

УДК: 524.33—355

МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ СТРУКТУРА
СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЗВЕЗДЫ Р ЛЕБЕДЯ

Н. МАРКОВА, И. КОЛКА

Поступила 29 октября 1984

Принята к печати 2 июля 1985

На основе анализа серии высокодисперсионных (9 А/мм) спектров звезды Р Лебедя сделан вывод, что на фоне относительно медленно меняющегося среднего профиля абсорбционных линий (характерное время $100^d \dots 120^d$) существует быстро меняющаяся (характерное время—несколько суток) структура из нескольких компонентов, отражающая, по-видимому, неоднородности истечения вещества из Р Лебедя. При этом особенности среднего профиля (например, максимум абсорбции) имеют тенденцию перемещаться в сторону фиолетового крыла линий с периодическим возвратом в начальное положение, а для понимания особенностей поведения неоднородностей требуются дополнительные исследования.

1. *Введение.* Настоящее исследование является продолжением нашей работы [1], в которой были изложены результаты измерений водородных спектральных линий звезды Р Лебедя и было указано на две возможности описания переменности лучевой скорости абсорбционных компонентов этих линий. Поведение деталей компонентов поглощения можно было истолковать либо их однонаправленным сдвигом друг за другом в сторону коротковолнового крыла линии, либо периодическим колебанием их лучевой скорости. В статье [1] было высказано предположение, что привлечение линий других ионов к аналогичному анализу может привести к разрешению указанной дилеммы описания переменности. Следуя этому подходу, мы представляем в данной статье результаты измерений спектральных линий ионов Si IV, Si III, O II, N II и He I на тех же спектрах, которые были использованы в работе [1]. На основе анализа этих данных выяснена необходимость различать более медленные изменения крупномасштабной формы профиля линий и относительно быстрые изменения остальных деталей профиля. Таким образом, дилемма в ее первоначальном виде оказалась необоснованной, но описание, предполагающее однонаправленный сдвиг компонентов, сохранялось для медленной переменности линий. В то

же время определение характера быстрой переменности деталей профиля на основе использованных нами спектров оказалось неоднозначным.

Некоторые вопросы, связанные с отбором и измерением линий, рассмотрены во втором разделе настоящей работы, а третий посвящен изложению результатов отдельно по каждому иону. В четвертом разделе следует построение усредненной по всем ионам картины переменного во времени расположения компонентов тонкой структуры абсорбционных линий по шкале лучевой скорости. На основе этой картины указывается на возможные выводы, а также на вопросы, решение которых потребует дальнейшего анализа. В заключении приведено сравнение результатов данной статьи с выводами первого этапа нашего исследования [1] и подчеркнута значимость определения достаточно точной зависимости лучевой скорости отдельных компонентов от времени при моделировании истечения вещества из Р Лебеда.

2. *Измерение лучевых скоростей компонентов в линиях поглощения ионов Si IV, Si III, O II, N II и He I.* Как отмечалось выше, мы пользовались тем же наблюдательным материалом, что и в исследовании [1]. Чтобы не повторяться, в данной работе отметим только, что серия из 29 спектрограмм получена в период с марта по ноябрь 1981 г. в фокусе Куде 2-метрового телескопа Болгарской академии наук с дисперсией 9 А/мм. Далее остановимся на моментах, важных при отборе подходящих для измерения линий.

В предыдущем исследовании мы указали, что эмиссионный компонент водородных линий может влиять на абсорбционную часть линий, искажая истинные сдвиги измеримых особенностей профиля. У линий других ионов в спектре Р Лебеда можно найти профили вообще без эмиссионного компонента. Чисто абсорбционные линии дают возможность проследить поведение компонентов с малыми лучевыми скоростями по сравнению с данными для бальмеровских линий, у которых не замечено абсолютных значений скоростей ниже 100 км/с.

Разумеется, измерение деталей профиля требует тщательной оценки влияния возможных блендирующих линий. В нашем случае отсутствие существенных бленд у кандидатур в окончательную выборку линий проверялось с помощью списка отождествленных линий в спектре Р Лебеда из исследования де Гроота [2].

Определение лучевых скоростей компонентов тонкой структуры основывается на нахождении длин волн локальных минимумов на профиле полного абсорбционного компонента. Эти минимумы имеют часто малый контраст на общем фоне профиля, что снижает точность их измерения. Поэтому целесообразно подобрать линии, допускающие усреднение результатов измерений. В данном случае для каждого иона использованы линии,

которым соответствуют переходы с близкими по энергии возбуждения нижними уровнями (например, один мультиплет линий). Поскольку эти уровни различны, их заселенности также различаются, а кроме того соответствующие силы осцилляторов могут быть далеко не сопоставимы. Следовательно, нельзя считать и эффективные области формирования таких линий полностью совпадающими. Вследствие сказанного нельзя быть заведомо полностью уверенным в том, что усреднение результатов оправдано. Побочными критериями для этого служили близость значений наблюдаемой интенсивности выбранных линий и одинаковые в пределах ошибок скорости их компонентов. Подход к исследованию спектра He I несколько отличен и подробности его приведены в следующем разделе статьи.

Существование тонкой структуры у абсорбционных компонентов спектральных линий Р Лебеда на нескольких спектрограммах из использованной нами серии было выявлено уже в работе [4] по совпадающей форме профиля у выбранных линий и совпадению лучевых скоростей соответствующих деталей (компонентов) этих профилей. В данной и в предыдущей [1] работах мы исходили из таких же соображений, считая компоненты реальными, если скорости деталей в разных линиях, допускающих усреднение, образовывали совокупности у средних значений как у своего рода точек накопления. Яснее всего это заметно в четвертом разделе статьи, в котором построена картина поведения общих для нескольких ионов компонентов. Разумеется, фотографический шум искажает измерения мелких деталей профиля. Мы планируем в дальнейшем исследовать этот вопрос отдельно, а в данном случае отметим, что по колебаниям непрерывного спектра можно оценить фотометрическую точность наших спектрограмм, расширенных до 0.48 мм, равной 2...3% от уровня непрерывного спектра.

Определение сдвига компонентов от несмещенного положения спектральных линий производилось по регистрограммам спектров, дающим увеличение в ~ 75 раз. На регистрограмме одновременно записаны звездный спектр и спектр сравнения. Такая запись получена переключением сканирующего фотометра на спектр сравнения на время прохождения через щель фотометра не важных в нашем случае участков звездного спектра. Точность самого метода, оцененная по повторным регистрациям одних и тех же деталей, оказалась равной $\pm 3...4$ км/с. Однако измеренные в разных линиях значения скорости, которые мы считали принадлежащими одним и тем же компонентам, покрывают, как правило, полосу шириной не более 16 км/с. Исходя из этого, можно оценить, что реальная ошибка определения скорости компонента равна ± 8 км/с. В четвертом разделе работы мы покажем, что компоненты с одинаковыми скоростями встречаются у разных ионов. Если усреднять, таким образом, уже по большему числу индивидуальных измерений, оценка среднеквадратичного отклонения получается также не выше ± 8 км/с.

Таблица 1

Ион	Si IV		O II		Si III
	Мультиплет	$4s^2S-4p^2P^0$	$3s^4P-3p^4P^0$	$3s^4P-3p^4D^0$	$4s^3S-4p^3P^0$
Линия		4088.85 А	4349.43 А	4649.14 А	4552.62 А
"		4116.10 А	4366.90 А	4661.64 А	4567.82 А
"					4574.76 А

Ион	N II		He I			
	Мультиплет	$3s^2P^0-3p^2D$	$3s^2P^0-3p^2P$	2^1S-4^1P	2^1P-n^1D	$2^3P-n^3S(D)$
Линия		3995.00 А	4601.48 А	3964.73 А	4387.93 А	4713.20 А
"			4607.15 А		4143.76 А	4120.86 А
"			4630.54 А		3926.53 А	3867.53 А
"						4471.51 А
"						4026.22 А
"						3819.64 А

Все линии, которые выбраны для измерений, перечислены в табл. 1. Обширную таблицу, включающую результаты измерений, мы планируем опубликовать в будущем. В следующих разделах работы мы опираемся на усредненные результаты, которые будут представлены в виде рисунков. Отметим только, что на некоторых спектрах из-за фотографического шума не удалось использовать всех приведенных в табл. 1 линий для усреднения данных. Кроме того, в некоторых случаях скорость хорошо измеримого компонента встречается у данного иона только один раз. Мы не исключили из рассмотрения такие измерения, чтобы оставалась возможность сравнения с аналогичными данными у остальных ионов. По образцу работы [1], на рис. 1 представлены профили одной линии от каждого иона в их эволюции на спектрах от JD 2444742 до ...745.

3. Многокомпонентная структура линий разных ионов. Согласно нашему предположению для одного избранного иона выбранные линии допускают усреднение данных. На основе данных о средних скоростях компонентов построены рис. 2, 3 и 4 для ионов Si IV, O II, Si III, N II и He I. Данные по нейтральному гелию разделены на две группы (рис. 4а и 4б), поскольку на нескольких спектрах скорости компонентов синглетных (2^1P-) и триплетных (2^3P-) линий не совпадали. (В данном исследовании триплетные линии считались нерасщепленными, имеющими единую эффективную длину волны). В пределах обеих групп интенсивности линий различаются довольно сильно, но влияние этого обстоятельства на усреднение данных оказалось незначительным. У самых сильных линий компо-

ненты с малой скоростью могут отсутствовать, но скорости остальных компонентов такие же, как по линиям меньших интенсивностей. Поскольку линии группировались по мультиплетам, мы решили не включать линию

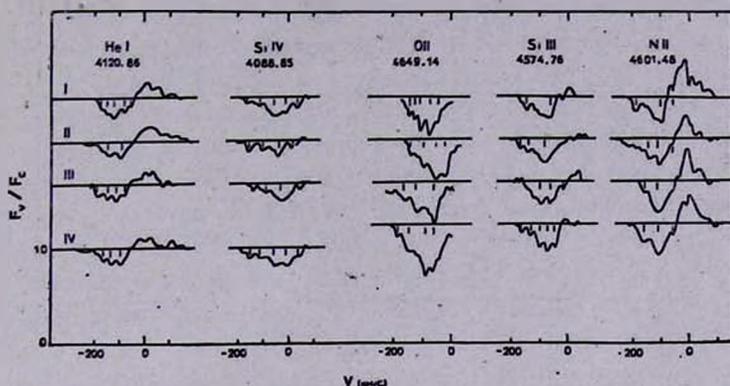


Рис. 1. Профили линий разных ионов на спектрах, полученных через сутки: I — JD 2444742; II — JD 2444743, III — JD 2444744, IV — JD 2444745. Отмечены положения измеренных деталей.

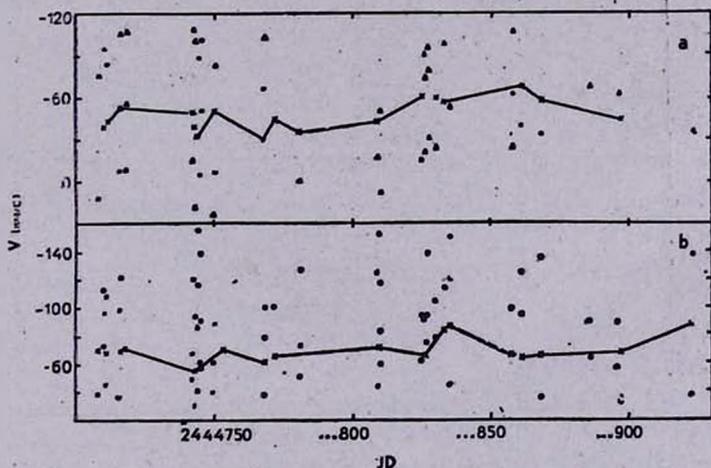


Рис. 2. Зависимость усредненной лучевой скорости компонентов (●) от момента наблюдения: а) по данным иона Si IV; б) по данным иона O II; ▲ — компонент представлен только одной линией; X — усредненная скорость компонента с максимальной глубиной, для наглядности значения, соответствующие разным наблюдениям, соединены линией.

3964.73 Å, имеющую нижний 2^1S -уровень, в процесс усреднения. Следуя этому принципу, линия N II 3995.00 Å (нижний уровень синглетный) не была включена при получении рис. 3b на базе триплетных линий N II из табл. 1.

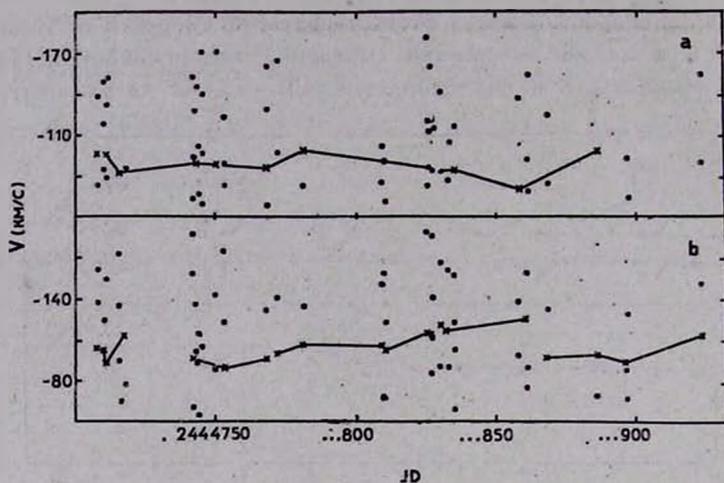


Рис. 3. То же, что на рис. 2, только а) по данным иона Si III; б) по данным иона N II.

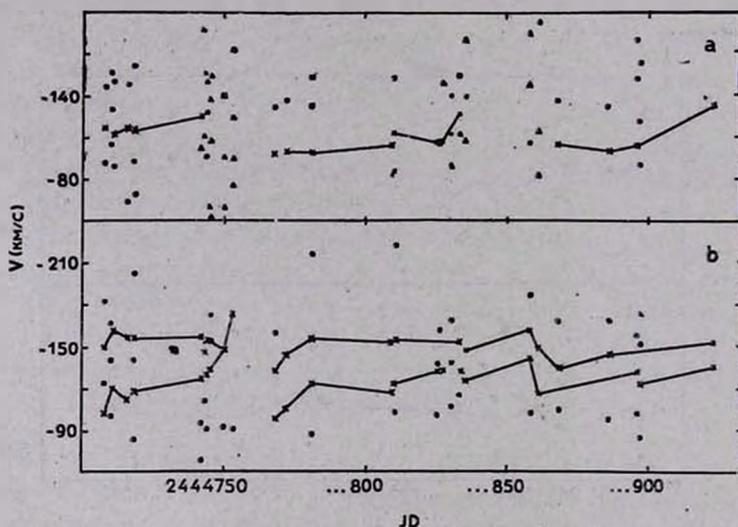


Рис. 4. То же, что на рис. 2, только а) по данным линий He I с нижним 2^1P -уровнем; б) по данным линий He I с нижним 2^3P -уровнем. Дополнительные объяснения приведены в тексте.

На рисунках специальными значками выделены случаи совпадения у всех линий скоростей компонентов с максимальной глубиной (крестики соединены для наглядности), а также случаи наличия некоторого компонента только у одной линии. Такие неусредненные результаты показаны на рисунках, если по какой-то причине данный ион представлен только двумя линиями. Но в том и другом случаях следует сравнивать одиночное

измерение с данными других ионов, чтобы судить о реальности соответствующей детали профиля.

Мы предполагаем, что лучшая скорость компонента с максимальной глубиной характеризует слой эффективного формирования линии в оболочке Р Лебеда. Если эти скорости одинаковы у всех линий одного иона, то можно в некотором смысле считать это значение эффективным уровнем данного иона по шкале скорости. Таким образом, линиями на рисунках отмечено поведение эффективного уровня. При этом дополнительного объяснения требуют рис. 4а и 4б. Отмеченный выше относительно широкий диапазон интенсивностей линий He I является причиной появления разных эффективных уровней в синглетной и триплетной группах. Особенно это касается триплетных линий. Модельными расчетами на основе метода Соболева для движущихся сред убедительно показано существование такого явления в работе Оэгерле, Ван Блеркома [5], изучивших спектр He I у звезды Р Лебеда. Поэтому на рисунках соединены данные не общего эффективного уровня, а превалирующего в данной группе. При таком подходе у триплетных линий можно выделить, как правило, два уровня, один из которых (у интенсивных линий) в большинстве случаев держится около — 150...— 160 км/с, а второй (у более слабых линий) имеет тенденцию перемещаться за определенное время (например, от JD 2444760 до JD ... 860) от — 100 км/с к большим скоростям до слияния с первым уровнем, чтобы потом снова появляться у — 100 км/с. В менее выраженном виде такое колебание свойственно также синглетным линиям на рис. 4а. Среди других ионов аналогично ведут себя N II (рис. 3б) и Si IV (рис. 2а), последний на отрезке более низких скоростей. Вообще наименьшие значения скоростей среди всей совокупности данных встречаются у линий иона Si IV. Имеются даже скорости, направленные от наблюдателя (на рисунке со знаком плюс). В работах [2] и [3] утверждалось, что постоянная гелиоцентрическая скорость эмиссионных пиков линий разных ионов в спектре Р Лебеда находится в пределах — 5...— 35 км/с, со средним значением — 16 км/с. Если принять эту оценку за скорость самой звезды, то можно, например, предположить, что наличие всех значений скорости в положительную сторону от — 16 км/с является следствием влияния слабой эмиссии на длинноволновое крыло абсорбционной линии.

При планировании настоящего исследования мы считали в качестве одной из главных задач определение хода скорости индивидуальных компонентов тонкой структуры в зависимости от времени. Рис. 2, 3 и 4 показывают, что данные с интервалом в одни сутки (JD 2444710...711,...742...745, ...809...810, ...825...827, ...896...897) могут быть в пределах ошибок совпадающими, но могут быть и разнесенными (в смысле ближайшего по скорости компонента) на 10...20 км/с, а иногда и больше, если учитывать необходимость объяснить разницу в числе измеримых деталей

в сравниваемые моменты наблюдений. Это значит, что изменение тонкой структуры, определяемое на основе наблюдений с временным разрешением $\sim 1^d$, выглядит случайным, даже направление сдвига деталей непредсказуемо. Следовательно, только с некоторой вероятностью можно считать относящимися к одному и тому же компоненту совпадающие по скорости измерения на спектрах, полученных через сутки. С еще меньшей уверенностью можно ответить на вопрос, какой компонент куда сдвинулся за сутки. Если интервал между наблюдениями больше суток, то, по нашему мнению, нет серьезного основания считать одним и тем же компонентом какие-то детали соответствующих профилей, даже близкие по скорости. Кажется, что для нахождения истинного поведения тонкой структуры нужны наблюдения с временным разрешением по крайней мере несколько часов.

4. *Усредненная картина переменности абсорбционных компонентов. Обсуждение результатов.* Выше мы определили положение компонентов в линиях разных ионов усреднением по малому числу линий (за исключением шести 2^3P -линий гелия). Из сопоставления этих результатов выяснилось, что в большинстве случаев любая выбранная деталь одного иона повторяется у других ионов, если только ее лучевая скорость находится в интервале совпадения результатов измерений разных ионов. Очевидно, что в наибольшей степени это относится к интервалу от -70 до -160 км/с. На основе этого было решено построить сглаженную картину вариаций

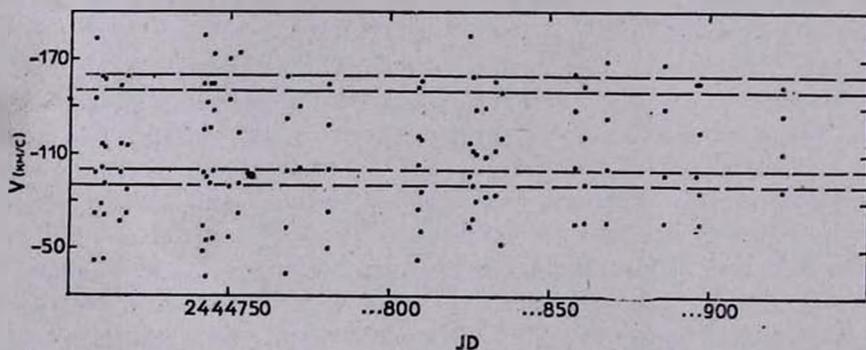


Рис. 5. Зависимость усредненной по всем ионам лучевой скорости компонентов от момента наблюдения. Отмечены интервалы, в которых чаще всего расположены значения скорости.

лучевых скоростей. В лучших случаях удавалось проводить усреднение по 15 измерениям и тогда статистическая оценка среднеквадратичного отклонения оказалась равной 8 км/с. Рис. 5 построен с учетом данных всех ионов. При этом считались маловероятными и не нанесены на график значения скорости, встречающиеся только у одного иона или у малого числа

из возможных линий. Таким образом, может быть, утрачивается информация об особенностях некоторых ионов, но зато получена более уверенная общая картина. С помощью последней выделяются следующие закономерности:

1) Во всем периоде наблюдений лучевые скорости чаще всего встречаются в интервалах около—90...—100 км/с и—150...—160 км/с (эти интервалы отмечены на рис. 5).

2) Среди значений скоростей, оставшихся в силу вышеприведенных причин вне средней картины (рис. 2—5), много таких, которые относятся в случае разных ионов к компоненту максимальной глубины.

3) Определение поведения одного фиксированного компонента на усредненной картине так же неоднозначно, как и в случае отдельных ионов.

На нынешнем этапе анализа мы склонны приписывать эти заключения действию разных факторов. По-видимому, тонкая структура линий обусловлена неоднородностями истечения вещества из звезды Р Лебеда. Хотя ниже делается попытка проследить поведение отдельных компонентов за трехсуточный промежуток времени, удовлетворительное истолкование этого вопроса потребует дополнительных наблюдений, как уже было отмечено выше. Измерения, соответствующие максимальной глубине суммарного абсорбционного компонента отдельных ионов, но не согласующиеся со скоростями общих компонентов, говорят о возможности существования более или менее однородного «фонового» истечения, вызывающего максимум поглощения при определенной лучевой скорости независимо от наличия каких-либо компонентов. Другими словами, можно предположить, что переменная тонкая структура образуется на фоне более стабильного среднего профиля. Обнаруженные (и отмеченные на рис. 2, 3 и 4) случайные колебания лучевой скорости эффективного уровня свидетельствуют в таком случае о способности компонентов модулировать средний профиль. По-видимому, причиной выделения двух интервалов (—90...—100 км/с и —150...—160 км/с) на шкале скорости является также форма среднего профиля, имеющая при этих скоростях особенности абсорбционного типа. Такая структура может быть вызвана, как показано в работах [6] и [7], особым строением однородно истекающей оболочки звезды. Три зоны (шаровые слои) в оболочке, характеризующиеся соответственно ускорением, замедлением и снова ускорением движения газа в их пределах, определяют, согласно упомянутым работам, двухкомпонентную форму профиля поглощения в линии типа Р Лебеда. Отметим также, что указанная структура среднего профиля в нашем случае иногда искажена истинными компонентами по аналогии с примером модуляции эффективного уровня. Пока поведение отдельных компонентов не понято, кажущееся случайное влияние их на профиль вполне допустимо. Появление же более или менее отчетли-

во выраженных трендов в лучевых скоростях эффективного уровня у He I и N II нельзя объяснять случайным влиянием компонентов. Причиной указанного тренда может быть именно переменность среднего профиля. Мы выдвигаем гипотезу, согласно которой происходит постепенное нарастание вклада более высоких скоростей в формирование «фонового» профиля с характерным временем около $100^d \dots 120^d$, а затем довольно быстрое возвращение к исходному состоянию. Такое поведение может быть вызвано переменностью средней плотности вещества в оболочке.

Для рассмотрения одной возможности объяснения хода индивидуальных компонентов по шкале скорости с течением времени был выбран трехсуточный интервал JD 2444742...745, который охвачен 4 спектрами, полученными через $\sim 1^d$. Основываясь на данных рис. 5, мы предлагаем следующее описание поведения компонентов (см. рис. 6). В первый момент наблюдений присутствуют 4 компонента, которые в этот момент достаточно сдвинуты относительно «уровней» среднего профиля, так что последние отличимы от компонентов. Затем следует нарастание скорости всех деталей во всем охватываемом периоде. Это явление сопровождается возникновением нового компонента при скорости ~ 30 км/с и исчезновением компонента наибольшей скорости (по-видимому, из-за ослабления контраста компонента на фоне среднего профиля). Идея связать поведение компонентов именно с ростом скорости основывается на установленной разными авторами [2, 8, 9] зависимости лучевой скорости слоев эффективного формирования линий от потенциала их возбуждения — в области уменьшения степени возбуждения должна существовать зона ускорения истекающего газа. Если для Р Лебеда придерживаться гипотезы о пульсационной неустойчивости массивной звезды как причине выброса вещества, то можно допустить ускоренное движение некоторых уплотнений газа, которые при больших скоростях становятся достаточно разреженными и не влияют на профили линий. Подчеркнем, что это только одна возможность описания и не исключено, например, существование компонентов с уменьшением скорости.

5. *Заключение.* Полученные в данной работе результаты существенно дополняют наше более раннее исследование спектра водорода [1]. Изучая бальмеровские линии, мы не смогли решить дилемму поведения индивидуальных компонентов на длительном отрезке времени: считать ли возможным однонаправленное перемещение компонентов друг за другом к фиолетовому крылу линии или периодическое изменение лучевой скорости четырех компонентов, колеблющихся попарно в противофазе в разных диапазонах скорости. Путем анализа линий других ионов нам удалось установить, что жизнь компонентов тонкой структуры — довольно кратковременное явление, а за время порядка $100^d \dots 120^d$ можно проследить изме-

нения «фонового» профиля. Поэтому, с одной стороны, дилеммы не существует, поскольку она возникла в основном из-за предположения об относительно долгоживущих компонентах, а с другой стороны, дилемма решена в пользу однонаправленного сдвига максимума абсорбции как детали достаточно интенсивного (H, He I, N II) «фонового» профиля. Однона-

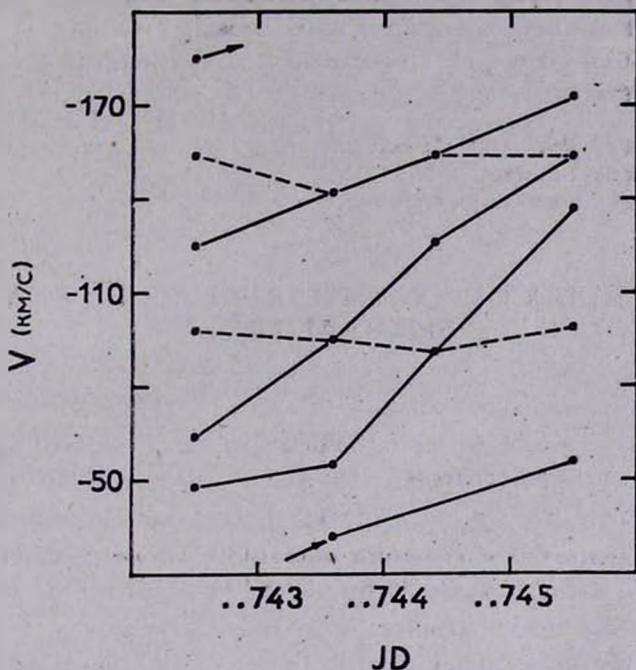


Рис. 6. Возможное поведение индивидуальных компонентов за трехсуточный интервал времени. Стрелки обозначают появление компонента с малой скоростью и исчезновение компонента большой скорости. Пунктир обозначает расположение квазипостоянных компонентов «фонового» профиля.

правленное изменение скорости было впервые подмечено в работе [10], результаты которой можно интерпретировать на основе нынешнего анализа как отражение переменности среднего профиля ввиду более низкого спектрального разрешения на использованных в [10] спектрах. Отметим также, что результаты измерения линий H_δ и H₁₁ [1] удовлетворительно согласуются со скоростями на рис. 5. По аналогии с примером других ионов скорости абсорбционного максимума бальмеровских линий могут отличаться от общей картины. Их характерной чертой является также присутствие компонентов большой скорости (около—200 км/с).

На основе данного исследования самым важным представляется выявление истинного поведения отдельных компонентов с помощью серии высокодисперсионных спектров с достаточным временным разрешением.

Удачное выполнение этой задачи могло бы привести к достаточно адекватному описанию поля скоростей в оболочке Р Лебеда, особенно в ее внутренних частях. Такое описание позволит по-новому подойти к моделированию физических условий в оболочке, гарантируя возможность исходить из наиболее правдоподобного закона изменения скорости газа в ней. Оно может послужить также своего рода граничным условием в попытках выяснить механизм выброса вещества из Р Лебеда.

Авторы благодарны И. Пустыльнику за критический просмотр рукописи данной статьи.

Национальная астрономическая обсерватория

Академия наук Болгарской НР

Тартуская астрофизическая обсерватория

THE MULTICOMPONENT STRUCTURE OF P CYGNI SPECTRAL LINES

N. MARKOVA, I. KOLKA

On the basis of a series of high-dispersion (9 Å/mm) spectrograms of P Cygni we have concluded that there exists a relatively slow varying background profile of absorption lines (characteristic time $100^d \dots 120^d$) and against it a structure of rapidly varying small components (characteristic time is some days). The fine structure is caused, most probably, by the inhomogeneity of matter outflow from P Cygni. The features of the background profile (e. g. the maximum of the whole absorption component) have a periodic trend from initial Doppler-shift to the higher shift-values with a rather sharp restoration of the initial state. To understand the real behaviour of small components, one needs further observations with time-resolution of some hours.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Маркова, И. Колка, *Астрофизика*, 20, 465, 1984.
2. M. de Groot, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 20, 225, 1969.
3. W. S. Adams, P. W. Merrill, *Ap. J.*, 125, 102, 1957.
4. N. Markova, L. Lund, *ENSV TA Toim., Füs. Matem.*, 32, 55, 1983.
5. W. R. Oegerle, D. van Blerkom, *Ap. J.*, 208, 453, 1976.
6. T. Nagts, I. Kolka, L. Lund, in "Mass Loss and Evolution of O-Type Stars", eds. P. S. Conti, C. H. W. de Loore, 1979. p. 39.
7. И. Колка, Препринт А-4 АН Эстр.ССР, 1980.
8. C. S. Beals, *Publ. Dominion Obs.*, 9, 1, 1951.
9. J. B. Hatchings, *M. N. RAS*, 144, 235, 1969.
10. I. Kolka, *ENSV TA Toim., Füs. Matem.*, 32, 51, 1983.