

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗВЕЗДЫ MWC 84

Я. Н. ЧХИКВАДЗЕ

Поступила 21 мая 1969

На основе спектрограмм, полученных на 70-см менниковом телескопе Абастуманской астрофизической обсерватории, проведена идентификация, определены относительные интенсивности эмиссионных линий и значения интенсивностей в непрерывном спектре звезды MWC 84. Показано, что условие прозрачности оболочки для излучения бальмеровских линий приблизительно выполняется. Замечено усиление эмиссионных линий синглетной серии нейтрального гелия относительно триплетных, выраженное резче, чем в газовых туманностях. Оценено расстояние до звезд, величина поглощения и светимость, оказавшиеся порядка 1 клс, $1^{m.5}$ и $+0^{m.5}$, соответственно. Определено, что звезда имеет спектральный класс O8 ($T = 40\,000^\circ\text{K}$). В звезде имеется аномально высокое содержание гелия.

Звезда MWC 84 (MW 143, $\alpha_{1900} = 4^h 11^m 6$, $\delta_{1900} = +55^\circ 46'$, $V = 11^{m.6}$) в каталоге [1] значится как Вер. Впервые ее исследовал в 1932—33 гг. Меррил [2, 3], обнаруживший при этом в спектре звезды эмиссионные линии водорода и нейтрального гелия. Средняя по многим линиям лучевая скорость оказалась равной -46 км/сек. Наблюдаемое распределение энергии в непрерывном спектре было определено как соответствующее спектральному классу A—B.

В 1940 г. Свингс и Струве [4] обнаружили в MWC 84 также и эмиссионные линии Fe II. Лучевая скорость оставалась той же, что и в 1933 г. Отмечалось отсутствие каких-либо линий поглощения. В 1964 г. И. Ф. Алания [5] отметил усиление дублета ($\text{H}_\alpha + \text{He I}$) около $\lambda 3888 \text{ \AA}$ по сравнению с 1933 г.

Исследования вышеназванных авторов заключались в идентификации разных линий, измерений их сдвигов и глазомерной оценки интенсивностей. Нами предпринято количественное исследование интенсивностей эмиссионных линий и непрерывного спектра.

1. *Наблюдения.* Наблюдательный материал был получен на 70 см менисковом телескопе Абастуманской астрофизической обсерватории, снабженном 8-градусной предобъективной призмой (дисперсия 166 А/мм около H_γ). Данные о спектрограммах приведены в табл. 1. Калибровка спектрограмм производилась на лабораторном спектрографе ИСП-51, регистрация — на МФ-4 как в почернениях, так и непосредственно в интенсивностях. Методика обработки, которой мы пользовались, изложена в работе А. А. Боярчука [6].

Таблица 1

№№ пласт.	Д а т а	Сорт пласт.	Экспозиция в минутах
3857	13—14.1.1964	Kodak OaO	15
3908	4—5.II.1964	"	"
3920	9—10.II.1964	"	"
3996	10—11.II.1964	"	"
4454	2—3.XII.1964	ORWO P 22	60
4455	"	"	"
4476	4—5.XII.1964	Agfa Astro	"
4497	6—7.XII.1964	Agfa iSS	90
4537	22—23.1.1965	Agfa Astro	40
6687	27.XII.1967	Kodak OaO	60

2. *Общая характеристика спектра.* В период наблюдений звезда MWC 84 характеризовалась эмиссионным спектром. Примечателен тот факт, что в течение этого времени в спектре не отмечалось какое-либо качественное изменение. Линии излучения принадлежат водороду, нейтральному гелию и ионизированному железу Fe II. Водородные линии наблюдаются от H_α до H_γ .

Гелий представлен линиями триплетных и синглетных серий:

$$2^3S - n^3P^o; 2^3P^o - n^3S, 2^3P^o - n^3D, 2^1S - n^1P^o \text{ и } 2^1P - n^1D.$$

Линии $2^1P - n^1S$ серии не замечены. Триплетные линии гораздо сильнее синглетных. Линии He II не обнаружены. Наиболее интенсивные линии Fe II принадлежат 27, 28, 37 и 38 мультиплетам. Наличие запрещенных линий Fe II сомнительно. В табл. 2 даны относительные интенсивности линий $I: I_{H_\beta}$ ($I_{H_\beta} = 10$) и эквивалентные ширины некоторых из них. Было определено также распределение энергии в непрерывном спектре. На рис. 1 (а) представлен наблюдаемый континуум MWC 84. Как величины интенсивностей линий, так и распределение энергии в

континууме приведены как средние по всем спектрограммам. Характерной чертой непрерывного спектра представляется низкая спектрофотометрическая температура.

Таблица 2

λ (Å)	Элемент; Номер мультплета	$\lg \frac{I \cdot 10}{I_{H\beta}}$	W (Å)	λ (Å)	Элемент; Номер мультплета	$\lg \frac{I \cdot 10}{I_{H\beta}}$	W (Å)
5876	He I	0.75	93	4471	He I	0.51	10.6
5015	He I	0.50		4417	Fe II 27	-0.20	
4922	He I	0.27		4383	He I	0.01	
4861	H _{α}	1.00	53	4340	H _{γ}	0.65	13.4
4713	He I	0.37	9.3	4296	Fe II 28	-0.18:	
4666	Fe II 37	-0.07		4274	Fe II 27	-0.15:	
4629	Fe II 37	-0.02		4233	Fe II 27	-0.15:	
4620	Fe II 37 38	-0.05		4178	Fe II 28	-0.03	
4583	Fe II 37 38	-0.20		4144	He I	-0.08	
4555	Fe II 37 38	-0.01		4120	He I	0.02	
4523	Fe II 38	-0.15:		4102	H _{δ}	0.36	4.9
4515	Fe II 37	-0.10		4026	He I	0.32	4.0
4520	Fe II 37	-0.10:		3970	H _{α} + He I	0.36	
4491	Fe II 37	0.00:		3888	H _{β} + He I	1.05	
				3835	H _{γ}	-0.10	
				3819	He I	-0.12:	

Примечание: двоеточиями (:) отмечены неуверенные значения.

3. *Межзвездное поглощение.* Прежде чем приступить к обсуждению полученных результатов, необходимо оценить влияние межзвездного поглощения. Звезда MWC 84 ($l'' = 150^\circ$, $b'' = +10^\circ$) находится в направлении антицентра Галактики. Следовательно, расстояние до нее не может быть больше 5 клс. Максимальное значение межзвездного поглощения A_v в направлении на эту звезду приблизительно 3^m [7, 8]. Судя по общему виду спектра, можно считать, что звезда довольно горячая—спектрального класса не позднее, чем B0. Так как ее видимая величина $V = 11^m.5$, то при максимальных значениях $r = 5$ клс и $A_v = 3$ получаем $M_v < -5^m$, следовательно, можно считать, что звезда MWC 84 не лежит выше главной последовательности. Поэтому при дальнейших расчетах будут привлечены некоторые данные, характеризующие звезды главной последовательности.

По данным Хильтнера [7], для звезд главной последовательности в окрестности MWC 84 была построена зависимость величины межзвездного поглощения A_v от $m - M$ (рис. 2).

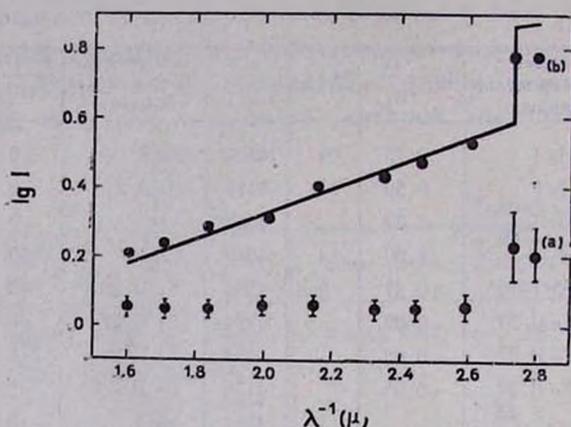


Рис. 1. Распределение энергии в непрерывном спектре MWC 84. Точками обозначен наблюдаемый континуум без учета (а) и с учетом (в) межзвездного поглощения. Сплошная линия представляет теоретическое распределение энергии в спектре системы: горячая звезда ($T = 40\,000^\circ\text{K}$), водородный и гелиевый газ ($T_e = 20\,000^\circ\text{K}$).

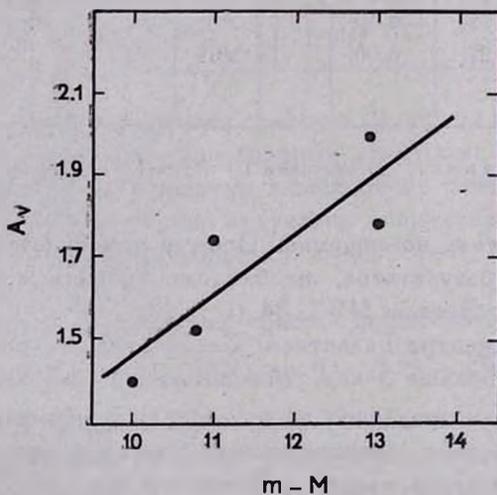


Рис. 2

По значению максимального расстояния, принятого выше, из рис. 2 получаем, что $A_v = 2^m 3$. Но если полагать, что MWC 84 имеет абсолютное значение, равное значению для звезды главной по-

следовательности спектрального класса B0, то для величины поглощения получается $1^m 95$.

Для уточнения расстояния и величины поглощения воспользуемся известным соотношением между эквивалентной шириной межзвездной линии поглощения Ca II λ 3934 Å и расстоянием [9]:

$$W = 10^{-4} \cdot 3.76 \cdot r, \quad (1)$$

где W — эквивалентная ширина в ангстремах и r — расстояние в парсеках.

Как было отмечено, ранние исследователи [2—4] вообще не обнаружили в спектре MWC 84 линий поглощения (при дисперсии использованных спектрограмм 50 Å/мм). Отсутствие или слабость линий поглощения линии K Ca II говорит о сравнительной близости этого объекта к Солнцу. Если глубина линии межзвездного кальция не превышает флюктуацию зерна фотопластики на наших регистрограммах, то максимальное значение эквивалентной ширины линии K Ca II оценивается как 0.3—0.4 Å.

По формуле (1) соответствующее расстояние равно 1 клс. А по рис. 2 значение межзвездного поглощения для $r = 1$ клс равно $1^m 5$, что совпадает со значением, принятым в настоящее время в качестве среднего поглощения на 1 клс при $b \leq 10^\circ$. Для дальнейших расчетов примем, что $A_v = 1^m 5$.

4. *Определение спектрального класса (температуры) центральной звезды.* Предположим, что MWC 84 представляет собой горячую звезду, окруженную оболочкой. Как установлено ниже, условие прозрачности газового облака хорошо выполняется для бальмеровских линий водорода. Так что можно считать, что облако прозрачно для излучения водорода в субординатных сериях и для непрерывного излучения.

Пусть $E_i(T_e)$ — энергия излучения газовой оболочкой в H_i линии:

$$E_i(T_e) = 4\pi V_n \varepsilon_i(T_e), \quad (2)$$

где V_n — объем водородного газа, $\varepsilon_i(T_e)$ — объемный коэффициент излучения в линии H_i .

Если W_i — эквивалентная ширина линии поглощения центральной звезды и $B_i(T)$ — интенсивность излучения в континууме, R — радиус звезды, то количество энергии, неизлученной звездой в H_i линии, равно

$$E_i^*(T) = 4\pi^2 R^2 B_i(T) W_i. \quad (3)$$

При выполнении условия

$$E_i(T_e) > E_i^*(T) \quad (4)$$

линия H_i будет наблюдаться в эмиссии и

$$E_i(T_e) - E_i^*(T) = E_i \text{ (эм. набл.)}, \quad (5)$$

где E_i (эм. набл.) интенсивность наблюдаемой эмиссионной линии H_i .

Если с какого-то j -го номера в серии не наблюдаются ни эмиссия, ни поглощение, то можно допустить

$$E_j(T_e) = E_j^*(T). \quad (6)$$

В спектре MWC 84 линия H_{10} не видна в эмиссии, и будем считать, что для нее выполняется условие (6):

$$E_{10}(T_e) = E_{10}^*(T). \quad (7)$$

Условие (4) запишем для линии H_9 (H_9):

$$E_9 \text{ (эм. набл.)} = 4\pi V_n \varepsilon_9(T_e) - 4\pi^2 R^2 B_{4102}(T) W_9 \quad (8)$$

При принятой модели значение континуума для $\lambda 4102$ будет

$$E_{4102} \text{ (конт.)} = 4\pi V_n \varepsilon_{4102} \text{ (Н. конт.)} + 4\pi^2 R^2 B_{4102}(T). \quad (9)$$

где ε_{4102} (Н. конт.) объемный коэффициент излучения водородного газа в непрерывном спектре в интервале 1 \AA . С помощью формул (7), (8), (9) после некоторых преобразований можно получить следующее соотношение:

$$W_9 \text{ (эм. набл.)} = \frac{\varepsilon_9(T_e)}{\varepsilon_{10}(T_e)} \cdot \frac{B_{3799}(T)}{B_{4102}(T)} \cdot W_{10} - W_9 - \frac{\varepsilon_9(T_e)}{\varepsilon_{10}(T_e)} \cdot \frac{B_{3799}(T)}{B_{4102}(T)} \cdot \frac{\varepsilon_{4102} \text{ (Н. конт.)}}{\varepsilon_9(T_e)} \cdot W_{10} W_9 \text{ (эм. набл.)}, \quad (10)$$

где W_9 (эм. набл.) — наблюдаемая эквивалентная ширина эмиссионной линии H_9 ; W_9 и W_{10} — эквивалентные ширины линий поглощения звезды:

$\frac{\varepsilon_9(T_e)}{\varepsilon_{10}(T_e)}$ — очень слабо зависит от T_e . $\frac{B_{3799}(T)}{B_{4102}(T)}$ для широкого интервала температур, от $50\,000^\circ \text{K}$ до $30\,000^\circ \text{K}$, изменяется незначительно: от 1,28 до 1,21. $\frac{\varepsilon_{4102} \text{ (Н. конт.)}}{\varepsilon_9(T_e)}$ для широкого интервала T_e и

N_e имеет порядок 10^{-3} и, отбросив третий член в правой части соотношения (10), получаем:

$$W_9 \text{ (эм. набл.)} = \frac{\varepsilon_9(T_e)}{\varepsilon_{10}(T_e)} \cdot \frac{B_{3799}(T)}{B_{4102}(T)} \cdot W_{10} - W_9. \quad (11)$$

Используя данные об эквивалентных ширинах линий поглощения для звезд главной последовательности из работ А. А. Боярчука и И. М. Копылова [10, 11], мы построили график зависимостей W_6 от S_p и W_{10} от S_p (рис. 3).

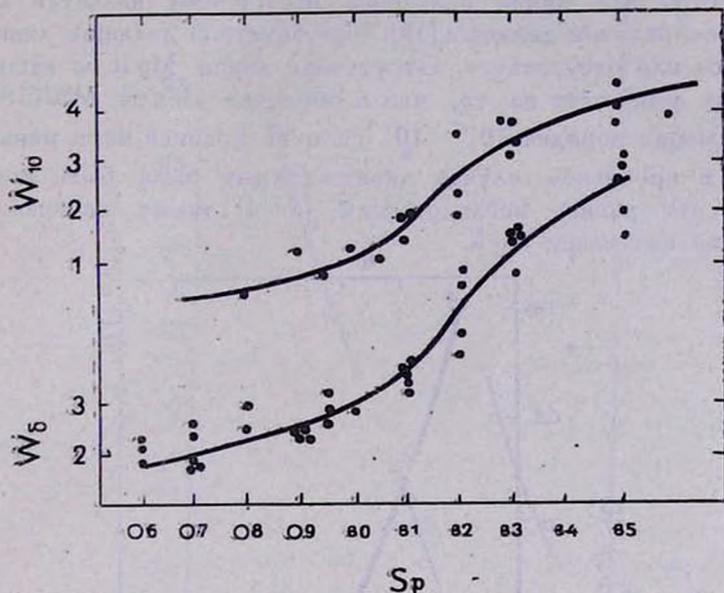


Рис. 3.

Подбирая величины W_6 и W_{10} так, чтобы они удовлетворяли соотношению (11), мы нашли, что звезда имеет спектральный класс О8.5. При разбросе наблюдаемых значений W_6 (эм. набл.) спектральный класс определяется с точностью ± 2 подкласса (О6:В0). Будем считать, что центральная звезда имеет спектральный класс приблизительно О8, чему соответствует температура порядка 40000°K .

5. Характеристика газовой оболочки. На рис. 4 приведено сравнение наблюдаемого бальмеровского декремента с теоретическим, вычисленным для случая В и $T = 20\,000^\circ\text{K}$ [12]. Как видим, сочетание хорошее. Внесение поправки за межзвездное поглощение общей картины не меняет. Поэтому можно предполагать, что линии бальмеровской серии водорода практически не отягощены самопоглощением.

На рис. 5 дано сравнение относительных интенсивностей линии He I с теоретическими для случая В и $T = 20\,000^\circ\text{K}$ [12]. Для He I замечателен тот факт, что наблюдается заметное усиление линий серий $2^3P - n^3S$ ($\lambda.4713$ и т. д.) и $2^1P - n^1D$ ($\lambda.4922$ и т. д.) по сравнению с линиями $2^3P - n^3D$ ($\lambda.5876$ и т. д.). Наличие такой аномалии объяс-

няется большой оптической толщиной газовой среды для излучения наблюдаемых линий He I и, возможно, переходами, обусловленными электронными ударами [13].

Известно, что линия излучения Mg II λ .4481 является хорошим индикатором наличия дилуции [14]. При заметной дилуции линия Mg II очень слаба или отсутствует. Отсутствие линии Mg II на наших спектрограммах указывает на то, что в оболочке звезды MWC 84 существует дилуция порядка 10^{-2} — 10^{-3} , или по крайней мере меньше, чем 10^{-1} , ибо в противном случае линия должна была быть видна [14]. Заметим, что ранние исследователи [2—4] также замечали отсутствие линий излучения Mg II.

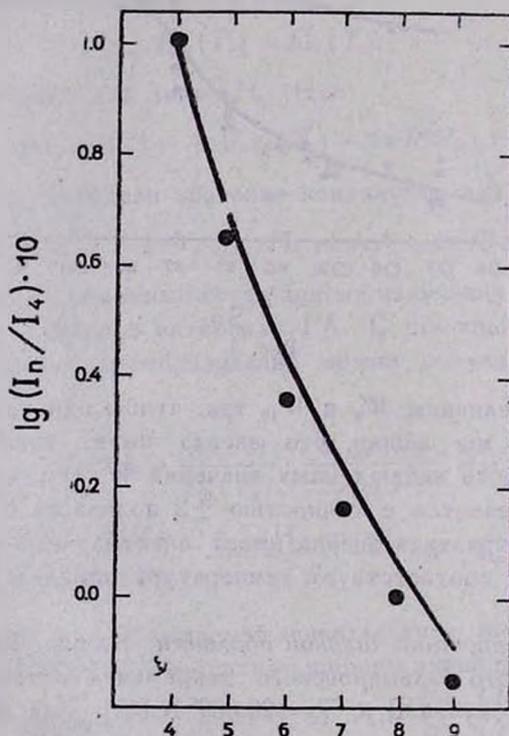


Рис. 4. Бальмеровский декремент. Сплошная линия соответствует теоретическим значениям интенсивности линий для $T_e = 20\,000^\circ \text{K}$ случая В.

Определение отношения числа ионов гелия к водороду по интенсивности линий конечно будет включать в себя ошибки, возникающие из-за неучета самопоглощения в линиях. Однако для их уменьшения были использованы также и возможно высокие члены серий водорода и гелия. Результаты расчетов для $T_e = 20\,000^\circ \text{K}$, $A_v = 0$ и $A_v = 1.5$

даны в табл. 3. Аналогичные расчеты для $T_e = 10\,000^\circ\text{K}$ дали чуть-большие значения отношения гелия к водороду.

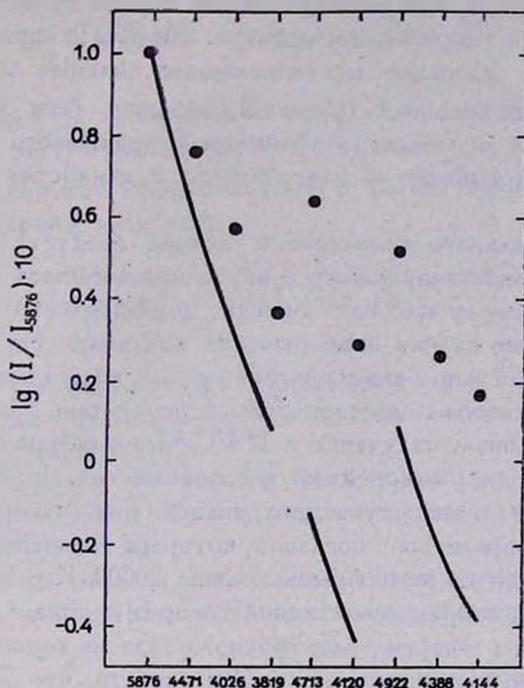


Рис. 5. Относительные интенсивности линий нейтрального гелия. Сплошная линия соответствует теоретическим значениям относительных интенсивностей линий.

Таблица 3

Использован- ные линии	$N(\text{He}^+) : N_p$		
	$A_v=0$	$A_v = 1^{m,5}$	в планет. тум.
He I 4026	1.10	1.15	
H β 4102			
He I 4471	1.09	0.80	0.20
H β 3888 :			
He I 5876	0.44	0.36	
H α 4861			

Судя по табл. 3, в MWC 84 имеется аномально высокое содержание гелия.

6. *Непрерывный спектр.* Будем исходить из модели для MWC 84: центральная горячая звезда, окутанная водородной оболочкой. Рассмотрим, как удастся при помощи такой модели представить распределение энергии в непрерывном спектре. Наряду с линиями H в спектре наблюдаются довольно многочисленные сильные линии излучения He I, при этом отношение $N(\text{He}^+) : N_p$ больше, чем в планетарных туманностях, где основным источником непрерывного излучения является водород (особенно в планетарных туманностях с низким возбуждением).

Но из аномального химического состава следует, что в MWC 84 основным источником непрерывного излучения мог быть He I. В пользу такого соображения у нас нет точных доказательств — в спектре не видны характерные скачки непрерывного излучения He I около 6640 и 3680 Å, в то время как бальмеровский скачок непрерывного излучения водорода определяется с достаточной уверенностью. Поэтому мы примем, что непрерывное излучение в MWC 84 создается тремя источниками: горячая звезда, водородный и гелиевый газ.

Примем, что температура центральной звезды порядка 40 000° K. Существуют соображения, согласно которым температура электронного газа оболочки не может быть больше 20000° K [15], а отсутствие в спектре звезды запрещенных линий говорит о том, что электронная плотность велика и энергия электронного газа не теряется на возбуждение этих линий; следовательно, будем считать, что T_e оболочки порядка 20000° K.

Распределение энергии в непрерывном излучении водородного газа заимствовано из работы А. А. Бяярчука и Р. Е. Гершберга [16].

Распределение энергии в непрерывном спектре нейтрального гелия вычислено автором. Следуя методике расчетов коэффициента непрерывного поглощения [17], был вычислен объемный коэффициент излучения He I, в котором не учитывались свободно-свободные переходы и рекомбинации на уровнях с главным квантовым числом больше 3.

Считая, что интенсивность наблюдаемого континуума можно представить непрерывным излучением трех источников, напишем:

$$E_\lambda(\text{набл.}) = 4\pi V_H \varepsilon_\lambda(\text{H, конт.}) + 4\pi V_{\text{He}} \varepsilon_\lambda(\text{He}^+, \text{конт.}) + \\ + 4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 B_\lambda(T), \quad (12)$$

где V_H и V_{He} — объемы светящегося водорода и He I, $\varepsilon(\text{H, конт.})$ и $\varepsilon_\lambda(\text{He}^+, \text{конт.})$ — объемные коэффициенты излучения водорода и He I,

R — радиус звезды, а $B_\lambda(T)$ — функция Планка. Соотношение (12) перепишем следующим образом:

$$E_\lambda(\text{набл.}) = 4\pi V_H \varepsilon_0(T_e) E_\lambda(H) + 4\pi V_{He} \varepsilon_{5876}(T_e) E_\lambda(He^+) + 4\pi^2 R^2 B_\lambda(T), \quad (13)$$

где $\varepsilon_0(T_e)$ и $\varepsilon_{5876}(T_e)$ — объемные коэффициенты излучения в линиях водорода H_α и $He I \lambda 5876 \text{ \AA}$. $4\pi V_H \varepsilon_0(T_e)$, $4\pi V_{He} \varepsilon_{5876}(T_e)$ и $4\pi^2 R^2$ являются весами каждого составляющего, с точностью постоянного множителя, в суммарном излучении.

$$E_\lambda(H) = \frac{\varepsilon_\lambda(H, \text{конт.})}{\varepsilon_0(T_e)} \quad \text{и} \quad E_\lambda(He^+) = \frac{\varepsilon_\lambda(He, \text{конт.})}{\varepsilon_{5876}(T_e)}.$$

Решением системы из трех уравнений типа (13), написанных для разных длин волны, относительно весов, определяется теоретическое распределение в континууме.

Расчеты показали, что наблюдаемый континуум, исправленный за межзвездное поглощение, можно хорошо представить теоретическим распределением (рис. 1 б).

При принятой модели наблюдаемый континуум, неисправленный за поглощение, сопоставить с теоретическим не представляется возможным.

Из соотношения весов $\frac{4\pi V_H \varepsilon_0(T_e)}{4\pi^2 R^2}$ можно определить величину $N_e^{02} R$, где N_e^0 — электронная плотность оболочки около границы со звездой (При этом предполагается, что распределение плотности вещества в оболочке обратно пропорционально квадрату расстояния от центра звезды). $N_e^{02} R$ оказалась равной $6.4 \times 10^{+37}$. Если принять, что $R = R_\odot$, то получаем, что $N_e^0 = 3.1 \times 10^{13}$. Выше мы использовали условие (7), откуда также можно определить, что $N_e^{02} R = 1.28 \times 10^{+31}$ и $N_e^0 = 0.43 \times 10^{+13}$.

Резюмируя, приведем основные выводы о звезде MWC 84. Установлено, что наблюдаемые особенности хорошо объясняются, если примем, что MWC 84 является горячей звездой ($T = 40\,000^\circ \text{K}$, Sp 08), окутанной мощной водородной и гелиевой оболочкой. При принятых выше значениях $r = 1 \text{ кпс}$, $A_v = 1^m 5$ получаем, что $M_v \approx +0.5$. Звезда характеризуется аномально высоким содержанием гелия.

В заключение выражаю глубокую благодарность А. А. Боярчуку за ценные советы и обсуждение результатов.

A SPECTROPHOTOMETRIC INVESTIGATION OF MWC 84 STAR

I. N. CHKHIKVADZE

The lines in the spectrum of the MWC 84 star obtained at the Abastumani Astrophysical Observatory have been identified and the relative intensities of the emission lines and energy distribution in the continuous spectrum have been established; the dispersion being 166 \AA/mm at H_γ . The observed Balmer decrement differs but little from the one calculated for a gaseous nebula. As compared to the triplets the singlets of HeI are stronger than those of gaseous nebulae. The temperature of the star has been estimated to be $40\,000^\circ \text{K}$. It has been found that the distance to the star is of the order of 1 kpc ; $A_v = 1^m.5$, $M_v \approx +0^m.5$ and $N(\text{He}^+):N_p$ ratio is greater than in gaseous nebulae.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. P. W. Merrill, C. G. Burwell, *Ap. J.*, 78, № 1, 87, 1933.
2. P. W. Merrill, *Ap. J.*, 75, 413, 1932.
3. P. W. Merrill, *Ap. J.*, 77, 49, 1933.
4. P. Swings, O. Struve, *Ap. J.*, 91, 546, 1946.
5. И. Ф. Алания, *Астрон. цирк.*, 301, 1964.
6. А. А. Боярчук, *Известия КрАО*, 30, 25, 1963.
7. W. Hiltner, *Ap. J. Suppl ser.*, 2, 24, 1956.
8. А. С. Шаров, *Астрон. ж.*, 40, 1963.
9. В. Зонн, Рудницкий, *Звездная астрономия*, 1959.
10. И. М. Копылов, *Известия КрАО*, 20, 123, 1958.
11. А. А. Боярчук, *Известия КрАО*, 17, 89, 1957.
12. M. J. Seaton, *M. N.*, 120, 326, 1962.
13. А. А. Боярчук, *Известия КрАО*, 38, 155, 1968.
14. O. Struve, *Ap. J.*, 95, 81, 1942.
15. D. G. Huter, *M. N.*, 125, 461, 1963.
16. А. А. Боярчук, Р. Е. Гершберг, И. И. Проник, *Известия КрАО*, 29, 291, 1963.
17. И. Б. Левинсон, А. А. Никитин, „Руководство по теоретическому вычислению интенсивностей линий в атомных спектрах“, 1962