

УДК 524.35-355

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПЕКУЛЯРНОГО А-СВЕРХГИГАНТА 3 PUP

© 2010 Е. Л. Ченцов^{1*}, В. Г. Клочкова^{1**}, А. С. Мирошниченко^{2***}¹ Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия² Университет штата Северная Каролина, Гринсборо, NC 27042, США

Поступила в редакцию 19 октября 2009 г.; принята в печать 19 ноября 2009 г.

По оптическим спектрам, полученным в 1997–2008 гг., изучены особенности оптического спектра и поле скоростей в атмосфере пекулярного сверхгиганта 3 Pup. Профили сильных линий Fe II и других ионов группы железа имеют специфическую форму: крылья приподняты эмиссиями, а ядро заострено депрессией. Последняя особенность нарастает с усилением линии и увеличением длины волны. Профили линий переменны: от спектра к спектру изменяются величина и знак асимметрии абсорбций и отношения интенсивности синей и красной эмиссий. Изменения V_r для запрещенных эмиссий и резких оболочечных ядер абсорбций FeII(42) и других сильных линий ионов группы железа со временем минимальны. Средняя скорость для указанных линий может быть принята в качестве системной: $V_{\text{sys}} = 28.5 \pm 0.5$ км/с. По слабейшим фотосферным абсорбциям, а также по фотосферным абсорбциям Mg II, Si II уверенно фиксируется изменение скорости от даты к дате, до 7 км/с. Количественная спектральная классификация дает значение спектрального класса $A2.7 \pm 0.3$ Ib. По эквивалентным ширинам и профилям H δ и H γ и по эквивалентной ширине триплета OI 7774 Å оценена абсолютная величина $M_v = -5.5^m \pm 0.3^m$, что приводит к оценке расстояния до звезды 0.7 кпк.

Ключевые слова: звезды — переменные и пекулярные

1. ВВЕДЕНИЕ

Долгое время природа яркой звезды 3 Pup (HD 62623 = HR 2996 = MWC 570 = HIP 37677) оставалась неясной. В Каталоге ярких звезд [1] эта звезда фигурирует как сверхгигант A2 Iab. Однако, 3 Pup рассматривали и в качестве объекта, родственного звездам, эволюционирующим к планетарной туманности [2] с двойным ядром. После спектроскопического исследования Плетса и др. [3], определивших близкий к солнечному химический состав атмосферы звезды, появился новый аргумент в пользу того, что 3 Pup является массивным сверхгигантом. Однако, звезда обладает нетипичным для массивных А-сверхгигантов свойством — присутствием околозвездной газопылевой оболочки. Наличие оболочки проявляется прежде всего в избытке ИК-излучения (3 Pup отождествлена с ИК-источником IRAS 07418–2850) и специфических двухпиковых эмиссионных деталей в оптическом спектре.

Звездные величины равны $B = 4.12^m$ и $V = 3.98^m$, избыток цвета составляет $E(B-V) = 0.08^m$ [4]. Галактические $l = 244.4^\circ$, $b = -2.5^\circ$ и экваториальные координаты на эпоху 2000 года $\alpha = 07^h 43^m 48^s$, $\delta = -28^\circ 57' 17''$. Параллакс, недавно уточненный в работе [5], $\pi = 0.59 \pm 0.17$ mas. Благодаря большой яркости звезда 3 Pup оказалась в числе тех нескольких сот звезд, на которых построена Гарвардская спектральная классификация. Но если Кэннон [6] приписала ей тот же спектральный класс A2 pec, что и α Cyg (пекулярность в обоих случаях относится к узости и слабости водородных линий, т.е. обе звезды являются сверхгигантами), то Мори [7] заметила, что у 3 Pup и температура и светимость несколько ниже, чем у α Cyg, — в современных обозначениях: A2–A3 и Ib–II.

Меррилл [8] обнаружил в спектре 3 Pup несколько эмиссионных линий: раздвоенную H α с более сильным красным компонентом (профиль типа P Cyg III по Билсу [9]), [OI] 1F 6300, 6364 Å, FeII(40) 6433, 6516 Å, а также заподозрил присутствие эмиссий и в некоторых других линиях FeII. Эмиссионные детали в профилях H β , H γ [10] и

*E-mail: echen@sao.ru

**E-mail: valenta@sao.ru

***E-mail: A_MIROSH@uncg.edu

Таблица 1. Сведения об использованных спектрах 3Pup . В последней колонке указаны некоторые детали, касающиеся коррекции V_r по теллурическим линиям.

Дата	$\Delta\lambda$	Спектрограф	$\lambda/\Delta\lambda$	Примечания
12.11.97	4690–8600	PFES	15000	для $\lambda > 5800 \text{ \AA}$
3.12.98	3940–5675	PFES	15000	нет
14.03.03	5160–6650	НЭС	60000	с ошибками порядка 0.2 км/с
25.12.04	3700–8870	CFHT	70000	с ошибками порядка 0.2 км/с
26.12.06	3650–8600	McDon	60000	с ошибками порядка 0.2 км/с
7.02.07	4550–6010	НЭС	60000	с ошибками порядка 0.2 км/с
4.11.08	4460–5930	НЭС	60000	с ошибками порядка 0.2 км/с

дублета $\text{NaI}(1)[3]$ замечены лишь 60 лет спустя. Из эмиссий ближней инфракрасной области известны сильный триплет $\text{CaII}(2)$ 8498, 8542, 8562 \AA [11] и дублет $[\text{CaII}]F$ 7291, 7324 \AA [12] (линии ошибочно приписаны $[\text{OII}]$). Что касается абсорбционных линий, то глазомерные оценки их интенсивностей в интервале длин волн 3120–6565 \AA [13, 14] подтвердили меньшую по сравнению с αCyg температуру возбуждения 3Pup , следующую из классификации Мори, и выявили в ее спектре признаки присутствия оболочки. В частности, абсорбции $\text{MgII}(4)$ и $\text{SiII}(1,2,3)$ в спектре 3Pup слабее, чем в спектре αCyg , а линии $\text{FeII}(42)$ усилены по сравнению с линиями $\text{FeII}(37, 38, 49)$. Различия в спектрах сверхгиганта и shell-звезды наглядно демонстрирует Plate 22 в атласе Морган и др. [15] на примере αCyg (A2 Ia) и 17 Lep (Ap sh). По температуре 3Pup близка к обеим звездам, но ее спектр по ряду признаков (глубина линий TiII и FeII , ширина водородных линий) ближе к спектру 17 Lep.

Уже первое ознакомление с имеющимися у нас спектрами 3Pup показало, что для спектроскопии высокого разрешения это очень благодарный объект: звезда яркая, спектр ее изобилует разнообразными, по большей части слабыми, но вполне отчетливыми деталями. Но, как ни странно, до сих пор спектр в видимой и ближней инфракрасной областях даже не был достаточно подробно описан. Это обстоятельство послужило основанием для включения 3Pup в нашу программу спектроскопии звезд с околосредными оболочками для детального изучения спектра и проведения многократных наблюдений с целью изучения ожидаемой переменности спектра.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Спектральные данные для 3Pup получены нами в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа БТА Специальной Астрофизической Обсерватории РАН (САО РАН) с эшелльным спектрографом НЭС [16, 17]. Наблюдения выполнены с использованием ПЗС-матрицы 2048×2048 элементов и с резателем изображений [17]. Спектральное разрешение составляет $\lambda/\Delta\lambda \geq 60000$, отношение сигнала к уровню шумов $S/N \geq 100$. Для расширения временного диапазона наблюдений 3Pup мы привлекли к исследованию спектры с умеренным спектральным разрешением, полученные нами в 1997–1998 гг. в первичном фокусе 6-метрового телескопа с эшелле-спектрографом PFES [18]. Экстракция одномерных векторов из двумерных эшелле-спектров выполнена с помощью модифицированного [19] 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.

Кроме спектров, полученных со спектрографом НЭС, мы использовали наблюдения звезды с высоким спектральным разрешением на спектрографах ESPaDOnS [20] 4-метрового телескопа CFHT и cs23 [21] в фокусе куде 2.7 метрового телескопа обсерватории McDonald. Обработка последних спектров была проведена с помощью пакета IRAF. В Табл. 1 указаны даты всех наблюдений, зарегистрированные участки спектра, использованные спектрографы и спектральное разрешение, а в Табл. 2 полученные величины гелиоцентрической лучевой скорости V_r .

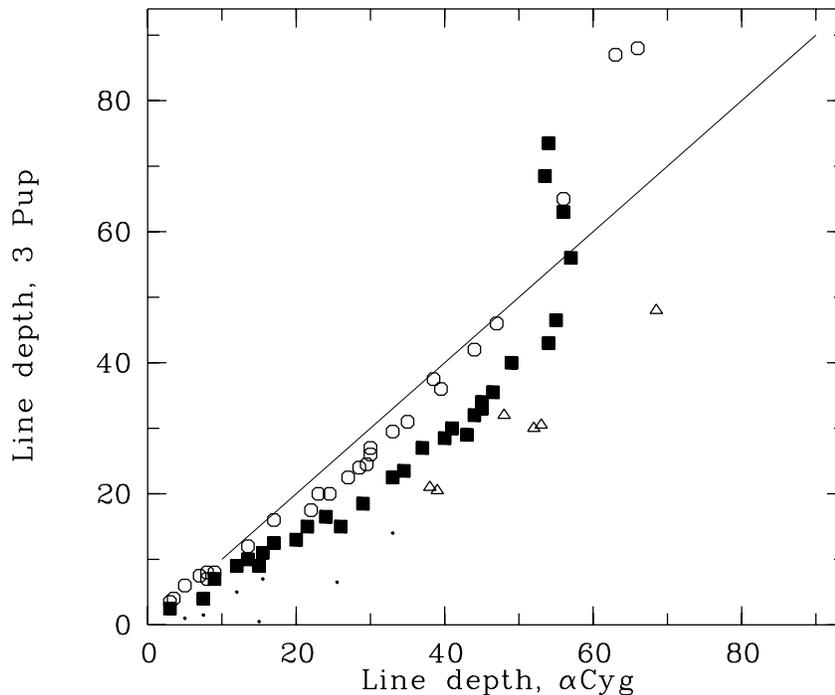


Рис. 1. Сравнение центральных глубин линий R в спектрах 3 Pup (ордината) и α Cyg (абсцисса). Открытые кружки — линии Ti II в интервале длин волн 3680–5190 Å, заполненные квадратики — линии Fe II в интервале 3780–5170 Å, точки — линии Fe II в интервале 5990–6520 Å, треугольники — линии Mg II (4) и Si II (1,2,3).

Контроль и коррекция инструментального согласования спектров звезды и лампы с полым катодом выполнены по теллурическим линиям [OI], O₂ и H₂O. Наличие коррекции и остаточные ошибки для каждого из спектров указаны в последней колонке Табл. 1. Более детально процедура измерения лучевой скорости V_r по спектрам, полученным со спектрографом НЭС, и источники ошибок описаны в статье [22]. Среднеквадратичная погрешность измерений V_r для звезд с узкими абсорбциями в спектре ≤ 0.8 км/с (точность по одной линии).

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Пекулярность оптического спектра 3 Pup

Сопоставление профилей линий и их параметров в наших спектрах 3 Pup и спектрах звезд сравнения, полученных с одним и тем же спектральным разрешением, показало, что проявление оболочки 3 Pup не ограничено отдельными, указанными выше линиями. Оно усиливается постепенно — с интенсивностью и с длиной волны линии. На Рис. 1 сравниваются центральные глубины абсорбций в спектрах 3 Pup и α Cyg (глубина, соответствующая нулевой остаточной интенсивности, принята за 100). В то время, как линии Mg II и Si II при любых интенсивностях и в любой части

видимого спектра у α Cyg глубже, чем у 3 Pup, линии Ti II и Fe II синей части спектра при малой и средней интенсивности глубже у α Cyg, но с ростом интенсивности их глубины у обеих звезд приближаются друг к другу, а самые сильные линии Ti II (13) и Fe II (42) у 3 Pup уже глубже, чем у α Cyg. В желтой области спектра 3 Pup абсорбции Fe II аномально слабы (левый нижний угол Рис. 1), все они в той или иной мере “приподняты” эмиссиями, у некоторых абсорбционное ядро профиля выведено на уровень непрерывного спектра. При этом абсорбции Mg II и Si II у 3 Pup уступают таковым у α Cyg не только по глубине, но и по эквивалентной ширине (для Mg II 4481 — 0.56 и 0.66 Å соответственно), а эквивалентные ширины дублета Ti II (13) у обеих звезд примерно одинаковы. Как видно из Рис. 2, их меньшая ширина у 3 Pup компенсируется большей глубиной. Форма профилей у линий Ti II (13) и Fe II (42) одна и та же. На Рис. 3 профили линий Fe II разной интенсивности в спектрах 3 Pup и α Cyg сравниваются между собой и с профилями Mg II 4481. У α Cyg все линии сформированы вблизи фотосферы, они симметричны и различаются лишь глубиной. У 3 Pup фотосферной можно считать только линию Mg II 4481 Å, а в линиях Fe II очевиден вклад оболочки, которая придает профилям специфическую форму: крылья приподняты эмиссиями, а ядро заострено

Таблица 2. Гелиоцентрические скорости по отдельным линиям и их средние значения для групп линий в спектрах 3 Pup. Для линий NaI и FeII(42) за дату 25.12.04 под средними значениями V_r приведены их значения для выделяющихся компонентов ядер.

Даты	V_r , км/с					
	12.11.97	14.03.03	25.12.04	26.12.06	07.02.07	04.11.08
<u>Межзвездные линии:</u>						
NaI(1)	33.2	33.0	33.6	33.3	33.5	33.0
	—	29.6	29.4	29.7	30.6:	30.7:
	—	36.3	37.4	37.4	36.5	35.8
KI(1)	28:	—	28	28.7:	—	—
	—	—	37	—	—	—
CaII(1)	—	—	27.0	28.1	—	—
			38:	—	—	—
DIB	30.5	31:	31.0	29.5	31	29
<u>Звездные эмиссии:</u>						
[OI]	31:	27	28	29	—	—
[FeII], [CaII]	25:	—	28	28	30:	26:
FeII и др.	28:	26	24	27.5	28	27
<u>Звездные абсорбции:</u>						
FeII(42)	30	30:	30.5	29.8	29.4	27.3
			28.8			
FeII, TiII и др.	29.5:	29.5:	28.5	30.5	30.0	28.0
MgII, SiII	27:	32	24	30.2	32:	30
Слабейшие ($r \rightarrow 100$)	28	28	23	30.5	29.8	29.2
H δ	—	—	28	29	—	—
H γ	—	—	28	26	—	—
H β	28	—	28	25	27	26
H α	24	26	22	26	—	—

депрессией. Последняя заметна уже у абсорбций с глубиной $R \approx 20$ и с усилением линии нарастает, что и объясняет изгибы вверх цепочек значков на Рис. 1. Заостренные ядра характерны и для членов серии Бальмера H β –H8, их центральные глубины больше, чем у α Sуг.

Присутствие эмиссий в крыльях при высоком разрешении заметно начиная по крайней мере с длины волны $\lambda \approx 4300 \text{ \AA}$. Рисунок 4 иллюстрирует изменение формы профиля с длиной волны: по мере продвижения из синей области в красную абсорбции постепенно сменяются двухпиковыми эмиссиями с провалом интенсивности в центре. Профиль

раздвоенной эмиссии FeII(40) 6433 \AA (верхний на Рис. 4) повторяется на Рис. 5 — в сравнении с профилями разрешенной линии CaII(2) 8542 \AA и нескольких запрещенных линий. Последние, наряду с отмеченными выше дублетами [OI]1F и [CaII]1F, представлены в спектре 3 Pup также многочисленными слабыми линиями [FeII].

Сопоставление профилей эмиссий дает важную информацию о геометрии и кинематике оболочки 3 Pup. Все запрещенные эмиссии в доступной нам области спектра имеют одинаковые по форме и ширине профили и в пределах ошибок показывают

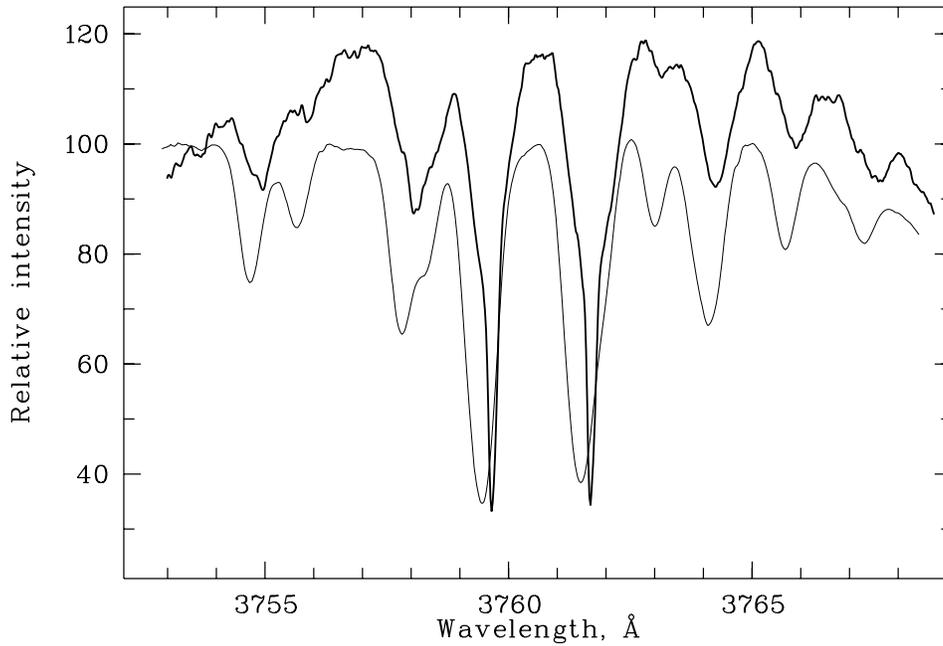


Рис. 2. Спектры α Cyg (внизу, тонкая линия) и 3 Pup (сдвинут вверх на 20 делений). Сильнейшие линии: TiII(13) 3759 и 3761 \AA . Спектр 3 Pup на краях рисунка понижен крыльями линий H12 3750 и H11 3771 \AA . Здесь и на последующих рисунках относительная интенсивность $r = 100$ соответствует уровню континуума.

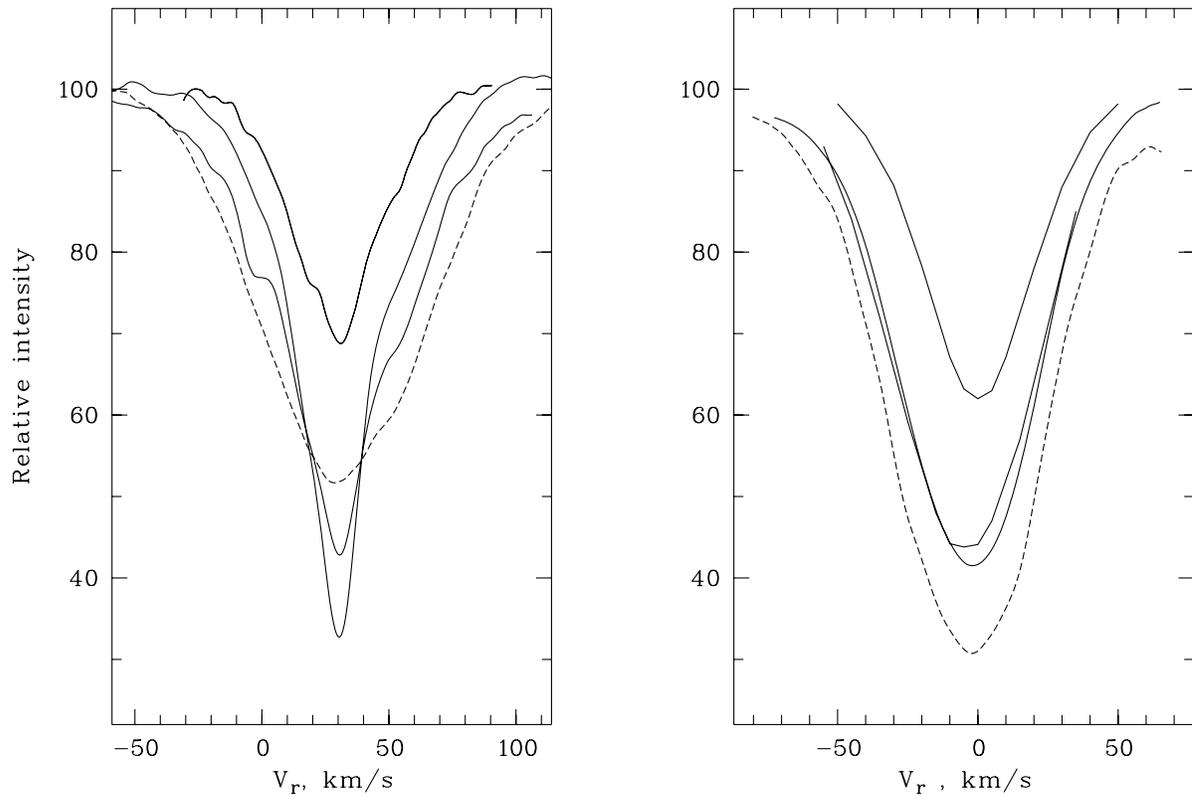


Рис. 3. Профили Fe II и MgII(4) в спектрах 3 Pup (26.12.06, слева) и α Cyg (справа). Сплошными линиями показаны (сверху вниз) профили: FeII(49) 5235 \AA , FeII(27) 4233 \AA и FeII(42) 4924 \AA , штриховыми — профили MgII 4481 \AA .

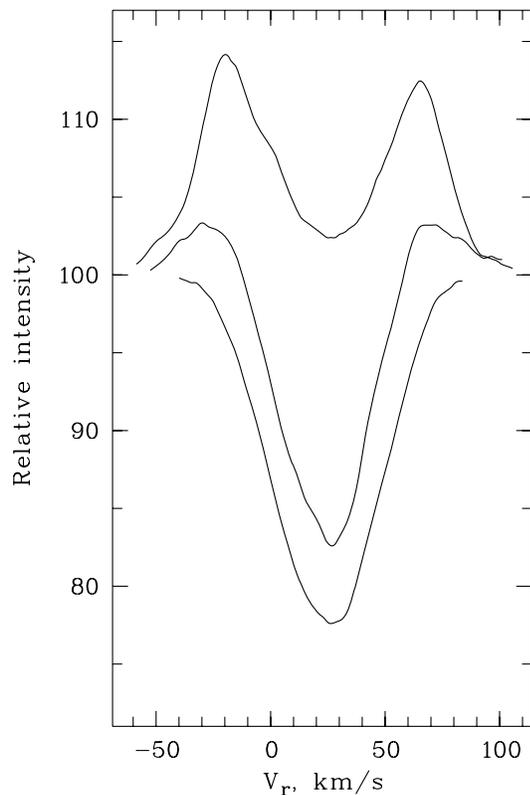


Рис. 4. Эволюция профиля линии FeII с длиной волны в спектре 3 Pup 25.12.04. Снизу вверх: FeII(28) 4297, FeII(48) 5363, FeII(40) 6433 Å.

одну и ту же лучевую скорость. Разрешенные эмиссии отличаются от них большими градиентами интенсивности в центральных частях профилей, они заметно шире (для [OI] 6300 Å и FeII 6433 Å полные ширины на уровне континуума составляют 120 и 140 км/с соответственно) и бывают систематически смещены относительно запрещенных эмиссий (25.12.04 на 4 км/с). Любопытны “двухступенчатые” профили сильного разрешенного триплетта CaII(2) (на Рис.5 он представлен эмиссией на длине волны 8542 Å): узкая раздвоенная вершина заметно сдвинута в красную сторону относительно более широкого “пьедестала”. Лучевая скорость для вершины близка к скоростям для запрещенных эмиссий, а для нижней составляющей профиля — к скоростям, найденным по разрешенным эмиссиям.

Профили линий изменяются со временем. Наиболее очевидны изменения от спектра к спектру величины и знака асимметрии абсорбций и отношения интенсивностей синей и красной эмиссий. Рисунок 6 показывает их на примере линий FeII и линии D1 NaI(1). Последняя меньше, чем D2, блендирована абсорбциями атмосферной воды, и в ее межзвездной составляющей лучше прорисовано двухкомпонентное ядро. Разделение звездной

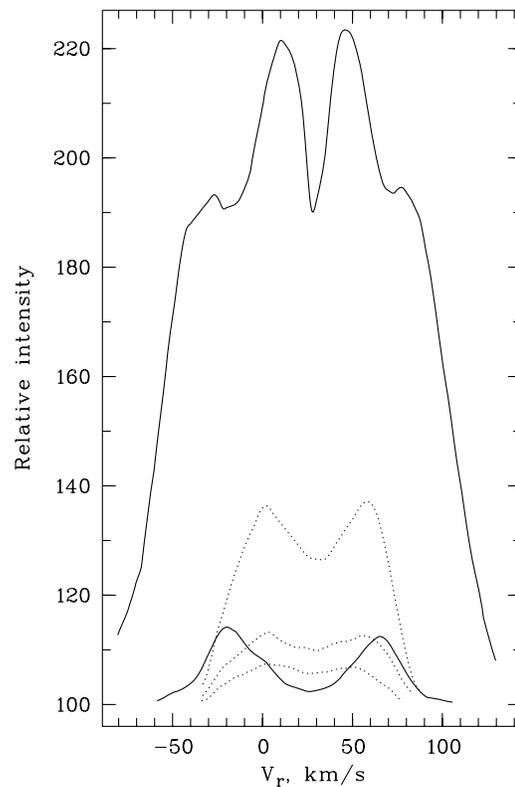


Рис. 5. Неводородные эмиссии в спектре 3 Pup 25.12.04. Профили разрешенных эмиссий показаны сплошными линиями, сверху вниз: CaII(2) 8542 и FeII(40) 6433 Å. Запрещенные эмиссии (прерывистые линии), сверху вниз: [CaII]1F 7324, [OI]1F 6300 и [FeII]14F 7155 Å.

и межзвездной составляющих облегчается переменностью первой. Расхождение профилей исчезают на уровне остаточной интенсивности $r \approx 85$, выше — звездная линия NaI, в форме ее профиля и его перестройке со временем видно сходство с линиями FeII 5363 Å; ниже — межзвездная, у нее, в отличие от линий FeII(42), склоны профиля почти отвесны и стабильны, в интервале $85 > r > 15$ они сливаются.

3.2. Переменность лучевой скорости

Аномалии профилей линий в спектре 3 Pup сказываются на найденных по ним лучевых скоростях. Скорости оказываются зависящими от того, по каким деталям и каких линий они измерены, а также от самого способа измерения. Это затрудняет сопоставление наших данных с опубликованными.

Ликские спектрограммы 1908–24 годов, по которым Джонсон и Нейбауэр [23] отнесли 3 Pup к малоамплитудным спектрально-двойным, получались на синечувствительной эмульсии со

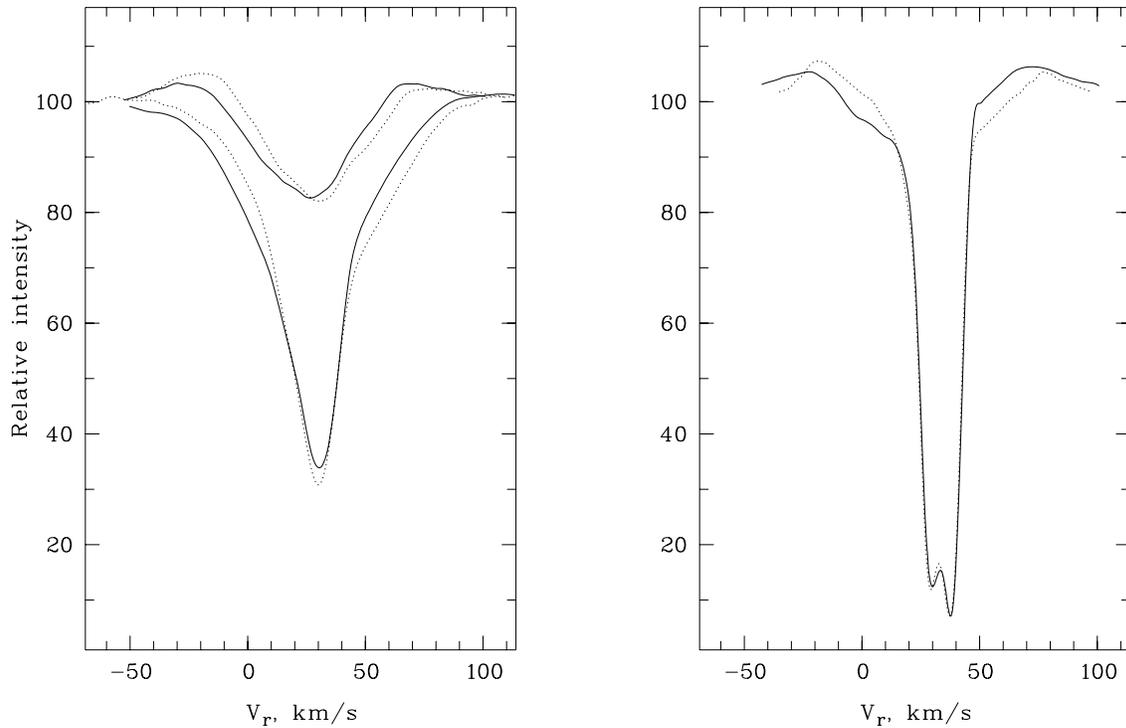


Рис. 6. Переменность профилей линий в спектре 3 Pup. Сплошные линии — 25.12.04, пунктирные линии — 26.12.06. Слева: FeII (48) 5363 Å (вверху) и средние из FeII (42) 4924, 5018 Å. Справа: NaI (1) 5896 Å.

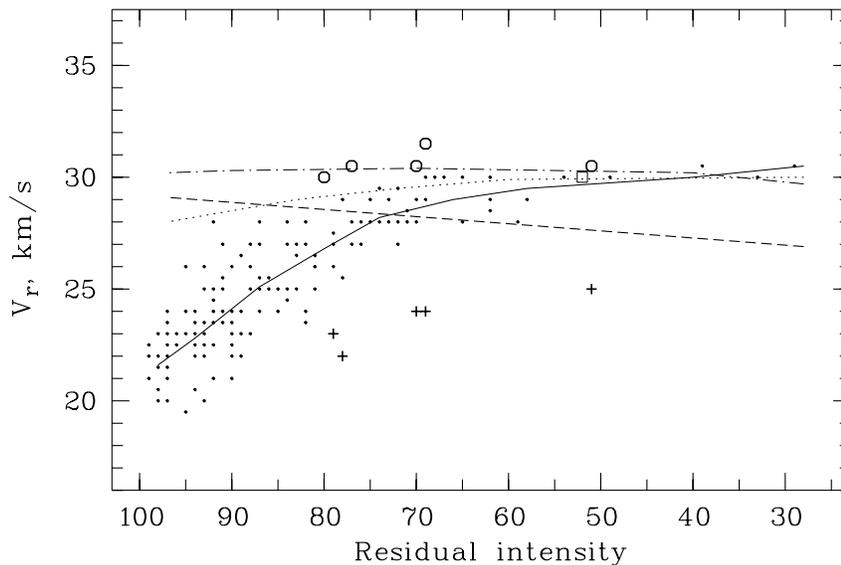


Рис. 7. Зависимости лучевой скорости, измеренной по ядру абсорбции, от ее центральной остаточной интенсивности. Точки — отдельные абсорбции ионов группы железа в спектре за 25.12.04, сплошная линия — усредненная по ним кривая $V_r(r)$. Средние зависимости $V_r(r)$ для той же группы абсорбций: пунктирная линия — для 14.03.03, штриховая — 4.11.2008, штрих-пунктирная линия — 26.12.06 и 07.02.02. Линии Mg II и Si III представлены крестиками в спектре за 25.12.04, открытыми кружками — за 26.12.06, квадратиком — 4.11.2008.

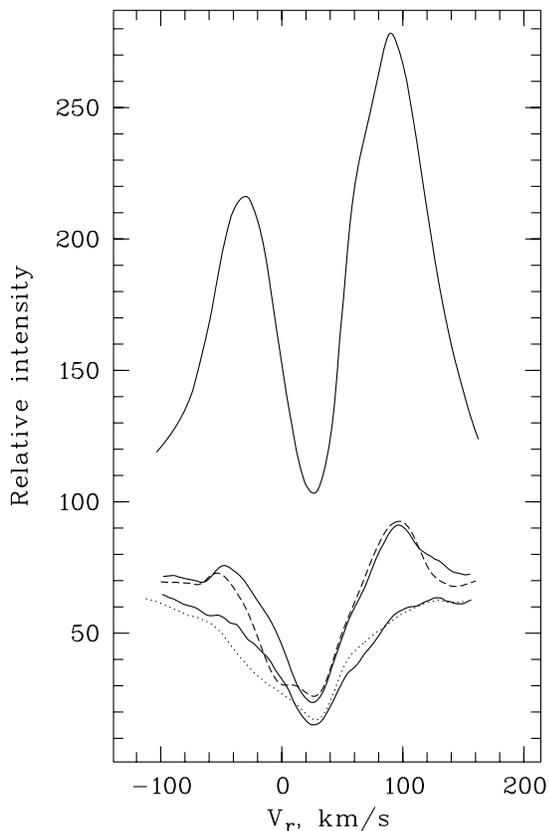


Рис. 8. Центральные части бальмеровских линий в спектре 3 Pup 26.12.06. Сверху вниз: $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$. Для сравнения показаны: штриховой линией — $H\beta$ 4.11.08 и пунктиром — $H\gamma$ 25.12.04.

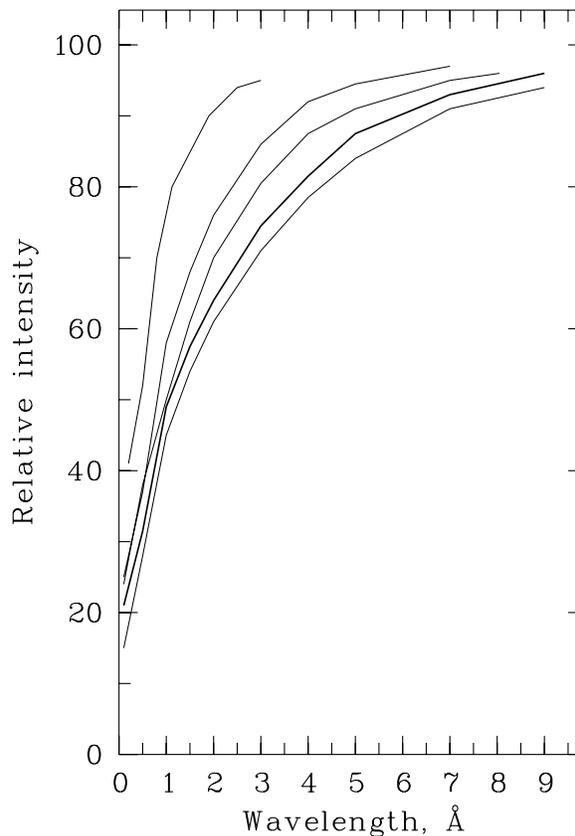


Рис. 9. Полупрофили $H\gamma$ в спектрах 3 Pup (жирная линия) и звезд сравнения (тонкие линии, сверху вниз: 6 Cas (A3 Ia-0), α Cyg (A2 Ia), HD 13476 (A3 Iab), HD 210221 (A3 Ib)).

средней дисперсией около $20 \text{ \AA}/\text{мм}$ и обмерялись визуально. Полученные скорости относятся, по-видимому, к участкам профилей достаточно сильных линий с максимальными градиентами поперечения. Предложенные параметры орбиты ($P = 137.767^{\text{д}}$, $K = 3.6 \text{ км/с}$, $\gamma = 25.4 \text{ км/с}$) уже 60 лет без изменений воспроизводятся в каталогах спектрально-двойных, включая последний [24]. Свингс [13], использовавший панхроматические пластинки, не обнаружил изменений скорости со временем и от одной группы линий к другой, его среднее значение $V_r \approx 31 \text{ км/с}$. По данным работы [14] $V_r \approx 27 \text{ км/с}$.

Опубликовано также несколько значений лучевой скорости 3 Pup, измеренной по спектрам высокого разрешения (до 100 000), к сожалению, без указания способа измерения. Лоден [25] использовал ПЗС-эшелле-спектры, полученные в течение пяти последовательных ночей в феврале 1991 г. По 80 линиям в интервале $3850\text{--}4870 \text{ \AA}$ он получил среднее значение $V_r = 28.7 \pm 0.2 \text{ км/с}$ (в более поздней работе [26] внесено незначительное

изменение: $29.3 \pm 1.0 \text{ км/с}$). Плетиц и др. [3] также располагали пятью ПЗС-спектрами, полученными с 1986 по 1991 г.г. в малых участках между 3920 и 6180 \AA по $30\text{--}50 \text{ \AA}$, с 5–10 линиями в каждом. Для 4 из 5 дат скорости колеблются от 27.7 км/с до 30.9 км/с , т.е. близки к результату Лодена [25]. Однако в выводах указанные авторы расходятся. Лоден [25] не находит ни изменения скорости со временем, ни дифференциальных сдвигов линий, выходящих за пределы ошибок измерения. Плетиц и др. [3], объединив новые значения V_r с частью данных [23], подтверждают спектральную двойственность 3 Pup.

Наши измерения лучевых скоростей выполнены путем взаимного сдвига по длине волны до совмещения прямого и зеркального изображений профиля линии. Это позволяет получать скорости для отдельных деталей профиля. Список линий, по которым измерены скорости, приведен в Табл.3, полностью доступной по Web-адресам www.sao.ru/hq/ssl/3Pup-lines.ps и www.sao.ru/hq/ssl/3Pup/Table3.html. Она содержит результаты отождествления деталей,

использованные лабораторные длины волн, остаточные интенсивности r (центральные для абсорбций и пиковые для эмиссий) и гелиоцентрические лучевые скорости для ядер абсорбций или для эмиссий в целом. Величины r округлены до 0.01, V_r — до 1 км/с. В таблицу включены только данные, полученные по спектрам высокого разрешения, обеспеченные контролем и коррекцией скоростей по теллурическим линиям. Остаточное рассогласование нульпунктов шкал лучевых скоростей для разных дат наблюдений, оцененное по межзвездным линиям NaI(1), не превышает 0.6 км/с.

Значения V_r для NaI и других межзвездных линий и полос приведены в верхних строках Табл. 2. Самая верхняя строка таблицы дает скорости для межзвездных составляющих линий NaI(1) в целом (среднее по всем нашим измерениям: 33.3 ± 0.2 км/с). Ниже, в тех случаях, когда различимы два компонента, скорости приведены для обоих, одно под другим. У линий KI(1) и CaI(1) сильнее коротковолновый компонент с $V_r \approx 28$ км/с, у NaI(1) — длинноволновый с $V_r \approx 37$ км/с. Необходимо отметить, что из-за различий в рабочих диапазонах длин волн скорости для межзвездных диффузных полос (DIB) получены по разным их наборам.

Существует ли корреляция между глубиной абсорбции и измеряемой по ней скоростью? Кривые зависимостей $V_r(r)$, построенные по данным Табл. 3, представлены на Рис. 7. Наибольший систематический ход скорости с глубиной линии наблюдался 25.12.04. Для этой даты показаны положения на графике отдельных линий: слева внизу самые слабые абсорбции FeII, TiII, CrII, крайние справа сверху — триплет FeII(42), линии MgII, SiII — ниже линий группы железа. Разброс значков по вертикали дает представление о точности измерения скорости по линиям разной интенсивности. Для дат, когда перепады скорости были значительно меньше, чем 25.12.04, на Рис. 7 приведены лишь обобщенные кривые $V_r(r)$. Близкие друг к другу зависимости для 2006 и 2007 гг. даны одной, почти горизонтальной, линией. Кривые $V_r(r)$ использованы при обобщении и усреднении данных о лучевых скоростях. Результаты представлены в Табл. 2.

Насколько можно судить по нашим измерениям, наиболее стабильна внешняя оболочка 3 Pup. Изменения скоростей со временем минимальны, а сами скорости близки друг к другу для запрещенных эмиссий и резких оболочечных ядер абсорбций FeII(42) и других сильных линий ионов группы железа. Средняя скорость для указанных линий (строки 9, 10 и 12–14 Табл. 2, соответственно) может быть принята в качестве лучевой скорости

системы в целом: $V_{\text{sys}} = 28.5 \pm 0.5$ км/с, что отличается от обеих вероятных величин $\gamma = 25.6$ и 23.5 км/с в модели, предложенной в [3].

С другой стороны, по слабейшим фотосферным абсорбциям ($r \rightarrow 1$, 16-я строка Табл. 2) уверенно фиксируется изменение скорости от даты к дате, до 7 км/с между 25.12.04 и 26.12.06. Как видно из сравнения 15-й и 16-й строк Табл. 2, более сильные, но также фотосферные, абсорбции MgII и SiII показывают близкие скорости и похожие вариации их со временем. Последнее заметно даже для разрешенных эмиссий (11-я строка Табл. 2), в большинстве случаев они немного смещены в синюю сторону относительно слабейших абсорбций. Как и отмеченное выше сужение запрещенных эмиссий по сравнению с разрешенными, эти факты не противоречат интерпретации 3 Pup как звезды с экваториальным диском и маломассивным спутником [3]. Наши значения V_r для фотосферных абсорбций не выходят за пределы, налагаемые кривой лучевых скоростей по данным [23], но для ее проверки и коррекции наших разрозненных наблюдений недостаточно.

Для абсорбционных ядер первых членов серии Бальмера, исключая $H\alpha$, скорости, по-видимому, близки к таковым для ядер сильных абсорбций FeII, т.е. к V_{sys} . В спектрах 25.12.04 и 26.12.06 заметен небольшой бальмеровский прогресс. Более уверенно о радиальном градиенте скорости в оболочке 3 Pup говорят профили $H\beta$ 4.11.08 и $H\gamma$ 25.12.04. В них, кроме основных ядер, по которым получены приведенные в Табл. 2 значения V_r , присутствуют синемещенные компоненты с $V_r \approx 0$ км/с (Рис. 8). Еще больше, на $-(50..60)$ км/с, относительно фотосферных смещены резонансные линии заатмосферного ультрафиолета [10].

3.3. Спектральный класс и расстояние

Спектр 3 Pup в своей синей части, где еще слабы эмиссионные составляющие линий, похож на спектры звезд A2–3 Ib, в частности, на спектры HD 207673 и BD +60 2542, обе A2 Ib, HD 210221 A3 Ib, HD 13476 A3 Iab, приведенные в работах [27, 28] с разрешением, близким к нашему. Поскольку эмиссионным искажениям, нарастающим с длиной волны и интенсивностью линии, подвержены профили линий металлов, количественная спектральная классификация выполнена по неглубоким абсорбциям FeI, FeII, TiII, а также по линиям MgI, MgII в области 4280–4700 Å. Калибровочные зависимости эквивалентной ширины от спектрального класса $W(\text{Sp})$ построены по эквивалентным ширинам для сверхгигантов A0–F0 из работы [29]. Кроме того,

сравнивались отношения центральных глубин в синей части спектров 3 Pup и η Leo A0 Ib, HD 21389 A0 Ia, α Cyg A2 Ia, HD 17378 A5 Ia, полученных со спектрографом НЭС. Класс светимости и величина M_V оценены по эквивалентным ширинам и профилям H δ и H γ (последние для 3 Pup и звезд сравнения показаны на Рис. 9). Светимость оценивалась также и по эквивалентной ширине триплета OI 7774 Å ($W = 1.42$ Å, что соответствует классу светимости Ib). Итоговые оценки спектрального класса и абсолютной величины 3 Pup: A2.7 \pm 0.3 Ib, $M_V = -5.5^m \pm 0.3^m$.

Тригонометрический параллакс 3 Pup, соответствующий $d > 1.4$ кпк, слишком мал (около 0.6 mas) и потому неточен. Ненадежны и оценки расстояния по зависимостям $\Delta v(d)$, построенным в работах [3, 30]. Они показывают, что межзвездное поглощение в направлении 3 Pup нарастает с расстоянием медленно, и $\Delta v(3 \text{ Pup}) \approx 0.5^m$ достигается на $d \approx 1.4$ кпк, тогда как лучевые скорости 3 Pup, и звездная и межзвездная, наблюдаются уже на расстоянии 0.3–0.5 кпк. Применительно к 3 Pup наиболее точен на сегодня метод спектрального параллакса, при указанных выше $E(B-V)$ и M_V он дает $d \approx 0.7$ кпк.

4. ВЫВОДЫ

Для линий Fe II в спектре 3 Pup очевиден вклад оболочки, которая придает профилям специфическую форму: крылья приподняты эмиссиями, а ядро заострено депрессией. Последняя заметна уже у абсорбций с $R \approx 20$ для $\lambda > 4300$ Å и с усилением линии нарастает. Заостренные ядра характерны и для членов серии Бальмера, исключая H α .

Профили триплета Ca II (2) имеют “двухступенчатый” вид: узкая раздвоенная вершина заметно сдвинута в красную сторону относительно более широкого “пьедестала”. Лучевая скорость для вершины близка к скоростям для запрещенных эмиссий, а для нижней составляющей профиля — к скоростям, найденным по разрешенным эмиссиям.

Профили линий изменяются со временем: от спектра к спектру меняются величина и знак асимметрии абсорбций и отношения интенсивностей синей и красной эмиссий. Все запрещенные эмиссии в зарегистрированной области спектра имеют одинаковые по форме и ширине профили и в пределах ошибок показывают одну и ту же лучевую скорость.

Изменения лучевых скоростей для запрещенных эмиссий и резких оболочечных ядер абсорбций Fe II (42) и других сильных линий ионов группы железа со временем минимальны, а сами скорости близки друг к другу. Средняя скорость для указанных линий может быть принята в качестве лучевой скорости системы в целом: $V_{\text{sys}} = 28.5 \pm 0.5$ км/с.

По слабейшим фотосферным абсорбциям (с остаточной интенсивностью $r \rightarrow 100$) и по фотосферным абсорбциям Mg II, Si II уверенно фиксируется изменение скорости от даты к дате, до 7 км/с.

Количественная спектральная классификация по неглубоким абсорбциям Fe I, Fe II, Ti II, а также по линиям Mg I, Mg II в области 4280–4700 Å, дает спектральный класс A2.7 \pm 0.3 Ib. Абсолютная величина $M_V = -5.5^m \pm 0.3^m$ оценена по эквивалентным ширинам и профилям H δ и H γ и по эквивалентной ширине триплета OI 7774 Å.

Таблица 3. Остаточные интенсивности r и гелиоцентрические лучевые скорости V_{\odot} для отдельных линий в спектрах высокого разрешения 3 Pup, полученных в разные даты. Полная Таблица доступна по Web-адресам www.sao.ru/hq/ssl/3Pup-1lines.ps и www.sao.ru/hq/ssl/3Pup/Table3.html.

Элемент	λ , Å	14.03.03		25.12.04		26.12.06		07.02.07		04.11.08	
		r	V_{\odot} , км/с								
[FeII]19F	5158.78			1.05	27	1.02	26	1.05	29	1.06	26
MgI(2)	5167.33	0.90	29			0.94	33			0.94	30
FeII(42)	5169.03	0.29	30	0.27	31	0.23	30	0.25	29	0.27	27
MgI(2)	5172.69			0.87	26	0.88	33	0.88	33	0.86	32
FeII	5177.39			0.97	25			0.98	29	0.98	27
FeII	5180.32									0.98	30
MgI(2)	5183.61	0.84	27	0.85	25	0.86	29	0.86	30	0.86	30
TiII(86)	5185.91	0.90	25	0.93	23	0.92	28	0.93	27	0.92	29

Таблица 3. (Продолжение)

Элемент	λ , Å	14.03.03		25.12.04		26.12.06		07.02.07		04.11.08	
		r	V_{\odot} , км/с								
TiII(70)	5188.69	0.89	28	0.88	26	0.89	30	0.89	30	0.89	29
FeII(49)	5197.58	0.69	30	0.78	29	0.73	30	0.74	30	0.74	26
CrI(7)	5208.43							0.97	30	0.98	32
FeII(49)	5234.62	0.73	30	0.74	30	0.69	30	0.72	30	0.72	27
CrII(43)	5237.32	0.86	30			0.84	30	0.85	31	0.85	29
ScII(26)	5239.82			0.97	24	0.98	28	0.97	29	0.97	30
CrII(38)	5243.50									0.98	26
CrII(23)	5249.43					0.98	29			0.98	30
FeII(49)	5254.93	0.93	28	0.92	27	0.91	30	0.92	30	0.92	29
FeII	5260.26	0.94	27	0.93	23			0.92	32	0.93	28
FeII(48)	5264.80	0.88	26					0.87	27	0.87	25
FeII(49)	5276.00	0.70	30	0.72	30			0.71	30	0.72	26
CrII(43)	5279.95							0.94	30	0.94	28
FeII(41)	5284.10	0.90	29	0.90	27	0.90	31	0.89	30	0.90	29
FeII	5291.67	0.97	29	0.97	24	0.97	29	0.96	30	0.97	27
CrII(24)	5305.86							0.94	29		
CrII(43)	5308.42	0.95	30	0.95	24	0.94	31	0.95	31	0.95	30
CrII(43)	5310.69			0.97	22			0.96	30	0.98	28
CrII(43)	5313.58	0.93	29	0.92	24	0.90	30	0.90	30	0.92	28
FeII(49)	5316.66	0.62	29	0.63	28	0.60	28	0.59	28	0.60	24
FeII(49)	5325.56	0.90	29	0.91	24	0.91	30	0.91	31	0.90	27
[FeII]19F	5333.65	1.03	26	1.02	26	1.03	22	1.04	27	1.01	24
CrII(43)	5334.87	0.94	31	0.93	24	0.93	31	0.93	29	0.92	27
FeII	5339.59			0.96	26	0.96	32	0.97	32	0.96	31
FeII(48)	5362.87	0.84	30	0.83	27	0.82	30	0.82	30	0.82	26
FeI(15)	5371.49					1.03	30	1.02	31	1.04	31
TiII(69)	5381.03	1.04	27	1.03	24	1.03	27	0.97	25	1.03	26
FeI(1146)	5383.38	0.99	31					0.98	25	0.98	29
FeII	5387.07	0.97	32	0.97	24			0.98	31	0.97	28
FeII	5395.86	0.98	28					0.98	29	0.98	29
CrII(23)	5407.62							0.98	31	0.97	30
FeII(48)	5414.07					0.93	30	0.95	32		
TiII(69)	5418.78	0.99	27					0.97	30		

Таблица 3. (Продолжение)

Элемент	$\lambda, \text{\AA}$	14.03.03		25.12.04		26.12.06		07.02.07		04.11.08	
		r	$V_{\odot}, \text{км/с}$								
CrII(23)	5420.93							0.97	31	0.97	29
FeII(49)	5425.25	0.93	28	0.93	25	0.92	28	0.92	29	0.93	26
FeII	5427.82							0.97	30	0.98	29
FeII(55)	5432.98	0.95	27			0.95	28	0.95	26	0.95	25
FeII	5439.71									0.99	27
FeI(15)	5446.91					1.02	33	1.03	31	1.03	30
FeI(15)	5455.61	1.03	29	1.02	26	1.03	27	1.02	27	1.03	29
CrII(50)	5478.37	0.94	30	0.95	23	0.95	31	0.95	30	0.95	28
FeII	5482.31	0.97	24					0.96	29		
FeII	5487.63	0.97	27					0.97	30	0.98	28
CrII(50)	5508.62	0.96	27					0.96	27	0.97	25
CrII(23)	5510.71									0.97	29
ScII(31)	5526.81	1.05	28			1.04	27	1.03	30	1.05	29
FeII(55)	5534.84	0.88	29	0.87	28	0.87	30	0.86	31	0.87	27
FeII(166)	5544.76									0.97	29
FeI(686)	5615.64							0.98	31		
CrII(189)	5620.63									0.99	30
FeII(57)	5627.49			0.99	22	0.99	28	0.98	29	0.99	30
FeII(57)	5657.92			0.97	26	0.98	32	0.97	30	0.97	33
ScII(29)	5684.19									1.02	27
FeII(164)	5747.90			0.99	22					0.99	26
DIB	5780.37	0.95	27	0.93	26	0.93	26	0.94	31	0.94	27
DIB	5793.22			0.99	23						
FeII(211)	5795.87			0.99	22						
DIB	5796.96	0.97	38	0.96	35	0.97	33	0.97	34	0.97	36
FeII(163)	5813.67	0.97	30	0.98	20			0.98	25	0.98	25
FeII(164)	5823.15			0.99	23	0.99	26			0.99	26
FeII(182)	5835.49					0.99	33			0.99	28
DIB	5849.80	0.98	35	0.99	31			0.99	31	0.98	30
HeI (11)	5875.72	0.96	30	0.96	24	0.96	26	0.95	30	0.96	31
NaI (1)	5889.95	0.06	33	0.03	33	0.04	33	0.07	33	0.08	33
NaI (1)	5895.92	0.10	33	0.07	34	0.08	33	0.13	34	0.14	33
SiII(4)	5978.93	0.94	28			0.93	31	0.93	32		

Таблица 3. (Продолжение)

Элемент	λ , Å	14.03.03		25.12.04		26.12.06		07.02.07		04.11.08	
		r	V_{\odot} , км/с								
FeII(46)	5991.37	1.07	26	1.06	26	1.07	28	1.07	29		
CrII(105)	6053.46			0.99	22						
FeII	6060.99			0.99	19						
FeII(46)	6084.10	1.03	26	1.03	25	1.04	26				
NiI(45)	6108.12	1.01	28								
FeII(46)	6113.32	0.98	27	0.98	22	0.98	30				
CaI(3)	6122.22			0.99	25						
BaII(2)	6141.73			0.99	21	0.99	29				
FeII(74)	6147.74	0.93	27	0.92	24	0.92	28				
FeII(74)	6149.25	0.93	30	0.93	28	0.93	31				
CaI(3)	6162.18			1.02	24						
FeII(200)	6175.16	0.98	29	0.97	23						
FeII(163)	6179.39	0.99	28	0.98	22						
DIB	6195.96	0.98	31	0.98	32	0.97	27				
FeI(62)	6219.29	1.01	27								
FeII(74)	6238.39	0.94	27	0.94	23	0.93	27				
FeII(74)	6247.55	0.88	29	0.87	27	0.85	31				
DIB	6283.85			0.92	34						
[OI]1F	6300.30	1.14	26	1.12	28	1.12	29				

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В. Е. Панчуку и М. В. Юшкину за большую помощь в наблюдениях на 6-метровом телескопе. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 08–02–00072 а), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Происхождение, строение и эволюция объектов во Вселенной”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Hoffleit and C. Jaschek, *The Bright Star Catalogue* (Yale University Observatory, New Haven USA, 1982).
2. I. Jr. Iben and A. V. Tutukov, *Astrophys. J.* **418**, 343 (1993).
3. H. Plets, C. Waelkens, and N. R. Trams, *Astronom. and Astrophys.* **293**, 363 (1995).
4. M. P. Fitzgerald, *Astronom. and Astrophys.* **4**, 234 (1970).
5. van F. Leeuwen, *Astronom. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
6. A. J. Cannon, *Ann. Astr. Obs. Harvard Col.* **28**, 131 (1901).
7. A. C. Maury, *Ann. Astr. Obs. Harvard Col.* **28**, 1 (1987).
8. P. W. Merrill, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **46**, 156 (1934).
9. C. S. Beals, *Publ. Dom. Astrophys. Obs. Victoria* **9**, 1 (1951).
10. A. C. Rovero and A. E. Ringuelet, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **266**, 203 (1994).
11. W. A. Hiltner, *Astrophys. J.* **105**, 212 (1947).
12. A. C. Danks and M. Dennerfeld, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **106**, 382 (1994).
13. P. Swings, *Annales d'Astrophys.* **13**, 114 (1950).
14. D. Crespín and J. W. Swensson, *Bull. Acad. Roy. Belgique, d. sc.* **38**, 376 (1952).
15. W. W. Morgan, H. A. Abt, and J. W. Tapscott, *Revised MK spectral atlas for stars earlier than the Sun* (Yerkes Obs., Univ. of Chicago and Kitt Peak Obs., 1978).

16. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin and I. Najdenov, in *The UV Universe: stars from birth to death*, Proceedings of the Joint Discussion No. 4 during the IAU General Assembly of 2006, Ed. by A. I. Gomez de Castro and M. A. Barstow. (Editorial Complutense, Madrid, 2007), p. 179.
17. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин, И. Д. Найденов, Оптический журн. **76**, 42 (2009).
18. V. E. Panchuk, J. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1998).
19. М. В. Юшкин, В. Г. Клочкова, Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв. № 206 (Н. Архыз, САО РАН, 2005).
20. N. Manset and J.-F. Donati, *Proc. of the SPIE* **4843**, 425 (2003).
21. R. G. Tull, P. J. MacQueen, C. Sneden, and D. L. Lambert, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **107**, 251 (1995).
22. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and D. S. Nasonov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **63**, 386, (2008).
23. H. L. Johnson and F. J. Neubauer, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **58**, 248 (1946).
24. D. Pourbaix, A. A. Tokovinin, A. H. Batten, et al., *Astronom. and Astrophys.* **424**, 727 (2004).
25. L. O. Loden, *The Messenger* No. 68, 26 (1992).
26. L. O. Loden and A. Sundman, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 9 (1995).
27. E. Verdugo, A. Talavera, and A. I. Gomez de Castro, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **137**, 351 (1999).
28. E. Verdugo, A. Talavera, and A. I. Gomez de Castro, *Astronom. and Astrophys.* **346**, 819 (1999).
29. K. Venn, *Astrophys. J. Suppl.* **99**, 659 (1995).
30. Th. Neckel and G. Klare, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **42**, 251 (1980).

SPECTRAL VARIABILITY OF THE PECULIAR A-TYPE SUPERGIANT 3 PUP

E.L. Chentsov, V.G. Klochkova, A.S. Miroshnichenko

Optical spectra taken in 1997–2008 are used to analyze the spectral peculiarities and velocity field in the atmosphere of the peculiar supergiant 3 Pup. The profiles of strong Fe II lines and of the lines of other iron-group ions have a specific shape: the wings are raised by emissions, whereas the core is sharpened by a depression. The latter feature becomes more pronounced with the increasing line strength, and the increasing wavelength. Line profiles are variable: the magnitude and sign of the absorption asymmetry, and the blue-to-red emission intensity ratios vary from one spectrum to another. The temporal V_r variations are minimal for the forbidden emissions and sharp shell cores of the absorption features of FeII(42), and other strong lines of iron-group ions. The average velocity for the above lines can be adopted as the systemic velocity: $V_{\text{sys}} = 28.5 \pm 0.5$ km/s. The weakest photospheric absorptions and photospheric Mg II, Si II absorptions exhibit well-defined day-to-day velocity variations of up to 7 km/s. Quantitative spectral classification yields the spectral type of $A2.7 \pm 0.3$ Ib. The equivalent widths and profiles of H δ and H γ , and the equivalent width of the OI 7774 Å triplet yield an absolute magnitude estimate of $M_V = -5.5^m \pm 0.3^m$, implying the heliocentric distance of 0.7 kpc.

Key words: *stars—variable and peculiar*