Кэбрит и др. (Cabrit S., Edards S., Strom S.E., Strom K.M.) // *Astrophys. J.* 1990. V. 354. P. 687.
- МакМалдроч и др. (McMuldroch S., Sargent A.I., Blake G.A.) // *Astrophys. J.* 1993. V. 106. P. 2477.
- Мундт (Mundt R.) // *Astrophys. J.* 1984. V. 280. P. 749.
- Мундт и др. (Mundt R., Appenzeller I., Bertout C., Krautter J., Chavarría C.) // *Astron. Astrophys.* 1981. V. 93. N. 1–2. P. 412.
- Мундт, Эйсллоффель (Mundt R., Eisloffel J.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 116. P. 860.
- Муцеролле и др. (Muzerolle J., Calvet N., Hartmann L.) // *Astrophys. J.* 2001. V. 550. P. 944.
- Мэтт, Пудритц (Matt S., Pudritz R.E.) // *Astrophys. J.* 2005. V. 632. L135.
- Петров П.П. // *Астрофизика.* 2003. Т. 46. № 4. С. 506.
- Петров и др. (Petrov P.P., Gahm G.F., Stempels H.C., Walter F.M., Artemenko S.A.) // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 535. P. 6.
- Петров и Хербиг (Petrov P.P., Herbig G.H.) // *Astron. J.* 2008. V. 136. P. 676.
- Сиесс и др. (Siess L., Dofur E., Forestini M.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 358. P. 593.
- Хамэнн, Перссон (Hamann F., Persson S.E.) // *Astrophys. J.* 1992. V. 82. P. 247.
- Хартигэн и др. (Hartigan P., Edwards S., Ghandour L.) // *Astrophys. J.* 1995. V. 452. P. 736.
- Хартманн, Кенъон (Hartmann L., Scott J. Kenyon) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1996. V. 34. P. 207.
- Хеннинг и др. (Henning Th., Burkert A., Launhardt R., Leinert Ch., Stecklum B.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 336. P. 565.
- Хербиг (Herbig G.H.) // *Astrophys. J.* 1977. Part 1. V. 217. N. 1. P. 693.
- Хербиг (Herbig G.H.) // *ESO Workshop on Low Mass Star Formation and Pre-Main Sequence Objects.* 1989. P. 233.
- Хербиг (Herbig G.H.) // *Astrophys. J.* 1990. V. 360. P. 639.
- Хербиг и др. (Herbig G.H., Petrov P.P., Duenmler R.) // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. P. 384.
- Хербиг (Herbig G.H.) // *Astrophys. J.* 2009. V. 138. P. 448.
- Чаварриа (Chavarría K.) // *Astron. Astrophys.* 1981. V. 101. N. 1. P. 105.
- Шу и др. (Shu F., Najita J., Ostriker E., Wilkin F., Ruden S., Lizano S.) // *Astrophys. J.* 1994. V. 429. N. 2. Part 1. P. 781.