

## ВОДОРОД И ГЕЛИЙ В ВИДИМОМ КОМПОНЕНТЕ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ $\beta$ LYRAE

*В. В. Леушин, М. Ю. Невский, Л. И. Снежко, В. В. Соколов*

По характеру изменений длин волн выделены абсорбционные линии He I и H, возникающие в атмосфере яркого компонента  $\beta$  Lyr. Эквивалентные ширины звездных линий показывают реальные изменения, возможно, с двойной волной в течение периода. Количественное определение содержания гелия с помощью моделей атмосфер дало для яркого компонента значение  $N(\text{He})/N(\text{H})=1.55$ , что значительно меньше, чем в более ранних определениях.

The absorption lines of He I and H arising in the atmosphere of the brighter component of  $\beta$  Lyr are chosen by the character of radial velocity variations. The equivalent widths of these stellar lines show real variations during the period, possibly with a double wave. Quantitative determination of helium abundance with the aid of model atmospheres has yielded a value of  $N(\text{He})/N(\text{H})=1.55$  for the brighter component, which is considerably smaller than in the previous determinations.

Тесная двойная система  $\beta$  Lyr вызывает постоянный интерес исследователей. Сложность абсорбционного и эмиссионного спектров, их переменность в течение периода и от цикла к циклу свидетельствуют о бурных процессах, протекающих в системе, и очень затрудняют изучение этого объекта [1].

Для понимания эволюционного состояния системы  $\beta$  Lyr основную трудность составляет вопрос о природе второго, менее яркого компонента. В процессе многолетних исследований представления об этом компоненте менялись в широких пределах — от холодной и массивной звезды [2, 3] до горячей звезды умеренной массы [4, 5]. Внеатмосферные наблюдения последних лет позволили выдвинуть предположение, что второй компонент  $\beta$  Lyr является «черной дырой» [6, 7]. Вопрос о природе главного, более яркого компонента решен значительно определеннее. В настоящее время считается, что это звезда спектрального класса B8 и  $M_V \approx -3^m7$  [8].

В проведенных исследованиях химического состава  $\beta$  Lyr [9—11] обнаруживается значительный избыток содержания гелия в атмосфере яркого компонента. Однако применение качественных методов анализа в указанных работах не позволяет дать количественную оценку содержания гелия и водорода, а также оставляет под сомнением реальность peculiarностей содержания Mg, Si и N. В настоящее время считается, что  $\beta$  Lyr представляет собой редкий пример двойной системы, наблюдаемой в конце стадии быстрого обмена массой [12]. В связи с этим вопрос о химическом составе более яркого компонента представляет особый интерес для теории эволюции тесных двойных звезд.

В данной работе мы поставили задачу исследования водородного и гелиевого спектров  $\beta$  Lyr с целью количественного определения содержания водорода и гелия в атмосфере яркого компонента системы. Для этого мы располагали спектрографическим материалом в виде регистрограмм в прямых интенсивностях для пяти эшелельных спектров, полученных И. М. Копыловым в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР в 1964 г. Спектры

охватывают область от 3600 до 5100 Å с дисперсией 1.3 Å/мм. Их распределение по фазам приведено в табл. 1.

Существенно, что эшельные спектры позволяют очень просто и верно оценить точность измерения эквивалентных ширин. На рис. 1, а представлено сопоставление измерений  $W_\lambda$  одной и той же линии, получающейся на разных концах одной эшельной спектрограммы. На рис. 1, б даны два измерения контура линии. Сравнения показали, что ошибки измерения очень редко превышают 10%, откуда следует возможность исследования изменений спектральных линий с фазой периода.

ТАБЛИЦА 1

Номер снимка	Дата	Фаза
103	21 V 1964	0.86
105	22 V	0.93
122	22 VII	0.87
140	1 VIII	0.49
162	29 IX	0.43

**Линии водорода и гелия.** Водородные линии были измерены от  $H_\beta$  до бальмеровского скачка. Линии  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\delta$  и  $H_8$  в значительной мере искажены эмиссией. Интенсивность в линии  $H_\beta$  практически всегда выше уровня непрерывного спектра, поэтому говорить здесь об абсорбционной компоненте

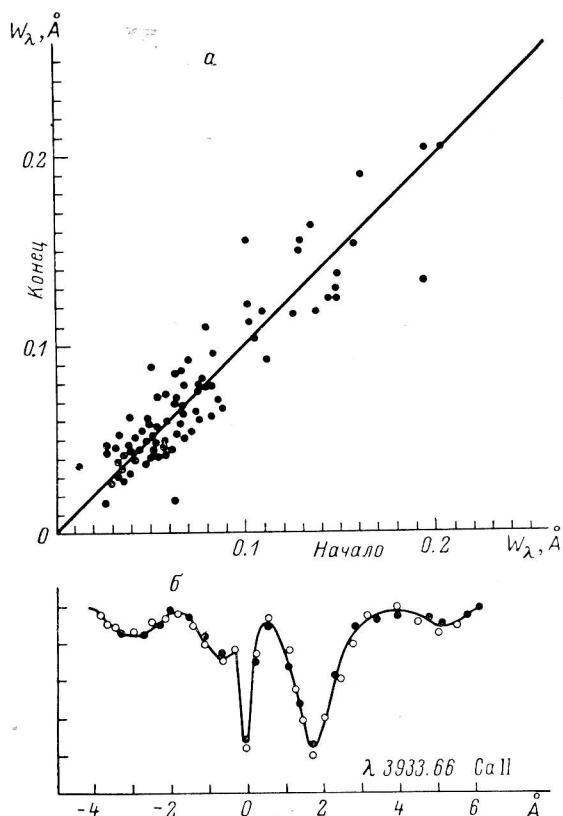


Рис. 1. Сопоставление  $W_\lambda$  и контуров линии для начала и конца эшельной спектрограммы.

нельзя. Очень трудно выделить абсорбционную компоненту в линии  $H_8$ , поскольку, кроме водородной эмиссии, искажающее влияние оказывает бленда с  $He I \lambda 3888$ . Для линий  $H_\gamma$ ,  $H_\delta$  и  $H_\epsilon$  эквивалентные ширины абсорбционной компоненты можно получить, достраивая ее контур по неискаженным эмиссией частям линии. Начиная от  $H_\beta$  до  $H_{24}$  водородный спектр  $\beta$  Лу

ТАБЛИЦА 2  
Эквивалентные ширины линий водорода (Å)

Линия	Фаза				
	0.432	0.494	0.860	0.872	0.933
H <sub>γ</sub>	2.2	2.1	2.0	—	2.0
H <sub>δ</sub>	4.0	3.2	2.8	3.5	3.9
H <sub>ε</sub>	2.5	1.9	2.5	2.2	2.4
H <sub>9</sub>	2.39	1.64	2.38	2.26	3.12
H <sub>10</sub>	2.05	2.05	2.76	2.15	3.15
H <sub>11</sub>	—	1.73	2.91	2.20	2.80
H <sub>12</sub>	1.68	2.00	2.47	2.20	2.80
H <sub>13</sub>	1.40	1.44	2.55	2.10	2.70
H <sub>14</sub>	1.33	1.17	1.74	1.80	2.26
H <sub>15</sub>	1.05	1.16	1.54	1.35	1.64
H <sub>16</sub>	0.79	0.82	—	0.93	1.33
H <sub>17</sub>	0.52	0.54	0.74	0.72	1.18
H <sub>18</sub>	0.40	0.36	0.56	0.40	0.68
H <sub>19</sub>	0.26	—	0.46	0.27	—
H <sub>20</sub>	0.16	—	0.28	0.20	—
H <sub>21</sub>	0.13	—	0.19	0.15	—
H <sub>22</sub>	0.12	—	0.08	0.13	—
H <sub>23</sub>	0.08	—	0.06	0.08	—
H <sub>24</sub>	0.03	—	0.03	0.05	—
H <sub>25</sub>	—	—	0.02	0.03	—

имеет чистые абсорбционные линии. В табл. 2 даны значения эквивалентных ширин водородных линий.

Средняя ошибка приведенных значений  $W_\lambda$  составляет примерно 5% для линий H<sub>9</sub>—H<sub>24</sub> и, естественно, значительно больше для линий H<sub>γ</sub>—H<sub>8</sub>, что обусловлено способом их определения. Однако и в последнем случае, как показывает рассмотрение изменений  $W_\lambda$  с номером водородной линии [13, 14], ошибка не превышает 30%. Используя значения  $W_\lambda$  из табл. 2, мы определили обычными методами значения электронной плотности  $n_e$  и число атомов водорода во втором квантовом состоянии  $N_{02}H$  в единичном столбе атмосферы. Результаты сведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3

Фаза	Метод			lg $N_{02}H$
	lg $n_e$			
	$n_m$	по Уинзольду		
max		min		
0.43	12.78	14.37	14.06	16.14
0.49	12.80	14.37	13.82	16.19
0.86	12.78	14.12	13.73	16.33
0.87	12.71	14.20	13.70	16.28
0.93	12.72	14.12	13.74	16.33

Для изучения гелия в атмосфере β Луг нами были измерены все линии He I в области  $\lambda\lambda$  3732÷5017Å. Атмосферные компоненты сложного эмиссионно-абсорбционного контура выделялись по характеру изменения длин волн из-за орбитального движения. Рис. 2 иллюстрирует процедуру выделения звездной компоненты на примере наиболее искаженной линии He I  $\lambda$  4471 при совмещении положения ближайших звездных линий для разных фаз. Эквивалентные ширины таким образом выделенных абсорбционных

ТАБЛИЦА 4

## Эквивалентные ширины и наблюдаемые длины волн линий He I (Å)

$\lambda_{\text{лаб}}$	Фаза									
	0.43		0.49		0.86		0.87		0.93	
	$\lambda_{\text{набл}}$	$W_{\lambda}$	$\lambda_{\text{набл}}$	$W_{\lambda}$	$\lambda_{\text{набл}}$	$W_{\lambda}$	$\lambda_{\text{набл}}$	$W_{\lambda}$	$\lambda_{\text{набл}}$	$W_{\lambda}$
4471.48	.8	0.20	.8	0.40	.6	0.27	.8	0.25	.7	0.50
4471.68										
4437.55	.6	0.10	.6	0.09	.7	0.09	—	—	.7	0.13
4387.93	.9	0.38	.9	0.40	8.0	0.45	—	—	8.1	0.55
4168.97	9.0	0.12	.9	0.09	9.0	0.16	.7	0.15	.9	0.14
4143.76	.7	0.35	.8	0.25	4.0	0.60	—	—	.8	0.60
4120.8	.9	0.18	.9	0.20	.8	0.20	.8	0.20	.8	0.24
4026.19	.2	0.16	.2	0.20	.2	0.28	.2	0.30	.2	0.60
4023.97	.9	0.16	.9	0.10	.6	0.20	.9	0.10	.8	0.30
4009.27	.4	0.24	.3	0.24	.3	0.30	.2	0.30	.3	0.31
3964.73	.7	0.25	.7	0.30	.7	0.24	.7	0.20	.9	0.26
3935.91	.7	0.16	.8	0.14	.9	0.28	.9	0.12	.6	0.20
3926.53	.4	0.30	.4	0.25	.5	0.33	.3	0.25	.5	0.40
3878.18	.3	0.04	.2	0.04	.2	0.10	.2	0.05	.2	0.04
3871.79	2.1	0.14	.7	0.15	.7	0.29	.3	0.24	.8	0.28
3867.5	.5	0.16	.4	0.12	.5	0.23	.5	0.19	.5	0.22
3838.09	.0	0.06	.0	0.04	.2	0.04	.0	0.03	.1	0.07
3833.55	.0?	0.10	.0?	0.05	.2	0.13	.0?	0.08	.2	0.12
3819.61	.6	0.30	.5	0.20	.4	0.35	.8	0.30	.8	0.60
3805.74	—	—	.7	0.08	.5	0.14	.9	0.12	.6	0.14
3784.86	—	—	.9	0.06	.9	0.15	.9	0.13	.9	0.14
3768.78	—	—	.7	0.12	.8	0.01	.7	0.01	.8	0.10
3756.11	.9	0.08	5.9	0.06	.3	0.19	.5	0.11	.0	0.08
3732.86	.7	0.01	.8	0.01	.9	0.01	3.0	0.12	—	—

484

линий приведены в табл. 4. Измеренные нами в системе абсорбционного спектра звезды длины волн линий He I, также приведенные в табл. 4, редко отличаются от лабораторных более чем на  $\pm 0.2$  Å. Различия можно отнести к неточности измерений длин волн по регистрограммам, так что все выделенные линии поглощения He I возникают там же, где и остальной звездный абсорбционный спектр. У всех выделенных звездных линий He I запрещенные компоненты не обнаруживаются.

ТАБЛИЦА 5

Фаза	$\lg N_{2^1P}H$	$\lg N_{2^3P}H$
0.432	15.3	14.5
0.494	15.2	14.3
0.860	15.5	14.7
0.872	15.1	14.75
0.933	15.3	14.70

Эквивалентные ширины линий He I из табл. 4 были использованы для определения методом Унзольда [16] числа атомов гелия в столбе атмосферы главного компонента. Значения  $NH$  получены для уровней  $2^1P$  и  $2^3P$  по сериям  $2^1P-n^1S$ ,  $2^1P-n^1D$  и  $2^3P-n^3S$ ,  $2^3P-n^3D$  соответственно. Результаты сведены в табл. 5.

Интересно отметить, что линии разных серий дают различающиеся значения  $N_{2^1P}H$ . Реальность этого эффекта подтверждается проявлением его при нахождении  $N_{2^1P}H$  у  $\beta$  Ori [17]. На рис. 3 представлены графики для определения  $NH$  по методу Унзольда. Можно видеть, что «насыщение» кривых у диффузной серии  $2^1P-n^1D$  происходит при меньших значениях  $N_{2^1P}H$ , чем у резкой серии  $2^1P-n^1S$ . Это связано скорее всего с различными факторами уширения коэффициента поглощения в линиях разных серий, что приводит к разной высоте однородной атмосферы и, следовательно, к разным значениям  $N_{2^1P}H$ .

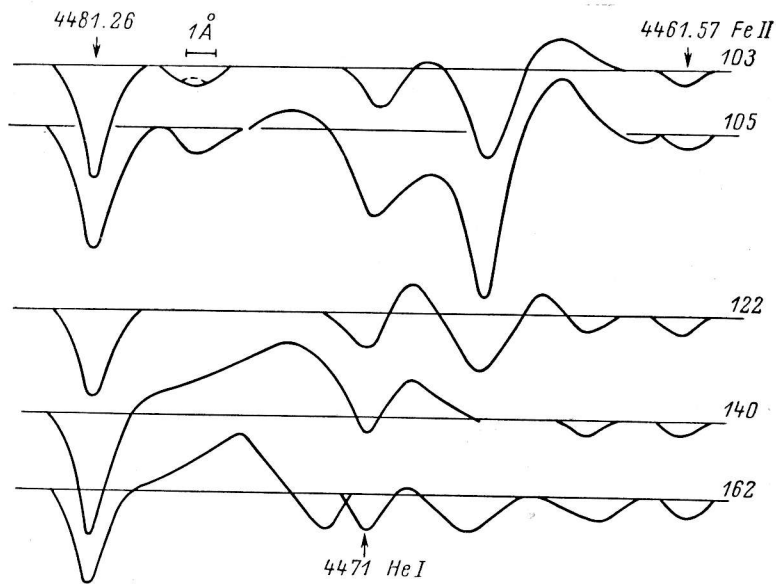


Рис. 2. Выделение звездной компоненты линии He I  $\lambda$  4471 при совмещении линий звездного спектра для разных фаз.

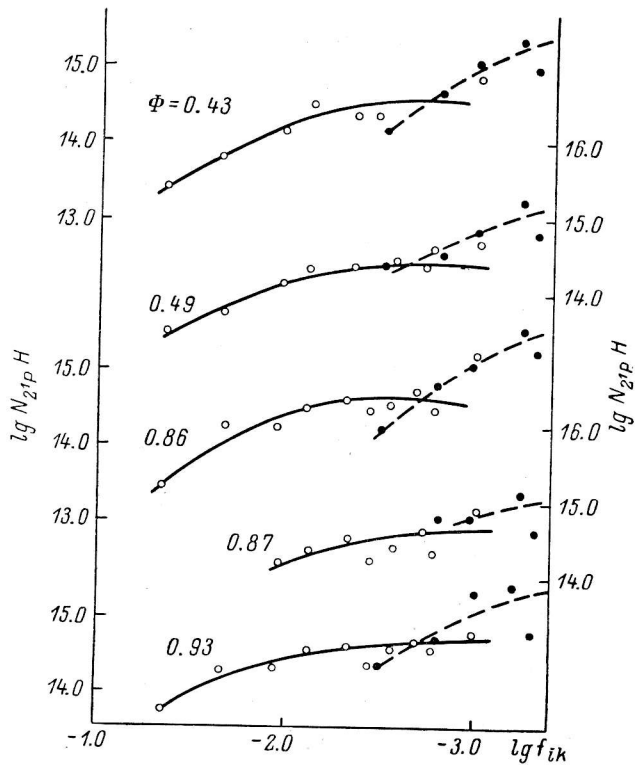


Рис. 3. Определение  $N_{2^1P, H}$  методом Унзоляда.

Кружки — серия  $2^1P-n^1D$ , точки — серия  $2^1P-n^1S$ .

■ **Переменность водородного и гелиевого спектров.** При исследовании переменности водородного и гелиевого спектров дополнительно к нашим

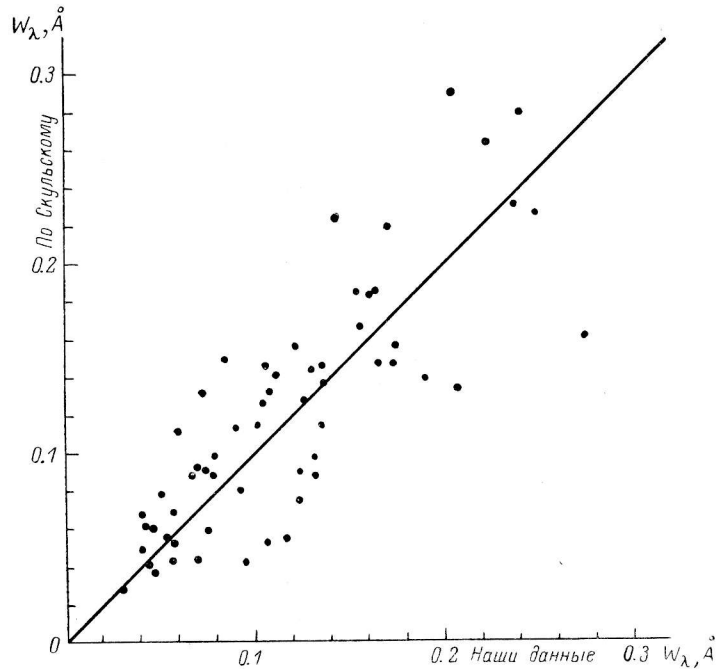


Рис. 4. Сравнение  $W_\lambda$  из данной работы и из [18].

измерениям были использованы данные из работы [18]. Для выявления различий систем эквивалентных ширин сравнивались измерения  $W_\lambda$  для фаз

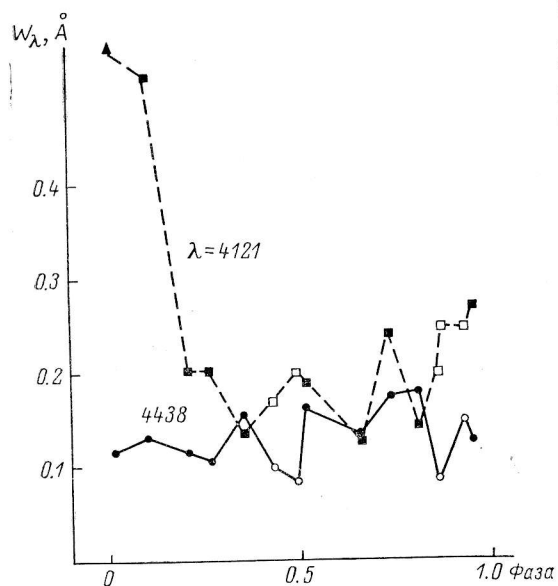


Рис. 5. Изменение  $W_\lambda$  линий He I с фазой. Светлые значки — наши измерения, темные — из работы [18]. Кружочки — линия  $\lambda$  4338, квадраты — линия  $\lambda$  4121.

0.494 и 0.933 по нашим материалам с данными для фаз 0.510 и 0.950 из [18]. Результаты сравнения показаны на рис. 4 и свидетельствуют о тождественности нашей системы  $W_\lambda$  с системой работы [18]. Как показывает рис. 5, изменения  $W_\lambda$  с фазой периода имеют место. Однако из рассмотрения  $W_\lambda$  трудно получить заключение о величине и характере изменений водородного и гелиевого спектров яркого компонента  $\beta$  Луγ, ввиду сильного искажения его эмиссионно-абсорбционными компонентами, возникающими в газовых потоках в оболочке системы. В связи с этим мы попытались исследовать изменение с фазой периода средних характеристик, полученных из анализа водородных и гелиевых линий, а именно  $n_e$  ( $n_m$ ),  $N_{0,2}H$  и  $N_{2^1P}H$ . На рис. 6 представлена зависимость этих величин от фазы периода орбитального движе-

ния. Поскольку в [18] приведены  $W_\lambda$  только сильных линий серии  $2^1P - n^1D$ , для построения рис. 6 значения  $N_{2^1P}H$  были определены только по линиям,

общим с работой [18]. Это объясняет меньшие значения  $N_{2p}H$  по сравнению с приведенными в табл. 5. Анализ данных рис. 6 позволяет сделать следующие выводы.

Амплитуда изменения чисел атомов водорода и гелия на соответствующих уровнях в столбе атмосферы составляет в логарифмах примерно 0.35.

Кривые изменений показывают двойную волну в течение периода.

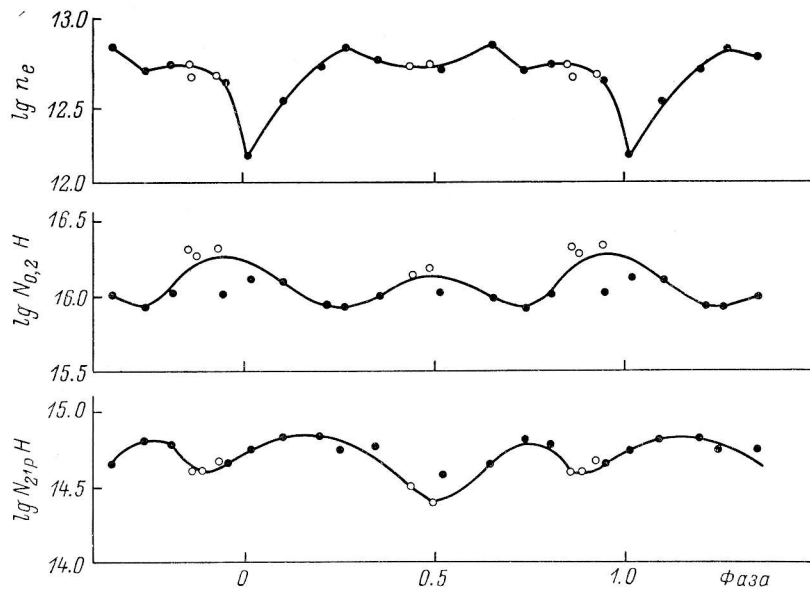


Рис. 6. Изменения  $\lg n_e$ ,  $\lg N_{0,2}H$  и  $\lg N_{2p}H$  с фазой.

Светлые кружки — наши данные, темные — из [18].

Вблизи минимумов блеска усиление водородных линий сопровождается ослаблением гелиевых, в промежутках между затмениями картина обратная.

Изменение  $n_e$  ( $n_m$ ) отражает скорее всего изменение  $W_\lambda$  водородных линий ввиду способа определения  $n_e$  ( $n_m$ ) из номера последней линии  $n_m$ , находимого экстраполяцией на нуль функции  $W_\lambda = f(n)$ . Поэтому для больших значений  $W_\lambda$  получается большее значение  $n_m$  и, следовательно, меньшее  $n_e$ , так что график  $\lg n_e$  ( $n_m$ ) просто отражает изменение линий водорода с фазой периода.

Отметим, что для линий гелия кривая, аналогичная показанной на рис. 6, получена и в работе [9].

ТАБЛИЦА 6

Литература	$\lg N_{0,2}H$	$\lg N_{2p}H$	$\lg n_e$ ( $n_m$ )	$N(He)/N(H)$
[9]	15.90	15.40	13.15	125
[10]	17.10	16.15	13.0	100
Авторы	16.26	15.30	12.8	40

**Определение содержания водорода и гелия.** Определение содержания гелия путем простого сравнения полученных  $NH$  для гелия и водорода не может дать близкого к реальному значения. Причина этого состоит в том, что из-за большого различия потенциалов возбуждения линии гелия и водорода в атмосфере звезды формируются на разных глубинах. В табл. 6 приведены значения  $NH$  для гелия и водорода и электронные плотности  $n_e$  по нашим определениям и по данным работ [9, 10]. Если принять значение  $\lg n_e = 13.0$ ,

наиболее близкое всем трем определениям и наиболее вероятное для  $\beta$  Луг значение  $\theta_{\text{возб}} = 0.41$ , то получим значения относительного содержания гелия  $N(\text{He})/N(\text{H})$ , приведенные в табл. 6.

Из таблицы видно, что из всех трех определений следует большой избыток гелия, но получающиеся значения имеют большой разброс и вызывают сомнение по указанной выше причине.

Для определения содержания гелия мы провели расчет контуров и эквивалентных ширин линий гелия и водорода. Поскольку предварительные оценки показывают значительный избыток гелия в атмосфере  $\beta$  Луг, мы применили в расчетах модели атмосфер Клингслесмита [19], в которых содержание гелия меняется в широких пределах. Чтобы перекрыть область возможных значений параметров  $\beta$  Луг, были выбраны модели с  $T_{\text{эф}} = 10\,000$  и  $12\,000^\circ\text{K}$ ,  $\lg g = 4, 3.5$  и  $2.5$ ,  $N(\text{He})/N(\text{H}) = 0.125$  и  $1.5$ . Значение микротурбулентной скорости  $v_t$  в соответствии с работой [14] принималось равным  $5.5$  и  $7.5$  км/сек. Расчет был дан для пяти линий гелия, характеристики которых приведены в табл. 7, а также для водородных линий  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  и  $H_\delta$ .

ТАБЛИЦА 7  
Атомные характеристики [20] и средние наблюдаемые  $\bar{W}_\lambda$  линий He I

$\lambda$	$f_{ik}$	$g_i$	$\Delta\lambda_{\text{Штарк}}, n_e = 10^{16}$				$\bar{W}_\lambda$
			$T = 500$	10 000	20 000	40 000	
3935.91	.000556	3	0.28	0.31	0.35	0.39	0.17
3964.73	.0507	1	1.21	1.11	0.99	0.86	0.25
4120.81	.00376	9	3.12	3.50	3.93	4.47	0.20
4387.93	.0436	3	7.31	5.90	4.66	3.62	0.45
4437.55	.00308	3	4.88	5.46	6.15	6.92	0.10

Расчеты были выполнены в ВЦ САО АН СССР по программе, подробно описанной в [21]. Результаты для  $v_t = 5.5$  км/сек. приведены в табл. 8. Первая строка дает значение  $W_\lambda$ , во второй строке приведены значения оптических глубин формирования линии  $\tau_w$  (первое число) и непрерывного спек-

ТАБЛИЦА 8  
Эквивалентные ширины и глубины формирования линий гелия и водорода для моделей с  $T_{\text{эф}} = 12\,000^\circ\text{K}$

$N(\text{He})/N(\text{H})$	$\lg g = 4.0$		$\lg g = 3.5$		$\lg g = 2.5$	
	0.125	1.5	0.125	1.5	0.125	1.5
3936	0.003	0.020	0.005	0.025	0.009	0.039
	1.68—1.75	1.51—1.77	1.64—1.73	1.41—1.76	1.60—1.68	1.17—1.70
3965	0.065	0.288	0.074	0.273	0.090	0.250
	1.28—1.71	1.20—1.73	1.12—1.69	1.08—1.73	1.02—1.65	0.85—1.67
4120	0.027	0.154	0.038	0.178	0.055	0.187
	1.34—1.53	1.22—1.54	1.28—1.51	1.11—1.54	0.80—1.52	0.81—1.53
4387	0.044	0.377	0.081	0.492	0.122	0.549
	1.18—1.28	1.12—1.28	1.08—1.27	1.03—1.28	0.65—1.24	0.71—1.24
4437	0.006	0.055	0.011	0.075	0.023	0.099
	1.19—1.24	1.12—1.24	1.15—1.24	1.04—1.24	0.89—1.20	0.64—1.20
$H_\beta$	10.989	13.506	8.544	10.701	4.789	6.529
	0.33—0.95	0.32—0.95	0.32—0.95	0.32—0.95	0.34—0.97	0.34—0.96
$H_\gamma$	11.685	14.402	9.340	11.691	5.224	7.081
	0.42—1.32	0.41—1.32	0.43—1.31	0.43—1.32	0.44—1.28	0.44—1.31
$H_\delta$	11.020	13.577	8.898	11.074	4.956	6.737
	0.49—1.55	0.48—1.56	0.50—1.54	0.49—1.56	0.50—1.46	0.51—1.52



ра в длине волны центра линии  $\tau_n$  (второе число). В табл. 9 эти же данные приведены для моделей с  $T_{эф} = 10\,000$  и  $\lg g = 2.5$ . Оптические глубины даны в стандартной длине волны модели  $\lambda\ 5050$ . Рис. 7 демонстрирует хорошее согласие наших результатов с аналогичными из работы [22], небольшие различия полностью объясняются несколько меньшим значением  $T_{эф}$  в наших расчетах.

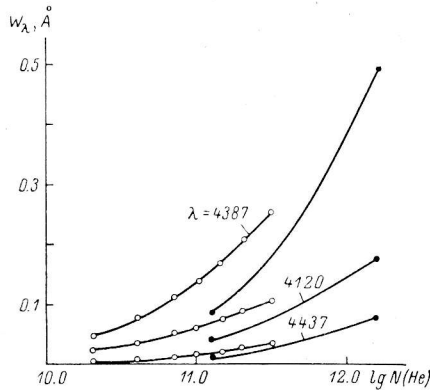


Рис. 7. Зависимость  $W_\lambda$  от содержания гелия при  $\lg g = 3.5$ .

Светлые кружки — наши данные для модели с  $T_{эф} = 12\,000^\circ\text{K}$ , темные — данные [22] для  $T_{эф} = 12\,600^\circ\text{K}$ .

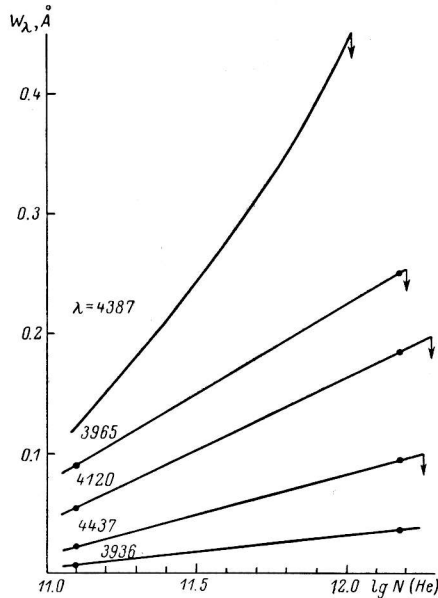


Рис. 8. Зависимость  $W_\lambda$  линий гелия от содержания его в атмосфере для модели атмосферы с  $T_{эф} = 12\,000^\circ\text{K}$  и  $\lg g = 2.5$ .

Стрелками показаны значения  $\lg N(\text{He})$ , соответствующие значениям  $W_\lambda$  из табл. 7.

Рассмотрение полученных зависимостей  $W_\lambda$  от параметров модели показывает важность выбора значений  $T_{эф}$  и  $\lg g$  для  $\beta$  Луг. Из работы [10]

видно, что и при традиционном определении можно получить значения  $N(\text{He})/N(\text{H})$  от 25 до 1/4.55 в зависимости от принятого значения  $\theta$  (0.45 или 0.35). В табл. 10 приведены определения температуры яркого компонента  $\beta$  Луг из последних литературных данных. Первые четыре определения основаны на зависимости спектр-эффективная температура для нормальных звезд, и совсем не очевидно, что  $\beta$  Луг подчиняется этой зависимости. В трех последних случаях  $T_{эф}$  получена из температур возбуждения. Анализ данных табл. 10 позволяет утверждать, что наиболее вероятное значение эффективной температуры яркого компонента  $\beta$  Луг  $T_{эф} = 12\,000 \pm 300^\circ\text{K}$ .

Анализ кривых блеска [23] свидетельствует об изменении цвета системы и, следовательно,  $T_{эф}$ . Однако в работе [11] показано, что  $T_{эф}$  главного компонента, а значит, и  $T_{эф}$  практически постоянны во всех фазах. Поскольку в изменении цвета вносит вклад второй компонент (тогда как температура возбуж-

ТАБЛИЦА 9

$W_\lambda$  и  $\tau$  для модели с  $T_{эф} = 10\,000^\circ\text{K}$  и  $\lg g = 2.5$

$N(\text{He})/N(\text{H})$	0.125	1.5
$\lambda\ 3936$	0.002 1.68—1.73	0.013 1.60—1.80
$\lambda\ 3965$	0.038 1.29—1.70	0.112 1.13—1.77
$\lambda\ 4120$	0.018 1.38—1.54	0.071 1.22—1.58
$\lambda\ 4387$	0.038 1.12—1.31	0.167 1.07—1.33
$\lambda\ 4437$	0.002 1.25—1.27	0.008 1.24—1.29
$\text{H}_\gamma$	6.78 0.46—1.34	9.04 0.46—1.37
$\text{H}_\delta$	6.41 0.53—1.56	8.55 0.53—1.56

ТАБЛИЦА 10

Sp	$\theta_{\text{возб}}$	$T_{\text{эф}}$	Литература
B8.5—B9.5		11500—10200	[23]
B8.6		11130*	[24]
(B—V) = -0.07		12530**	[24]
B9		10750	[5]
B8		12800	[8]
	0.52	11900	[9]
	0.45 ± .01	12300	[11]
	0.41—0.38	13600—14900	[10]
		12000	[25]

\* В предположении дефицита водорода.

\*\* В предположении нормального содержания водорода.

дения, определяемая по линейчатому спектру металлов, характеризует только яркий компонент), то при анализе химического состава яркого компонента мы можем, опираясь на результаты работы [11], не учитывать изменения  $T_{\text{эф}}$  с фазой периода.

Ускорение силы тяжести на поверхности главного компонента нами было оценено следующим образом. Исходя из того, что у звездных линий гелия не обнаруживаются запрещенные компоненты, которые появляются в спектрах звезд этой светимости и спектра при  $\lg g_{\text{эф}} \geq 3$  [26], у яркого компонента  $\beta$  Луг значение  $\lg g < 3$ . Статистические зависимости работы [27] дают для светимости и спектрального класса  $\beta$  Луг значение  $\lg g \leq 3$ . Приняв значения массы и радиуса главного компонента  $\beta$  Луг по данным [28], получим значение «динамического» ускорения силы тяжести  $\lg g_{\text{дин}} = 3.02$ .

ТАБЛИЦА 11

Линия	$\lg N(\text{He})$
3965	12.20
4120	12.28
4387	12.03
4437	12.26
Среднее	12.19 ± .06

Таким образом, все три оценки приводят к значению  $\lg g \leq 3$ . Однако для сверхгигантов возможно систематическое различие  $g_{\text{эф}}$  и  $g_{\text{дин}}$ , причем в области светимости  $\beta$  Луг  $\lg g_{\text{эф}}$  меньше  $\lg g_{\text{дин}}$  примерно на 0.3 [29]. Учтя это обстоятельство, можно довольно уверенно утверждать, что для главного компонента  $\beta$  Луг значение  $\lg g = 2.5$  близко к истинному.

Приняв для яркого компонента  $\beta$  Луг приведенные выше значения  $T_{\text{эф}} = 12000^\circ\text{K}$

и  $\lg g = 2.5$ , по теоретическим зависимостям  $W_\lambda$  от содержания гелия в атмосфере, показанным на рис. 8, мы определили его содержание, используя средние значения  $\bar{W}_\lambda$  линий гелия из табл. 7. Значения  $\lg N(\text{He})$  при  $\lg N(\text{H}) = 12$ , полученные по четырем линиям He I, приведены в табл. 11. Использовать для определения линию He I  $\lambda 3936$  не удалось, так как она сильно искажена блендой с линией Fe II.

Из этой таблицы видно, что относительное содержание гелия в атмосфере яркого компонента  $\beta$  Луг составляет  $N(\text{He})/N(\text{H}) = 1.55$ . Полученное нами значение избытка гелия значительно ниже, чем в определениях [9, 10], и лучше согласуется с предсказываемой для  $\beta$  Луг теорией эволюции тесных двойных звезд (случай В), что открывает пути для понимания необычного соотношения масс и светимостей компонент этой уникальной системы.

#### Возможные причины изменений водородного и гелиевого спектров.

Используя результаты расчетов, можно попытаться определить причины изменений  $W_\lambda$  звездных линий гелия и водорода, связав их с изменениями условий по поверхности главного компонента. На рис. 9 и 10 показана зависимость от  $\lg g$  эквивалентных ширин линий гелия и водорода для модели с  $T_{\text{эф}} = 12000$  и  $N(\text{He})/N(\text{H}) = 1.5$ . Можно видеть, что при изменении  $\lg g$  от 2 до 3  $W_\lambda$  линий гелия изменяются на 5—10%, тогда как  $W_\lambda$  линий

водорода изменяются примерно на 100%. В то же время из наших измерений следует, что и водород, и гелий меняют интенсивность своих линий в 1.5—2 раза. Изменение  $g$  даже на 2 порядка не даст наблюдаемое изменение  $W_\lambda$  у линий гелия, тогда как при этом изменение  $W_\lambda$  водородных линий с избытком перекроет наблюдаемое. На рис. 11 и 12 показана зависимость  $W_\lambda$  от  $T_{эф}$  ( $N(\text{He})/N(\text{H}) = 1.5$ ,  $\lg g = 2.5$ ). Возрастание  $T_{эф}$  приводит к возрастанию интенсивности гелиевых линий и ослаблению водородных. Для объяснения амплитуд изменения  $W_\lambda$  линий гелия и водорода, а также характера кривых на рис. 6 можно было бы предположить уменьшение  $T_{эф}$  примерно на 500°K вблизи минимумов блеска. Однако в [11] получено, что  $T_{возб}$  яркого компонента постоянна во всех фазах. Поэтому совершенно недостаточно данных для задачи детального моделирования поверхности яркого компонента,

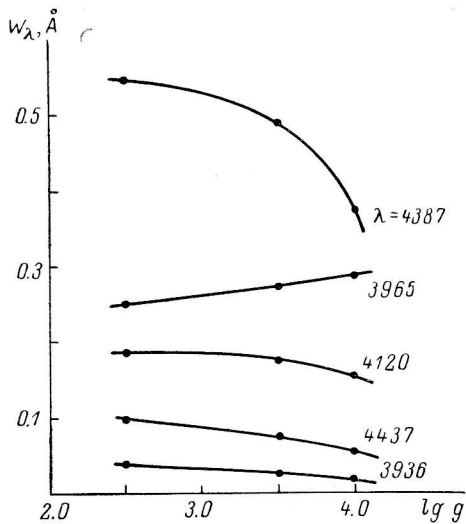


Рис. 9. Зависимость  $W_\lambda$  линий гелия от  $\lg g$ .

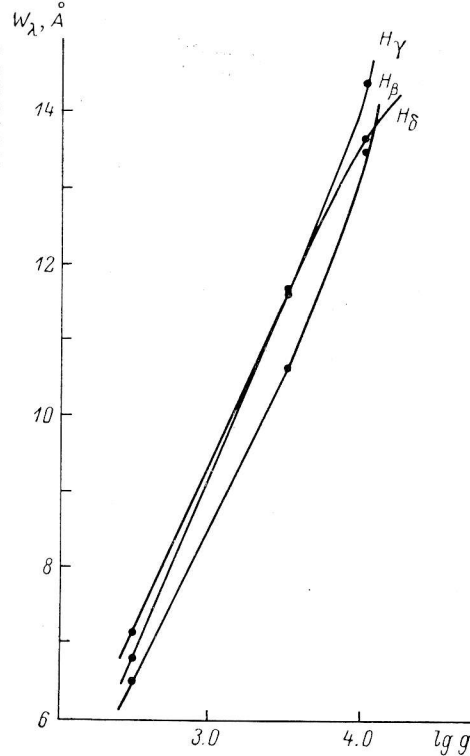


Рис. 10. Зависимость  $W_\lambda$  линий водорода от  $\lg g$ .

крайне интересной ввиду возможности уточнения соотношения масс в системе. Если утверждение о постоянстве  $T_{эф}$  [11] верно, то большая часть обнаруживаемых изменений  $W_\lambda$  обусловлена неполным исключением влияния газовых потоков и оболочки системы.

**Выводы.** Обработка и анализ имеющегося спектрального материала дали следующие результаты.

По характеру изменения длин волн из-за орбитального движения в спектре  $\beta$  ЛуГ выделены линии водорода и гелия, возникающие в атмосфере яркого компонента, и измерены их эквивалентные ширины. Обнаруживаются реальные изменения интенсивности звездных линий гелия и водорода, возможно, с двойной волной в течение периода. Однако для задач интерпретации характер и амплитуда изменений  $W_\lambda$  выявляются недостаточно надежно из-за трудностей исключения эмиссионно-абсорбционных компонент, возникающих в окружающей систему газовой среде.

Определение величин  $N_{02}\text{H}$  и  $N_{2p}\text{H}$  по эквивалентным ширинам линий водорода и гелия приводит к значениям  $N(\text{He})/N(\text{H}) > 1$ , сильно различающимся по разным определениям — от 200 до 3 [9, 10].

Анализ физических характеристик  $\beta$  Лyr и ее спектра показывает, что яркий компонент лучше всего можно описать, приняв для него  $T_{эф} = 12\,000 \pm$

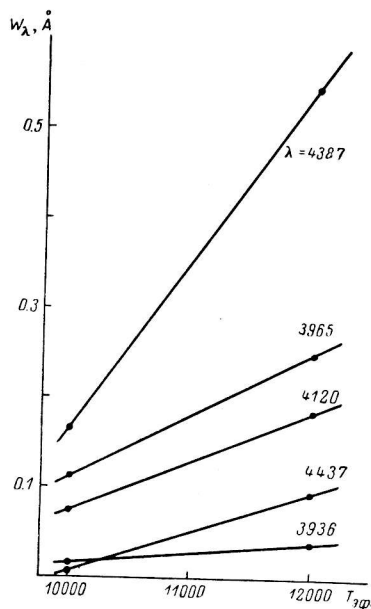


Рис. 11. Зависимость  $W_\lambda$  линий гелия от  $T_{эф}$ .

$\pm 300^\circ\text{K}$  и  $\lg g = 2.5$ . При этих параметрах количественное определение содержания гелия по расчетам с помощью моделей атмосфер дает  $N(\text{He})/N(\text{H}) = 1.55$ . Полученное значение избытка гелия значительно меньше, чем найденное в более ранних определениях [9, 10], и открывает возможность понимания необычного соотношения масс и светимостей компонент  $\beta$  Лyr, исходя из представлений теории эволюции тесных двойных систем.

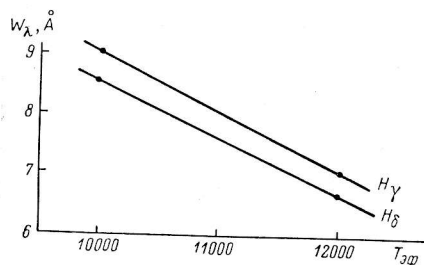


Рис. 12. Зависимость  $W_\lambda$  линий водорода от  $T_{эф}$ .

Авторы благодарят И. М. Копылова и Е. Л. Ченцова за полезные обсуждения в ходе выполнения работы.

#### Литература

1. Струве О. Эволюция звезд. М., ИЛ, 1954, 285 с.
2. Struve O. The spectrum of  $\beta$  Lyrae. — *Astrophys. J.*, 1941, 93, N 1, p. 104—118.
3. Garoschkin S. Zum Problem von  $\beta$  Lyrae. — *Z. Astrophys.*, 1956, 39, N 2, p. 133—136.
4. Maury A. C. — *Ann. Harvard Obs.*, 1933, 84, p. 207.
5. Дадаев А. Н. Спектральные линии спутника  $\beta$  Лyr наблюдаются. — *Астрон. цирк.*, 1974, № 839, с. 5.
6. Deviney E. J. Possible black hole in  $\beta$  Lyrae. — *Nature*, 1971, 233, p. 110.
7. Wilson R. E. Further evidence for a black hole in  $\beta$  Lyrae. — *Nature*, 1971, 234, p. 406.
8. Kříž S. The close binary Beta Lyrae. — *Bull. astron. Inst. Čech.*, 1974, 25, N 1, p. 6—15.
9. Боярчук А. А. Количественный анализ химического состава атмосферы яркого компонента  $\beta$  Лyr. — *Астрон. ж.*, 1959, 36, вып. 5, с. 776—778.
10. Nаск М., Job F. Chemical composition of the atmosphere of  $\beta$  Lyr. — *Z. Astrophys.*, 1965, 62, N 3, p. 203—216.
11. Скульский М. Ю. К изучению яркого компонента  $\beta$  Лyr. — *Астрон. цирк.*, 1972, № 668, с. 2.
12. Plavec M. Binaries possibly in rapid phase of mass loss. — *Bull. am. astron. Soc.*, 1971, 3, N 1, p. 14.
13. Копылов И. М. Эквивалентные ширины линий поглощения в спектрах 109 звезд 05—В7. — *Изв. Крымск. астрофиз. obs.*, 1958, 20, с. 123—156.
14. Uscomb W. Line strength for southern OB stars. — *Mon. Not. R. astron. Soc.*, 1969, 144, N 1, p. 1—31.
15. Kiyokawa M., Kikuchi S. Narrow-band photometry and spectroscopic observations of  $\beta$  Lyrae. — *Tokio astron. Bull., Sec. Ser.*, 1974, N 233, p. 2687—2704.
16. Unsold A. *Physic der Sternatmosphären*. Berlin, Springer-Verlag, 1955, 866 S.
17. Ченцов Е. Л. Высокодисперсионный спектр сверхгиганта  $\beta$  Ori — *Учен. зап. Уральск. ун-та*, 1969, № 70, с. 177—197.
18. Скульский М. Ю., Вовчик Е. Б. Эквивалентные ширины линий поглощения в спектре  $\beta$  Лyr. — *Цирк. Львовск. астрофиз. obs.*, 1971, № 45, с. 25—31.
19. Klinglesmith D. A. Hydrogen-line blanketed model atmospheres. Washington, US Government Print. Office, 1971, NASA SP-3065.

20. Г р и м Г. Спектроскопия плазмы. М., Атомиздат, 1969, 452 с.
21. С н е ж к о Л. И. К методике расчета контуров линии поглощения. — Сообщ. Спец. астрофиз. обс., 1971, вып. 3, с. 3—16.
22. O' M a r a B. J., S i m p s o n R. W. Curves of growth and line profiles for neutral helium lines in early type stars. — Mem. R. Astron. Soc., 1971, 75, p. 51—84.
23. B e l t o n M. J. S., W o o l f N. J. The problem of  $\beta$  Lyrae. — Astrophys. J., 1965, 141, N 1, p. 141—155.
24. W i l s o n R. E. The secondary component of  $\beta$  Lyrae. — Astrophys. J., 1974, 189, N 2, p. 319—331.
25. М а р т ы н о в Д. Я. Тесные двойные звезды и их значение для теории звездной эволюции. — Успехи физ. н., 1972, 108, вып. 4, с. 701—733.
26. М у с т е л ь Э. Р. Звездные атмосферы. М., Физматгиз, 1960, 444 с.
27. К о п ы л о в И. М. Физические характеристики горячих звезд. — Изв. Крымск. астрофиз. обс., 1967, с. 134—155.
28. С к у л ь с к и й М. Ю. Количественный анализ спектра  $\beta$  Лyr. — Переменные звезды, 1973, 18, с. 609—614.
29. К о п ы л о в И. М. Об ускорении силы тяжести на поверхностях сверхгигантов. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1970, 2, с. 42—49.

Ноябрь 1975 г.

---