

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ГОРЯЧИХ ЗВЕЗД В ОБЛАСТИ БАЛЬМЕРОВСКОГО СКАЧКА

С. А. Гуляев, О. Г. Патимова, В. В. Плешаков

Рассчитаны спектры звезд спектральных классов В—А в области бальмеровского скачка. В программе Куруча исправлены предельные значения главных квантовых чисел уровней, переходы с которых формируют бальмеровский скачок в спектре звезды. Построены зависимости «бальмеровских индексов» от параметров звездных атмосфер, необходимые для нового метода спектральной классификации горячих звезд — метода «бальмеровских индексов».

The spectra of B and A stars in the spectral region near the Balmer jump are computed. New limiting main quantum numbers are used for calculation with Kurucz program. «Balmer indices» as a function of the star atmospheres' parameters are calculated. They can be used in the «Balmer indices» method — the new method of spectral classification of hot stars.

В работе [1] предложен метод спектральной классификации горячих звезд — метод «бальмеровских индексов». Этот метод основан на анализе вида спектра звезды в области бальмеровского скачка. Комбинации потоков в трех точках узкой области спектра ($\lambda = 368 \div 387$ нм), названные в [1] бальмеровскими индексами, обладают различной чувствительностью к изменению эффективной температуры T и ускорения силы тяжести на поверхности звезды g . Преимущество метода бальмеровских индексов перед другими методами определения T и g заключается в том, что он свободен от влияния межзвездного поглощения света (узкий спектральный интервал) и нечувствителен к различиям химического состава звезд (поглощение света в атмосферах горячих звезд в области бальмеровского скачка определяется водородными механизмами).

В методе фигурируют потоки на длинах волн $\lambda = 368.7$, 381.2 и 386.2 нм, выбор которых в спектрах горячих звезд обусловлен отсутствием на этих λ линий поглощения. В то же время охваченный спектральный участок включает в себя практически весь бальмеровский скачок.

В [1] для бальмеровских индексов

$$\begin{aligned} K &= \frac{H_{381.2} + H_{368.7}}{H_{386.2}}; & L &= \frac{H_{381.2} - H_{368.7}}{H_{381.2} + H_{368.7}}; \\ M &= \frac{H_{386.2} - H_{368.7}}{H_{386.2} + H_{368.7}}; & N &= \frac{H_{368.2} - H_{381.2}}{H_{368.7}} \end{aligned} \quad (1)$$

где H_λ — поток на данной λ , были построены зависимости каждого индекса от T и g . При этом использовались расчеты спектров звезд [2]. Для 73 звезд спектральных классов В и А были определены T и $\lg g$. Сравнение с результатами применения других методов спектральной классификации показало следующее: метод бальмеровских индексов дает систематическое завышение T в среднем на 1000 К и занижение $\lg g$ в среднем на 0.5 по сравнению с теми же параметрами, определенными в [3].

Это расхождение, по-видимому, связано с приближенным характером расчета области бальмеровского скачка в использованной программе Куруча [4, 5], а именно с неправильным учетом числа линий бальмеровской серии. Для последней учитываемой линии в программе Куруча используется критерий Инглиса—Теллера

$$n_u = 1100N_i^{-2/15}, \quad (2)$$

где N_i — концентрация ионов в плазме; n_u — главное квантовое число верхнего уровня последней линии, различимой на спектре вблизи предела данной серии.

Однако критерий Инглиса—Теллера — это лишь спектральный критерий, не дающий представления о номере последнего связанного состояния в атоме n_{lim} . Использование критерия Инглиса—Теллера для определения n_{lim} — довольно распространенная ошибка. В [6], например, критерий Инглиса—Теллера неправомерно используется при решении задачи об электронном спектре невырожденной плазмы в зависимости от ее плотности.

В данной работе с последовательных позиций проведена оценка n_{lim} в плазме. С новым n_{lim} рассчитаны спектры В—А-звезд в области бальмеровского скачка, заново определены значения бальмеровских индексов и построены их зависимости от T и $\lg g$.

Определение n_{lim} . Критерий Инглиса—Теллера, введенный в [7] по аналогии с критерием Релея, позволяет найти ту линию спектральной серии (образованную переходом $n_u \rightarrow n'$, $n_u \gg n'$), у которой квазистатическая ширина равна расстоянию до следующей линии данной серии. Таким образом, линии

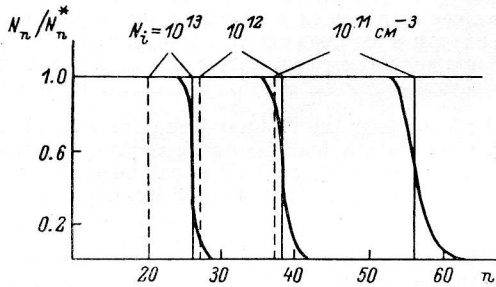


Рис. 1. Населенность N_n атомных уровней с учетом диффузии электронов со штарковских подуровней. N_n^* — населенность без учета этого эффекта.

Вертикальные линии соответствуют n_{lim} по формуле (5), вертикальные штриховые линии — n_u по критерию Инглиса—Теллера (2). Расчет проведен для значений $N_i = 10^{11}$, 10^{12} и 10^{13} м^{-3} .

с $n > n_u$ сливаются и становятся неразличимыми в спектре. В [1, 8] было отмечено, что линии с $n > n_u$ в действительности формируются в атмосферах звезд и, образуя бленду, влияют на вид спектра вблизи предела серии. Поэтому при расчете спектров звезд эти линии должны быть корректно учтены. Вопрос о последней линии в серии переходит в задачу об определении последнего (самого высокого) связанного состояния атома в плазме. Эта задача неоднократно рассматривалась многими авторами и в основном со сходных позиций: внутриплазменное электрическое микрополе эффективно снижает потенциал ионизации атома, в результате чего реализуются не все его энергетические состояния.

При расчетах звездных спектров мы пользовались оценкой n_{lim} , полученной из следующих простых соображений. Нетрудно показать, что при расстоянии r_0 от ядра атома до возмущающего иона снижение потенциального барьера происходит на величину $\Delta E = 3e^2/r_0$. Далее, следуя [9], используем для оценки r_0 распределение ближайшего соседа, откуда

$$\Delta E = 3e^2 (4\pi N_i/3)^{1/3} \Gamma(2/3) \quad (3)$$

(здесь исправлена опечатка, допущенная в [9]). Приравнявая (3) потенциалу ионизации с уровня n $\chi_n = \chi_1/n^2$, получим

$$n_{lim}^2 = \frac{\chi_1}{3e^2 (4\pi/3)^{1/3} \Gamma(2/3)} N_i^{-1/3}, \quad (4)$$

где χ_1 — потенциал ионизации с основного состояния атома водорода. Отсюда

$$n_{lim} = 3800 N_i^{-1/6}. \quad (5)$$

Как показано в [10], учет туннельного эффекта снижает n_{lim} на единицу. Там же была предпринята попытка, следуя [11], учесть влияние электронных соударений. Однако, применяя критерий квазистатичности [12], можно показать, что при $n \geq 10$ и интересующих нас $N_i \approx 10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, характерных для атмосфер В—А-звезд, ударное приближение неприменимо ни для электронов, ни, тем более, для ионов.

В проведенном выше рассмотрении не учтен тот факт, что в электрическом поле ионов наряду со снижением потенциала ионизации возникает штарковское

расщепление атомных уровней. На больших n величина расщепления может превосходить расстояние между уровнями. В результате часть штарковских

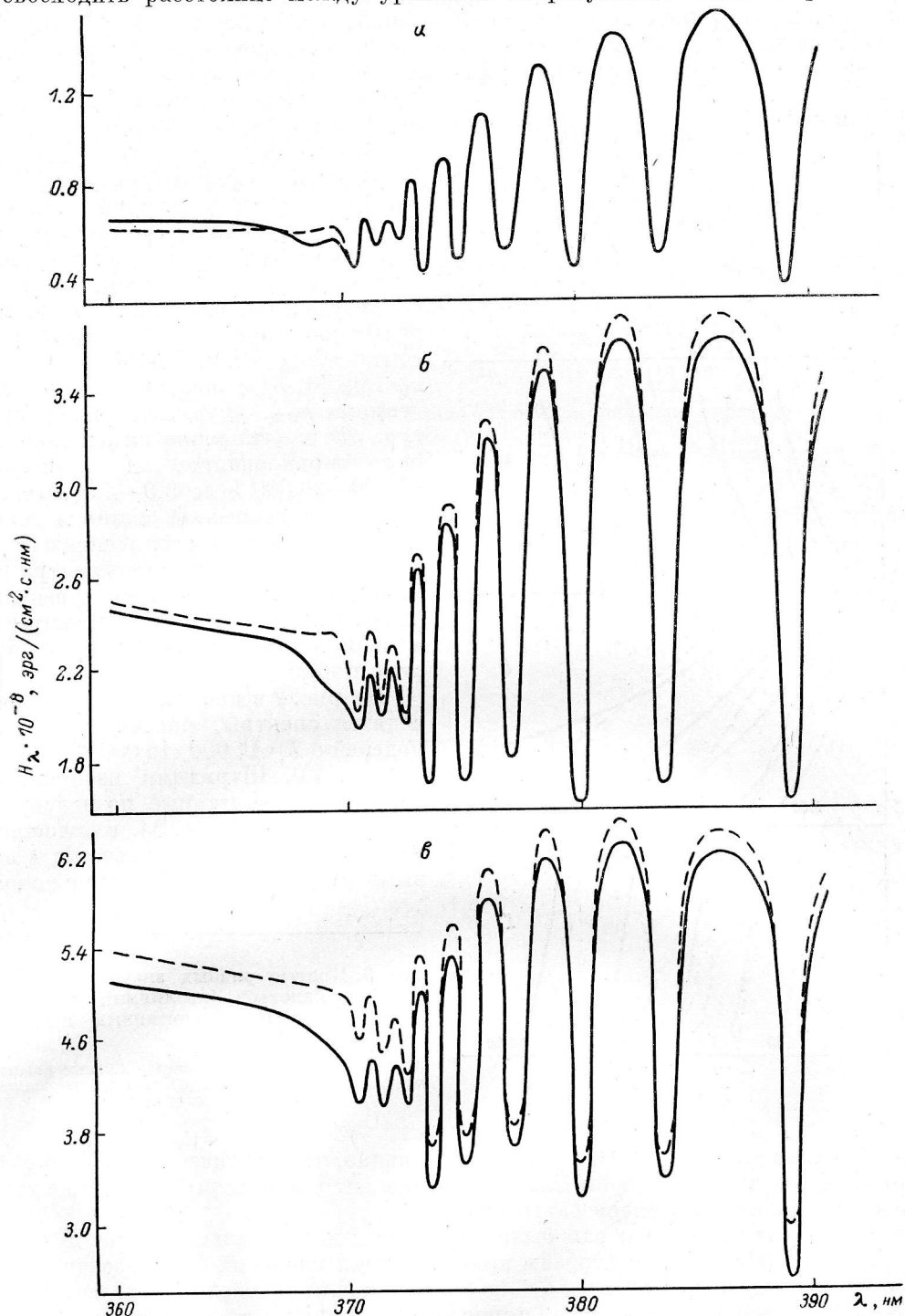
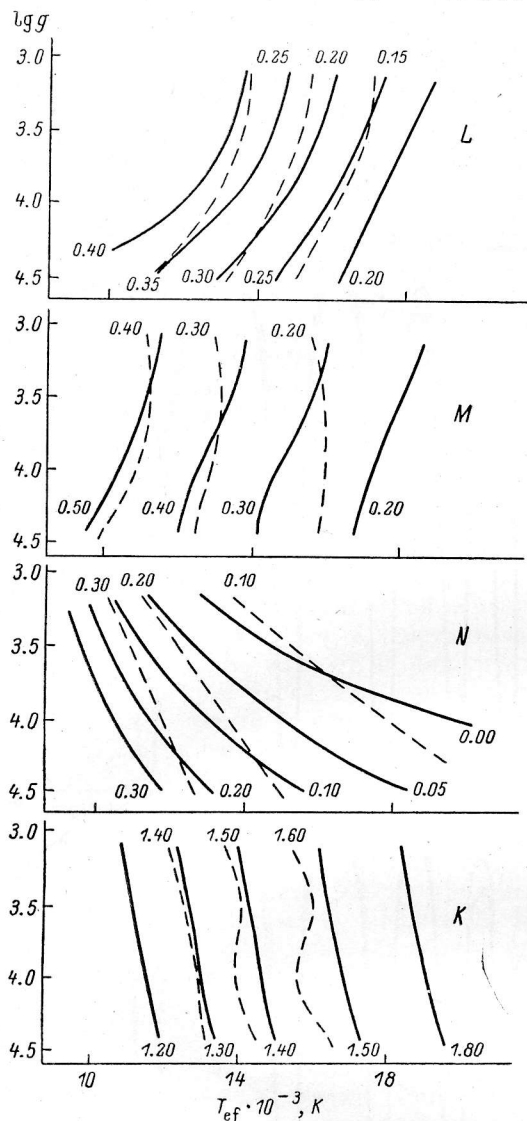


Рис. 2. Рассчитанные спектры звезд в области бальмеровского скачка.

Штриховая линия — спектры, рассчитанные по программе [4, 5]. Сплошная линия — результаты расчетов с новыми n_{lim} . T, K : а — $11 \cdot 10^3$, б — $16 \cdot 10^3$, в — $20 \cdot 10^3$.

подуровней уровня n_{lim} (и соседних $n \approx n_{lim}$) оказывается выше потенциального барьера, что приводит к диффузии электронов с этих подуровней в континуум. Данный эффект может быть выражен как уменьшение населенности уровней с $n \approx n_{lim}$.

На рис. 1 представлены результаты расчета населенностей уровней N_n с учетом этого эффекта. В качестве среднего электрического поля F было принято нормальное поле Хольцмарка $F_0 = 2.62 N_i^{2/3}$. Усреднения по распределению Хольцмарка не проводилось. Как видно из этого рисунка, при указанных плотностях описанный эффект диффузии оказывается существенным сразу



для нескольких уровней с $n \approx n_{lim}$ (до десятка при $N_i = 10^{11} \text{ см}^{-3}$).

В следующем разделе приведены результаты расчетов спектров В—А звезд вблизи предела серии Бальмера и соответствующих им бальмеровских индексов, выполненных по программе Куруча [4, 5] с исправленными n_{lim} .

Результаты расчетов. Сетка моделей звездных атмосфер была рассчитана на ЭВМ ЕС-1060 по программе [4, 5] с исправленными значениями n_{lim} . Эффективная температура T и ускорение силы тяжести $lg g$ варьировались в диапазоне 10 000—20 000 К и 3.0—4.5 соответственно. Химический состав моделей принимался равным солнечному (в [1] было показано, что вид спектра горячих звезд в области бальмеровского скачка практически нечувствителен к вариациям химического состава атмосфер).

На рис. 2 в качестве примера приводятся спектры, рассчитанные для моделей с $T = 11\ 000, 16\ 000, 20\ 000$ К и $lg g = 4.0$. Штрихами изображены спектры, рассчитанные по неисправленной программе [4, 5], а сплошной линией — результаты расчетов с новыми n_{lim} . Спектры рассчитаны с ша-

Рис. 3. Кривые равных значений бальмеровских индексов (изолинии), построенные по спектрам, рассчитанным в данной работе.

Штриховые линии — изолинии бальмеровских индексов, вычисленные в [1] по опубликованным потокам [2].

гом по длине волны $\Delta\lambda = 0.5$ нм. Из рис. 2 видно, что увеличение числа линий, учитываемых в пределе серии Бальмера, приводит к заметному изменению вида спектра в области бальмеровского скачка.

По рассчитанным спектрам были определены новые бальмеровские индексы L, M, N, K . На рис. 3 построены кривые равных значений бальмеровских индексов (изолинии) в плоскости $T - lg g$. Там же для сравнения приведены изолинии бальмеровских индексов, вычисленных в [1] по опубликованным потокам [2]. Как видно из рис. 3, изменение n_{lim} в программе привело к заметному изменению положения изолиний бальмеровских индексов на плоскости $T - lg g$.

Результаты данной работы могут быть использованы для определения физических характеристик горячих ($T = 10\ 000 \div 20\ 000$ К) звезд по виду их спектра в области бальмеровского скачка. Заметим, однако, что для более холодных звезд ($T \leq 9000$) методом бальмеровских индексов следует пользоваться осто-

рожно, поскольку при понижении температуры бальмеровские индексы ведут себя как сложные неоднозначные функции T .

Авторы благодарны В. Е. Панчуку за полезные обсуждения статьи и И. М. Копылову за внимание к работе.

Литература

1. Гуляев С. А., Панчук В. Е., Плешаков В. В., Пяткес С. Г. Определение физических параметров В- и А-звезд по участку спектра вблизи бальмеровского скачка // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1986. 22. С. 3—12.
2. K u g u c z R. L. Model atmospheres for G, F, A, B and O stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1979. 40. P. 1—340.
3. К о п ы л о в И. М. Электронные плотности в атмосферах горячих звезд // *Изв. КРАО.* 1961. 26. С. 232—286.
4. K u g u c z R. L. ATLAS: A computer program for calculating model stellar atmospheres // *Smithsonian Astrophys. Observ. Special Report.* 1970. N 309. P. 1—289.
5. K u g u c z R. L. *Comm. of London Observ.* 1975. N 75—76.
6. К а к л ю г и н А. С., Н о р м а н Г. Э. Электронный спектр невырожденной плазмы в зависимости от ее плотности // *ТВТ.* 1984. 22, № 6. С. 1041—1047.
7. I n g l i s D. R., T e l l e r E. Ionic depression of series limits in one-electron spectra // *Astrophys. J.* 1939. 90. P. 439—448.
8. Гуляев С. А., Ш о л и н Г. В. Квазистатическое уширение спектральных линий водорода в плазме // *Астрон. журн.* 1986. 63. С. 50—61.
9. К о л е с о в А. К. О непрерывных спектрах белых карликов // *Астрон. журн.* 1964. 41. С. 240—250.
10. И в а н о в - Х о л о д н ы й Г. С., Н и к о л ь с к и й Г. М., Гуляев С. А. Ионизация и возбуждение водорода. Элементарные процессы для верхних уровней // *Астрон. журн.* 1960. 37. С. 799—811.
11. S u g i t a M. On the theory of temperature ionisation of gas // *Proc. Phys.-Math. Soc. Japan.* 1934. 162. P. 254—275.
12. Г р и м Г. Уширение спектральных линий в плазме. М.: Мир, 1978. 419 с.

Поступила в Редакцию
27 февраля 1986 г.