

Ю. ИБРУС

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ HD 190603

Звезда HD 190603 (в каталоге Мерилла и Бэруелл [1] под номером MWC 326) является сверхгигантом класса В2 звездной величины $5^m.7$. Эта звезда исследована Вильямсом только по одной спектрограмме [2]. Билс [3] считает HD 190603 звездой типа Р Лебеда. Автор настоящей работы провел исследование атмосферы этой звезды на основании спектрограмм, полученных Крымской астрофизической обсерваторией с помощью дифракционного спектрографа 122-см рефлектора. Всего использовано три спектрограммы: одна с дисперсией 15 \AA/мм и две — 36 \AA/мм .

1. **Обработка наблюдательного материала.** Эквивалентные ширины спектральных линий измерены обычным способом, по регистрограммам, полученным на микрофотометре МФ4 с увеличением около 90 раз. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

λ	Элемент	Номер мультиплета	ε	W_λ	$\log gf \lambda$	Примечания
1	2	3	4	5	6	7
3686,83	H19	4	10,15	0,24	-6,82	$R_i=0,17$
3691,56	H18	4	10,15	0,20	-6,74	$R_i=0,12$
3697,15	H17	3	10,15	0,28	-6,67	$R_i=0,19$
3703,86	H16	3	10,15	0,40	-6,59	$R_i=0,22$
3705,00	He I	25	20,87	0,16	-5,34	
3711,97	H15	3	10,15	0,45	-6,50	$R_i=0,21$
3721,94	H14	3	10,15	0,48	-6,40	$R_i=0,20$
3734,37	H13	3	10,15	0,54	-6,30	$R_i=0,22$
3750,15	H12	2	10,15	0,73	-6,19	$R_i=0,22$
3770,63	H11	2	10,15	0,86	-6,07	$R_i=0,26$
3797,90	H10	2	10,15	0,60	-5,93	$R_i=0,26$
3806,56	Si III	5	21,63	0,17	-3,72	
3819,61	He I	} 22	20,87	0,60	-5,07	
3819,76	He I					
3835,37	H9	2	10,15	0,98	-5,78	
3871,82	He I	60	21,13	0,14	-6,42	
3888,65	He I	2	} 10,15	} 0,70		Бленд
3889,05	H8	2				
3911,96	O II	} 17	25,55	0,10	-4,33	
3912,09	O II					
3919,29	O II					
3920,68	C II	4	16,26	0,08	-4,67	
3926,53	He I	58	21,13	0,27	-6,06	
3933,66	Ca II	—	—	0,46	—	Межзвездный
3954,37	O II	6	} 10,15	} 0,19		Бленд
3955,85	N II	6				
3970,07	H ₂	1				
3973,26	O II	6	23,34	0,19	-5,39	Центральная глубина
3982,72	O II	6	23,34	0,10	-5,10	$R_c=0,34$
3995,00	N II	12	18,42	0,44	-4,10	
4009,27	He I	55	21,13	0,41	-5,82	
4026,36	He I	18	} 20,87	} 0,69	-4,77	
4026,19	He I	18				
4072,16	O II	10	25,54	0,24	-3,80	

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7
4075,87	O II	10	25,55	0,20	-3,63	
4078,86	O II	10	25,53	0,06	-4,63	
4088,86	Si IV	1	23,95	0,20	-4,20	
4092,94	O II	10	25,55	0,14	-4,63	
4101,74	H _β	1	10,15	0,98	-5,14	R _i =0,32
4104,74	O II	20	25,73	0,11	-4,09	
4110,80	O II	20	25,73	0,14	-4,45	
4116,10	Si IV	1	23,95	0,17	-4,30	
4119,22	O II	20	25,73	0,15	-3,88	
4120,90	He I	16	20,87	} 0,27		Бленд
4121,48	O II	19	25,72			
4132,81	O II	19	25,72	0,07	-4,40	
4143,76	He I	53	21,13	0,23	-5,57	
4153,30	O II	19	25,76	0,11	-4,28	
4168,97	He I	52	21,13	} 0,13		Бленд
4169,23	O II	19	25,74			
4267,1	C II	6	17,97	0,15	-3,50	
4336,86	O II	2	22,88	0,10	-5,08	
4340,47	H _γ	1	10,15	0,86	-4,81	R _i =0,29
4345,56	O II	2	22,88	0,13	-4,60	
4347,42	O II	16	25,55	0,05	-4,34	
4349,43	O II	2	22,90	0,53	-4,20	
4366,90	O II	2	22,90	0,27	-4,55	
4387,93	He I	51	21,13	0,52	-5,25	
4414,91	O II	5	23,34	0,23	-4,02	
4416,98	O II	5	23,32	0,20	-4,30	
4447,03	N II	15	20,32	0,16	-4,15	
4448,21	O II	35	28,24	0,08	-4,07	
4452,38	O II	5	23,34	0,07	-5,10	
4471,6	He I	14	20,87	0,78	-4,31	
4481,33	Mg II	4	8,83	0,38	-3,35	
4552,65	Si III	2	18,92	0,85	-4,04	
4567,87	Si III	2	18,92	0,62	-4,25	
4574,78	Si III	2	18,92	0,36	-4,72	
4590,97	O II	15	25,55	0,43	-3,85	
4596,17	O II	15	25,55	0,12	-4,01	
4607,15	N II	5	18,38	0,12	-4,80	
4630,54	N II	5	18,40	0,62	-4,14	
4641,81	O II	1	22,88	} 0,35		Бленд
4643,09	N II	5	18,40			
4661,64	O II	1	22,88	0,14	-4,45	
4676,23	O II	1	22,90	0,18	-4,62	
4713,14	} He I	12	20,87	0,24	-5,31	
4713,37						

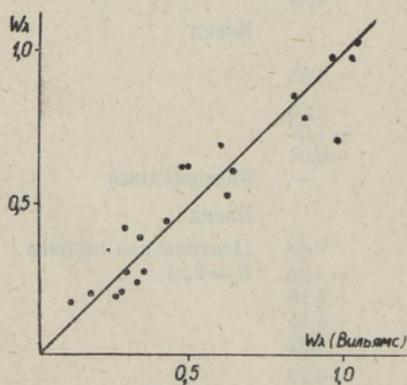


Рис. 1.

Кроме эквивалентных ширин, в табл. 1 приведены и прочие данные, необходимые в дальнейших вычислениях: в графе 4 — потенциал возбуждения нижнего уровня и в графе 6 — сила осциллятора в виде $\log gf\lambda$. Силы осцилляторов заимствованы из [4-5]. В качестве окончательного значения какого-либо f использовалось среднее из значений, приведенных в этих источниках. Полученные эквивалентные ширины сравнивались с данными Вильямса [2] (см. рис. 1). Как видно из рисунка, в результатах систематических различий не отмечается.

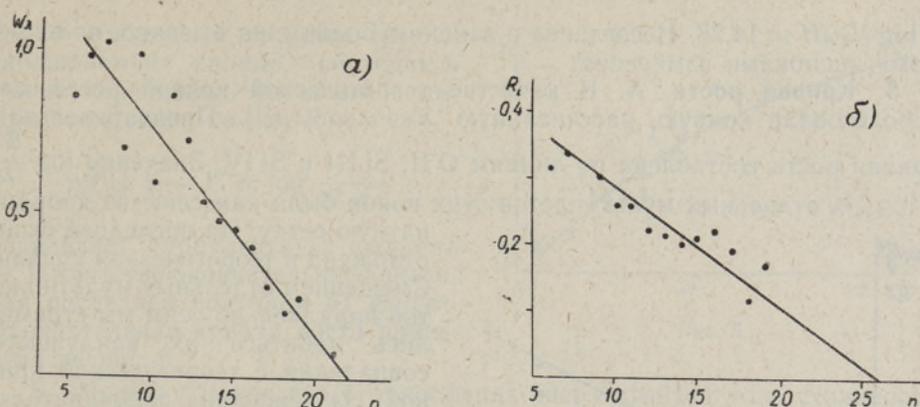


Рис. 2.

2. Анализ спектра водорода. А. Для нахождения электронной концентрации N_e использовалась формула Инглиса—Теллера:

$$\log N_e = 23,26 - 7,5 \log n_m, \quad (1)$$

где n_m обозначает номер последней наблюдаемой бальмеровской линии. Величина n_m определялась графически. В данном случае употреблялись эквивалентные ширины W_λ и остаточные интенсивности $R_i(n)$. На график (рис. 2) наносились W_λ (или R_i) против n , где n — номер соответствующей бальмеровской линии. Путем экстраполяции получаемой кривой до $W_\lambda = 0$ (или $R_i = 0$) определялись n_m . По ним получали $n_m = 22$ (по W_λ) и $n_m = 26$ (по R_i). Соответствующие значения $\log N_e$ по (1) 13,21 и 12,68. В дальнейшем использовалось среднее значение $\log N_e = 12,95$.

Б. Число водородных атомов над 1 см^2 фотосферы $N_{02}H$ определено с помощью формулы Унзольда:

$$W_\lambda = \frac{\pi e^2 \lambda^2}{m c^2} f N_{02} H. \quad (2)$$

По этой формуле вычислили формальные значения $N_{02}H'$ для каждой водородной линии и графически получили по максимуму кривой $\log N_{02}H = 15,58$ (рис. 3, кривая а). Чтобы избежать ошибки, которая возникает вследствие наложения крыльев линий высших членов бальмеровской серии, мы прибавили к найденному значению поправку $+0,16$ [9]. Окончательное значение $\log N_{02}H = 15,74$. Другой способ исправления $N_{02}H$ состоит в следующем [10]: каждое полученное по

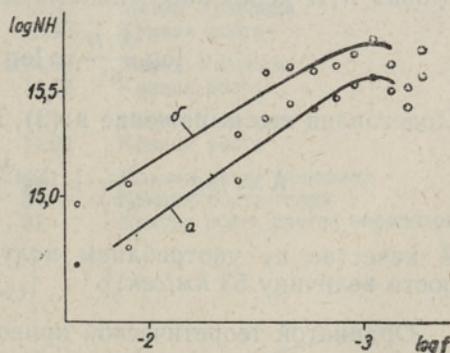


Рис. 3.

(2) значение $N_{02}H$ умножается на $\frac{R_c}{R_c - R_n/2}$, где R_c — максимальная глубина линии в спектре и R_n — глубина данной линии. Построенная этим методом кривая б (рис. 3) дает $\log N_{02}H = 15,74$.

2. Спектр гелия. Число атомов гелия над 1 см^2 фотосферы получено таким же способом, как и у водорода. Найдено, что $\log N_{2p}H = 14,48$

и $\log N_{2^p}H = 14,28$. Несогласие с законом Больцмана вызвано, по-видимому, ошибками измерения.

3. Кривая роста. А. В качестве теоретической кривой роста мы использовали кривую, рассчитанную Унзольдом [11]. Предварительная кривая роста составлена по линиям O II, Si III и Si IV. Значения $\log \frac{W_\lambda}{\lambda}$ и $\log g f \lambda$ отдельных мультиплетов этих ионов были нанесены на координатную сетку. На последней была отложена и теоретическая кривая. Смещением отдельных мультиплетов параллельно осям мы стремились добиться их наилучшего совпадения с теоретической кривой. На основании предварительной кривой были получены населенности различных уровней этих ионов. Предполагая, что имеет место закон Больцмана, можно написать:

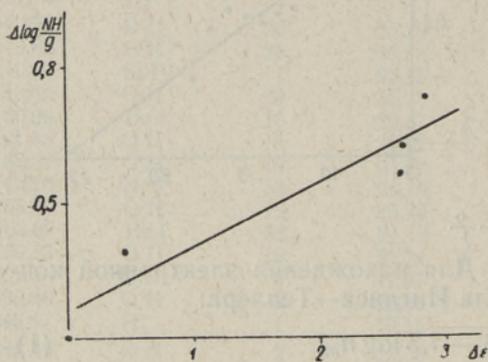


Рис. 4.

$$\log \frac{N_i H}{g_i} = \log \frac{N_k H}{g_k} - \Theta_\varepsilon \Delta \varepsilon_{ik},$$

где параметр $\Theta_\varepsilon = \frac{5040}{T_\varepsilon}$ содержит температуру возбуждения. Θ_ε найдена графически (рис. 4). Для численного значения T_ε мы получили $22\,000^\circ \text{K}$.

Окончательная кривая роста построена следующим образом. Абсцисса теоретической кривой Унзольда дается формулой

$$X = \log \frac{N_i H f \lambda}{2\pi R_c v_T}. \quad (3)$$

Для определенного атома или иона это выражение можно преобразовать так: с помощью формулы Больцмана выражаем населенность i -го уровня $N_i H$ через населенности основного уровня $N_0 H$:

$$\log \frac{N_i H}{g_i} = \log \frac{N_0 H}{g_0} - \Theta_\varepsilon \varepsilon_i.$$

Подставляя это выражение в (3), получаем

$$X = \log \frac{1}{2\pi R_c v_T} + \log \frac{N_0 H}{g_0} + \log g_i f \lambda - \Theta_\varepsilon \varepsilon_i.$$

В качестве v_T употребляем полученную по предварительной кривой роста величину 53 км/сек .

Ординатой теоретической кривой является

$$Y = \log \frac{c}{2R_c v_T} + \log \frac{W_\lambda}{\lambda}.$$

Окончательную наблюдаемую кривую роста построим в координатах

$$X' = \log g_i f \lambda - \Theta_\varepsilon \varepsilon_i,$$

$$Y' = \log \frac{W_\lambda}{\lambda}.$$

Чтобы совместить теоретическую и наблюдаемую кривые, последнюю нужно перемещать по обем осям. При этом сдвиг по оси Y

$$\Delta Y = Y - Y' = \log \frac{c}{2R_c v_T}$$

определяет турбулентную скорость v_T . В качестве окончательного значения последней получаем 51 км/сек. Окончательная кривая роста приведена на рис. 5.

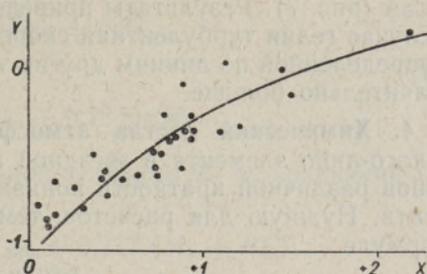


Рис. 5.

Б. Можно думать, что в атмосферах сверхгигантов роль столкновений в процессе расширения спектральных линий значительно меньше, чем в атмосферах звезд главной последовательности (см., например, [6]). Учитывая это, мы построили кривые роста для водорода и гелия (рис. 6). Для сравнения по данным [12] построены такие же кривые и для

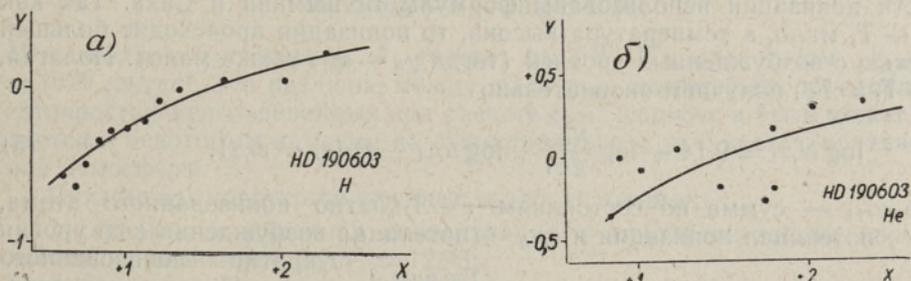


Рис. 6.

Таблица 2

Элемент	Определяемая величина	HD 190603	\propto Cas	Метод определения
H	$\log N_{02} H$	15,74	15,50	Метод Унзоляда
		15,66	15,40	Кривая роста
He	$\log N_{2^1 P} H$	14,48	14,50	Метод Унзоляда
		14,64	14,37	Кривая роста
He	$\log N_{2^3 P} H$	14,28	14,74	Метод Унзоляда
		14,86	14,90	Кривая роста
	v_T	112	103	Кривая роста водорода
		37	34	Кривая роста гелия
		51	31	Кривая роста других элементов

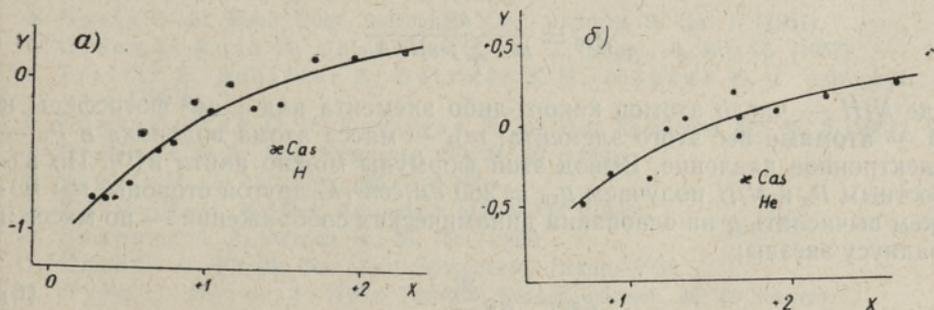


Рис. 7.

и Cas (рис. 7). Результаты приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, в случае гелия турбулентная скорость сравнительно хорошо согласуется с определенной по линиям других элементов, но по линиям водорода она значительно больше.

4. Химический состав атмосферы. При определении содержания какого-либо элемента в звездной атмосфере следует учитывать вклады ионов различной кратности ионизации в общее число атомов этого элемента. Нужную для расчетов температуру ионизации определяем по формуле

$$T_i = \frac{3360 (\chi - \varepsilon_k + \varepsilon_j)}{\frac{2}{3} \log \frac{N_k}{N_e N_j} \frac{g_j}{g_k} + 10,43 + \log T_i}, \quad (4)$$

взятой из работы А. Боярчука [7]. Здесь χ — потенциал ионизации; ε_j и ε_k — потенциалы возбуждения уровней j и k в электрон-вольтах. Величины $\frac{N_k}{g_k}$ и $\frac{N_j}{g_j}$ получаем по кривой роста. По линиям ионов Si III и Si IV получена температура $T_i = 20\,000^\circ \text{K}$. Для учета ионов различной кратности ионизации использованы формулы Больцмана и Саха. Так как $T_e - T_i$ мало, а температура высока, то ионизация происходит большей частью с возбужденных уровней (тогда $\chi_k - \varepsilon_{n,i}$ также мало). Полагая, что $T_i = T_e$, получаем окончательно

$$\log N_{r+1} = 9,14 + \log \frac{N_{r,i}}{g_{r,i}} + \log u_{r+1} - \Theta_i (\chi_r - \varepsilon_{r,k}), \quad (5)$$

где u_{r+1} — сумма по состояниям $r+1$ -кратно ионизованного атома, χ_r — потенциал ионизации и $\varepsilon_{r,k}$ — потенциал возбуждения k -го уровня

Таблица 3

Элемент	HD 190603	[13]	[14]
H	12,00	12,00	12,00
He	11,11	11,20	11,34
C	7,86	8,30	8,30
N	8,54	8,18	8,54
O	8,76	8,77	8,76
Mg	8,08	7,94	7,93
Si	7,89	7,45	7,69

r -кратно ионизованного атома. Полученные относительные числа атомов в атмосфере звезды приведены в табл. 3. Для сравнения там же приведен и средний химический состав звезд класса В по данным [13] и [14]. Содержания элементов нормированы так, что логарифмы содержания водорода равны 12,00.

5. Ускорение силы тяжести может быть вычислено, с одной стороны, по спектроскопическим данным. Для этого употребляем формулу

$$g_{\text{сп}} = \frac{4P_e}{m_H \sum_i N_i H \cdot A_i},$$

где $N_i H$ — число атомов какого-либо элемента над 1 см^2 фотосферы и A — атомный вес этого элемента; m_H — масса атома водорода и P_e — электронное давление. Вывод этой формулы можно найти в [15]. По известным P_e и $N_i H$ получаем $g_{\text{сп}} = 280 \text{ см/сек}^2$. С другой стороны, мы можем вычислить g на основании динамических соображений — по массе и радиусу звезды:

$$g_{\text{дин}} = g_\odot \frac{M_*}{R_*^2}. \quad (6)$$

Кроме того, используем соотношения, заимствованные из [16] и [17]:

$$\begin{aligned} \log R_* &= -0,2 M_{\text{бол}} - 2 \log T_{\text{эфф}} + 8,47, \\ \log L_* &= 1,90 - 0,4 M_{\text{бол}}, \\ \log L_* &= -0,13 + 2,79 \log \mathfrak{M}_* + 0,28 \log R_*. \end{aligned} \quad (7)$$

После перехода к абсолютной визуальной величине M_v из уравнений (6) и (7) получаем

$$\log g_{\text{дин}} = -12,67 + 4,2 \log T_{\text{эфф}} + 0,277 (M_v + BC). \quad (8)$$

Здесь BC — болометрическая поправка. Величина M_v определена по видимому блеску и эквивалентной ширине межзвездной линии Ca II λ 3933 в спектре звезды. Расстояние r определяется формулой

$$r = 2,66 W_\lambda (3933),$$

где r — в килопарсеках и $W_\lambda (3933)$ — в ангстремах [18]. Абсолютная величина

$$M_v = m_v + 5 - 5 \log r + A_r.$$

Межзвездное поглощение A учтено по [19]. Из (8) имеем $g_{\text{дин}} = 1070 \text{ см/сек}^2$. Это различие между $g_{\text{сп}}$ и $g_{\text{дин}}$ может быть обусловлено неточностью использованных при расчете $g_{\text{дин}}$ формул, а быть может является и некоторым намеком на существование у этой звезды протяженной атмосферы.

Суммируем коротко полученные в работе данные:

- 1) средняя электронная концентрация в атмосфере звезды определяется соотношением $\log N_e = 12,95$;
- 2) в атмосфере температура ионизации $T_i = 20\,000^\circ \text{ К}$ и температура возбуждения $T_e = 22\,000^\circ \text{ К}$;
- 3) найдено содержание элементов H, He, C, N, O, Mg, Si в атмосфере (см. табл. 3);
- 4) турбулентная скорость $v_T = 51 \text{ км/сек}$;
- 5) гравитационное ускорение по спектроскопическим данным $g_{\text{сп}} = 280 \text{ см/сек}^2$, по грубым динамическим вычислениям 1070 см/сек^2 .

В заключение автор выражает благодарность Л. Лууду за предоставление спектрофотометрического материала и руководство работой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Merrill P. W., Burwell C., Ap. J., 73, 87 (1933).
2. Williams E. G., Ap. J., 83, 279 (1936).
3. Beals C. S., Publ. Dom. Astrophys. Obs. Victoria, 9, No. 1 (1951).
4. Green L., Rush P., Chaudler C., Ap. J., Suppl., 3, No. 26 (1957).
5. Treffitz E., Schlüter A., Dettmar K.-H., Jörgens K., Z. Astrophys., 44, 1 (1957).
6. Голландский О. П., Копылов И. М., Изв. Крымской АО, 28, 3 (1962).
7. Боярчук А. А., Изв. Крымской АО, 21, 65 (1959).
8. Scholz M., Z. Astrophys., 65, 1 (1967).
9. Копылов И. М., Изв. Крымской АО, 35, 11 (1966).
10. Боярчук А. А., Астрон. ж., 36, 766 (1959).
11. Unsöld A., Physik der Sternatmosphären, Berlin, 1938.
12. Лууд Л., Нугис Т., Публ. Тартуск. Астрон. обсерв., 36 (в печати).

13. Аллер Л., Распространенность химических элементов, М., 1963.
14. Лууд Л., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 16, 319 (1967).
15. Voigt H.-H., Z. Astrophys., 31, 48 (1952).
16. Мартынов Д. Я., Курс общей астрофизики, М., 1965.
17. Паренаго П. П., Масевич А. Г., Тр. ГАИШ, 20, 81 (1951).
18. Зонн В., Рудницкий К., Звездная астрономия, М., 1959.
19. Шаров А. С., Астрон. ж., 40, 900 (1963).

Институт физики и астрономии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
27/III 1968

C. IBRUS

HD 190603 SPEKTROFOTOMETRILINE UURIMINE

Töös määratakse P Cygni tüüpi tähe HD 190603 atmosfääri mõned parameetrid, kasutades kolme spektrogrammi dispersioonidega 15 ja 36 Å/mm. Analüüsiks kasutatakse kasvukõvera meetodit. Määratakse ionisatsiooni- ja ergutustemperatuurid ning elektronide tihedus ($T_i = 20\,000^\circ\text{K}$, $T_e = 22\,000^\circ\text{K}$, $\log N_e = 12,95$). Leitakse, et elementide suhteline sisaldus atmosfääris on ligikaudu samasugune nagu B tähtedel.

C. IBRUS

SPECTROPHOTOMETRIC STUDY OF HD 190603

Some atmospheric parameters of a P Cyg-type star HD 190603 are determined on the basis of 3 spectrograms obtained with dispersions of 15 and 36 Å/mm. For an analysis, the curve-of-growth method is used. The ionisation and excitation temperatures and the electron density are estimated ($T_i = 20\,000^\circ\text{K}$, $T_e = 22\,000^\circ\text{K}$, $\log N_e = 12.95$). It is found that the relative abundances of elements are nearly the same as in B stars.