

УДК 523.942+524.31—355

## Температурные эффекты при интерпретации зависимости «сила линий красных триплетов O I — светимость звезды»

Н. Г. Щукина

Обсуждаются температурные эффекты, которые необходимо принимать во внимание при интерпретации с точки зрения не-ЛТР теории образования линий зависимости «сила линий красного триплетта нейтрального кислорода 777.2—777.5 нм — светимость звезды». На примере солнечной атмосферы показано, что при учете отклонения от ЛТР эквивалентные ширины линий триплетта отличаются повышенной (по сравнению с ЛТР) чувствительностью к распределению температуры в области их формирования.

*TEMPERATURE EFFECTS WHEN INTERPRETATING LUMINOSITY DEPENDENCE OF OXYGEN RED TRIPLET STRENGTHS FOR STARS, by Shchukina N. G.*— Some temperature effects are considered which should be taken into account under the non-LTE consideration of dependence of the «strengths of neutral oxygen red triplet 777.2—777.5 nm — the luminosity of the star». The non-LTE equivalent widths of these lines are shown to be of higher sensitivity (as compared with the LTE-case) to temperature distribution in the region of their formation.

Известно, что наблюдения линий красного триплетта нейтрального кислорода 777.2—777.5 нм в спектрах звезд характеризуются интересными особенностями. Эквивалентная ширина линий триплетта 777.2—777.5 нм растет с увеличением: 1) светимости (для звезд спектральных классов A0—G0); 2) эффективной температуры (для звезд светимости II—V и спектральных классов F5—G5).

Зависимость силы линий красных триплетов от светимости звезды, обнаруженная благодаря работам Меррилла [7], Кинана и Хайлека [5], Парсонса [9], Осмера [8] и др., позволяет получить по образному выражению Кинана и Хайлека «один из самых поразительных критериев светимости». Этот критерий оказывается полезным при обнаружении сверхгигантов в спиральных рукавах Галактики и наиболее ярких звезд в соседних галактиках, а также для определения расстояния до них.

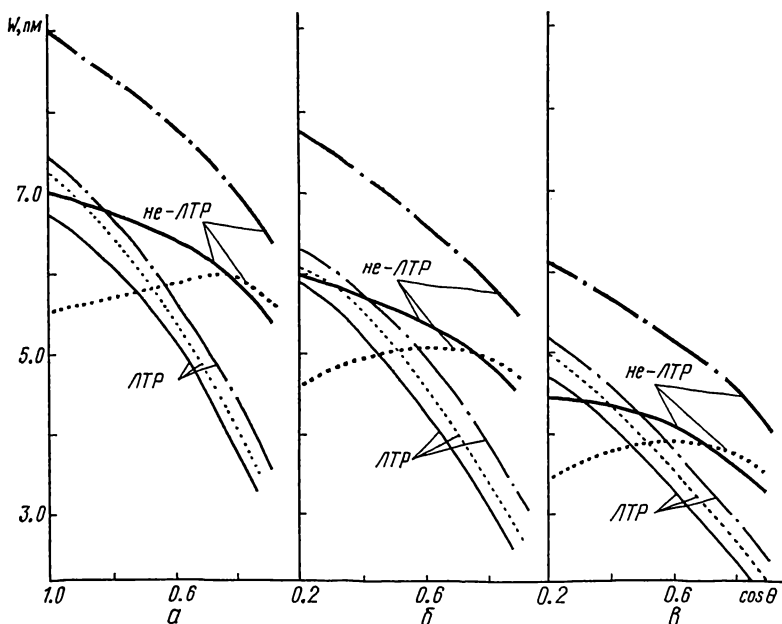
Попытки объяснить зависимость силы линий 777.2—777.5 нм от светимости звезды предпринимались в нескольких работах [4, 6]. В качестве одного из возможных объяснений этого эффекта было выдвинуто предположение об увеличении микротурбулентной скорости в атмосфере звезды с уменьшением плотности (сопровождающейся увеличением светимости). Однако такое предположение приводит к сверхзвуковой турбуленции.

Работы вышеупомянутых исследователей показали, что второй возможной причиной является усиление эффектов отклонения от ЛТР с ростом светимости (так как из-за падения плотности уменьшается ударное взаимодействие). Не-ЛТР эквивалентные ширины линий триплетта 777.2—777.5 нм оказываются больше равновесных и растут с увеличением светимости, но не настолько, чтобы полностью объяснить существующую зависимость.

В данной статье нам хотелось бы обратить внимание на одно обстоятельство, которое следует, по-видимому, принимать во внимание при интерпретации этой зависимости с точки зрения не-ЛТР теории образования линий. Указанным обстоятельством является эффект резкого усиления чувствительности эквивалентной ширины линий триплетта 777.2—777.5 нм к распределению температуры в области формирования этих линий, наблюдаемый при учете отклонения от ЛТР.

Этот эффект обнаружен нами в результате анализа неравновесного образования солнечных линий нейтрального кислорода [1]. Не-ЛТР ана-

лиз проводился путем линеаризации системы уравнений статистического равновесия, сохранения частиц и переноса излучения в линиях триплетной 130.2—130.6, 844.6, 1128.9 и квинтетной систем 135.5—135.8, 777.2—777.5, 926.6 нм О I. Поле излучения свободно-связанных континуумов О I и синглетных линий находилось из решения уравнений переноса в двухуровневом приближении. Модель атома включала тринадцать уровней: основной  $2p^4\ ^3P$ , два синглетных  $^1D$ ,  $^1S$ , по три уровня триплетной  $^3S^0$ ,



Изменение центр-край эквивалентной ширины линий триплета 777.1953 (а), 777.4176 (б), 777.5395 (в), нм: — — VAL80; - - - - HOLMU; . . . — HSRA

$^3P$ ,  $^3D^0$  и квинтетной  $^5S^0$ ,  $^5P$ ,  $^5D^0$  систем нейтрального кислорода; основной  $^4S_{3/2}$  и два возбужденных уровня  $^2D^0$ ,  $^2P^0$  однократно ионизованного кислорода; основное состояние О III. Более подробные сведения о методе анализа и используемых атомных параметрах приведены в [1].

Мы рассчитали зависимость центр-край эквивалентных ширин  $W_\lambda(\mu)$  линий  $\lambda$  777.19, 777.42, 777.54 нм для двух случаев: 1) линии образуются при условии локально-термодинамического равновесия; 2) условие ЛТР не выполняется.

Использовались модели атмосферы Солнца, которые в области формирования линий триплета ( $-0.14 \leq \lg m \leq +0.8$ ,  $m$  — масса столбика атмосферы сечением  $1 \text{ см}^2$  над данной высотой) отличаются по температуре не более чем на 100 К. Это модели — VAL80, [10], HSRA [2], HOLMU [3].

Результаты расчета  $W_\lambda(\mu)$  приведены на рисунке. Как следует из рисунка, при неравновесном образовании линий триплета 777.2—777.5 нм отличия в  $W_\lambda$ , связанные с температурными отличиями в моделях, наиболее сильны в центре диска. К краю они уменьшаются. Так, если  $[W_\lambda(\text{HOLMU}) - W_\lambda(\text{HSRA})] / W_\lambda(\text{HOLMU})$  для линии  $\lambda$  777.19 в центре диска  $\sim 40\%$ , то на краю  $\sim 10\%$ . Интервал изменения этой величины для других линий триплета (и других моделей) аналогичен. В итоге при неравновесном образовании линий триплета для набора моделей атмосферы Солнца мы имеем семейство кривых  $W_\lambda(\mu)$ , расходящихся от края к центру диска. При равновесном образовании кривые  $W_\lambda(\mu)$  идут параллельно друг другу и отличия между ними значительно меньше.

Следует ожидать, что эффект повышенной чувствительности не-ЛТР линий триплета 777.2—777.5 нм к температурной модели атмосферы может проявиться и у звезд. Для проверки этого обстоятельства мы рассчитали не-ЛТР профили потока данного триплета в спектре Солнца как звезды при двух распределениях температуры. В первом случае распределение соответствовало модели VAL80. Во втором — это распределение модифицировалось. Начиная с области температурного минимума вглубь в фотосферу значения температуры (по сравнению с моделью VAL80) постепенно понижались на величину от  $\Delta T = 0$  при  $\lg m = -1.33$  до  $\Delta T \approx 500$  К при  $\lg m = 0.6$ .

Оказалось, что в спектре Солнца как звезды не-ЛТР профили триплета 777.2—777.5 нм O I отличаются повышенной чувствительностью к фотосферному распределению температуры. Центральный остаточный поток излучения триплета в результате вышеописанного понижения температуры уменьшается на  $\sim 30\%$ , а эквивалентная ширина — более чем в 3 раза.

Таким образом, при интерпретации звездных наблюдений красного триплета кислорода с учетом отклонения от ЛТР следует особенно осторожно относиться к выбору распределения температуры в области его формирования. Погрешности в распределении температуры порядка нескольких сот градусов в указанной области могут привести к существенным вариациям потока излучения и эквивалентной ширины.

1. Щукина Н. Г. Неравновесное образование линий нейтрального кислорода в солнечной атмосфере. — Киев, 1984. — 31 с. — (Препринт / АН УССР, Ин-т теорет. физики; ИТФ-84-75Р).
2. Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny J. The Harvard-Smithsonian reference atmosphere. — *Solar Phys.*, 1971, 18, p. 347—365.
3. Holweger H., Müller E. A. The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen. — *Ibid.*, 1974, 39, p. 19—30.
4. Johnson H. R., Milkey R. W., Ramsey L. W. Formation of the luminosity-sensitive multiplet at 7774 Å. — *Astrophys. J.*, 1974, 187, p. 147—150.
5. Keenan P. C., Hylek J. A. Neutral oxygen in stellar atmospheres. — *Ibid.*, 1950, 111, p. 1—10.
6. Kodaira K., Tanaka K. Oxygen abundances of three population II horizontal branch stars. — *Publ. Astron. Soc. Jap.*, 1972, 24, p. 355—364.
7. Merrill P. W. Photography of the near infra-red region of stellar spectra. — *Astrophys. J.*, 1934, 79, p. 183—202.
8. Osmer P. S. The atmospheres of the F-type supergiants. I. Calibration of the luminosity-sensitive O I 7774 line. — *Ibid.*, 1972, 206, p. 247—253.
9. Parsons S. B. Near-infrared classification of A and F stars. — *Ibid.*, 1964, 140, p. 853—857.
10. Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun. — Cambridge, 1980. — 105 p. — (Prepr. Ser. / Harvard-Smithson. Center Astrophys.; N 1308).

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,  
Киев

Поступила в редакцию  
21.11.84