

УДК:524.31.01—355

## ЗАПРЕЩЕННЫЕ ЛИНИИ В СПЕКТРЕ Р Суг

Г. А. ИСРАЕЛЯН, М. де ГРУТ

Поступила 18 декабря 1990

Принята к печати 30 марта 1991

В работе обсуждается образование запрещенных линий [Fe II] прямоугольного профиля и линий [N II] с параболическим профилем, которые наблюдали Штаал и др. Мы показали, что линии [N II] образуются на расстояниях  $r > 100 R_*$ , а линии [Fe II] на  $r > 300 R_*$  от звезды, и оценили также физические параметры в звездном ветре Р Суг.

1. *Введение.* Сверхгигант Р Суг был открыт в 1600 г. Блао и был классифицирован как новая. Видимая звездная величина возросла до  $3^m$  и оставалась на этом уровне в течение шести лет. С тех пор  $m_v = 4.8$  [1], и происходят неправильные вариации блеска. Существование в спектре Р Суг эмиссионных линий с коротковолновыми абсорбционными компонентами дало основание допустить, что вокруг звезды имеется расширяющаяся газовая оболочка. Спектр Р Суг характеризуется как В1 Ia или В1 eq [2]. Абсолютная звездная величина Р Суг определена де Грутом [3] и Хачингсом [4]. Амбарцумян и др. [5], определив ультрафиолетовый избыток цвета, оценили расстояние от звезды  $d = 1.8 \pm 0.7$  кпк и показали, что покраснение звезды меньше, чем предполагалось. Согласно [6], у Р Суг  $T_{eff} = 1.93 \cdot 10^4 \pm 2000$  К,  $R = 76 \pm 14 R_\odot$ ,  $M = 30 \pm 10 M_\odot$  (если предположить, что звезда находится в стадии возгорания гелиевого ядра). Пионерские работы Струве [7], Билса [8] и других авторов показали, что истекающая из звезды материя ускоряется во всей наблюдаемой области, так как линии низкого возбуждения, которые, по всей вероятности, формируются на самых высоких уровнях, систематически имеют более высокие скорости истечения. При линейном законе изменения скорости с высотой, принятом ван Блеркомом [9], удалось согласовать вычисленные профили бальмеровских эмиссионных линий с их наблюдаемыми профилями.

Согласно Уайту и Беккеру [10], скорость потери массы у Р Суг порядка  $1.5 \cdot 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$ , что в 10 раз больше, чем у нормальных сверхгигантов класса В1. Скорость вещества на большом расстоянии от звезды  $\sim 206\text{—}300$  км/с, т. е. примерно в семь раз меньше, чем у сверхгигантов ранних спектральных классов. Имея в виду это различие, приходится допустить, что механизм, ответственный за истечение материи от Р Суг, совершенно отличен от механизмов, действующих у других звезд с потерей массы.

Кроме непрерывного истечения материи, от Р Суг отрываются еще и дискретные оболочки. Первый анализ этих оболочек был проведен де Грутом [3], который нашел три коротковолновых компонента у бальмеровских линий. Иногда линии водорода и гелия имеют до 6 компонентов, в то время как линии однократно ионизованных металлов показывают максимум два компонента. Возможное объяснение этого явления было дано Лаймерсом и др. [11]. Различия в ускорениях и количестве (для бальмеровских линий  $0.6 \text{ см/с}^2$ , для линий железа  $0.17 \text{ см/с}^2$ ) наблюдаемых оболочек обусловлены различием их масс. Так, менее массивные оболочки можно наблюдать только в бальмеровских линиях и в линиях гелия. Они ускоряются быстрее, чем более массивные оболочки, которые можно наблюдать также в линиях Fe II и др. Средняя частота отрыва оболочек равна 6 об/год, а масса оболочек порядка  $10^{-5} M_{\odot}$  [12].

2. *Связь между звездами типа Р Суг и S Dor.* По многим характеристикам Р Суг напоминает звезды типа S Dor. Эти звезды являются горячими сверхгигантами ранних классов, окруженными холодными ( $T = 8000\text{—}10000$  К°), плотными ( $N = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ), медленно расширяющимися ( $V = 100\text{—}200$  км/с) оболочками [13]. Скорость потери массы во время максимума блеска равна  $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$  и в 100 раз меньше во время минимума блеска. Изучению физических свойств звездного ветра и оболочек звезд типа S Dor посвящено много работ [13, 14, 17].

Согласно Лаймерсу [15], звезды типа Р Суг относятся к типу S Dor в спокойном состоянии. Основные спектроскопические особенности звезд типа Р Суг и S Dor можно объяснить, исходя из теории расширяющихся звездных атмосфер. Закон изменения скорости в звездном ветре S Dor очень похож на этот закон для Р Суг, определенный Уотерсом и Весселиусом [16] на основе распределения энергии в инфракрасном диапазоне спектра, а также ван Блеркомом по бальмеровским линиям.

Многие линии у звезд типа S Dor, как у Р Суг, имеют несколько коротковолновых компонентов. Например, быстрый ( $V = 260$  км/с) коротковолновый компонент в спектре звезды R 127 приписывается обо-

лочке, оторванной в ранних стадиях эволюции, когда звезда была похожа на Р Суг [13]. Но звезды типа S Dog и Суг имеют разные скорости потери массы и частоту отрыва оболочек.

3. *Запрещенные линии в спектре Р Суг.* Запрещенные линии ионизованного железа были найдены в спектрах многих звезд типа S Dog [17, 18]. Во время минимума блеска спектр характеризуется большим количеством линий [Fe II], в максимуме же блеска доминируют бальмеровские эмиссионные линии. Разрешенные линии Fe II имеют коротковолновые компоненты.

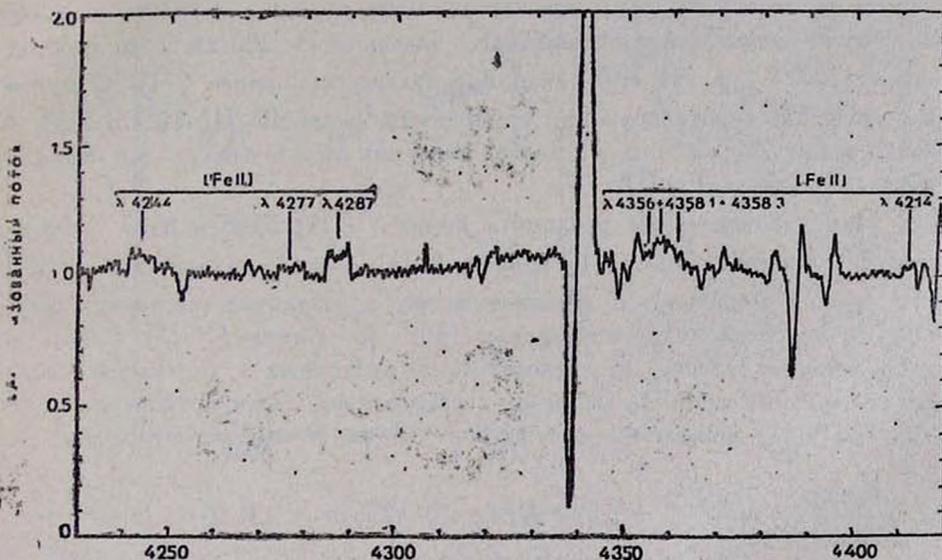


Рис. 1. Линии [Fe II] прямоугольного профиля.

Последние CCD-наблюдения Р Суг [19] показали существование запрещенных линий [Fe II] и [N II] 5755 Å. Анализируя спектр, нам удалось обнаружить еще и линии [Fe II] 4508, 4356, 4358, 5375, 5270, 5220 Å, [N II] 6548, 6583 Å. Все линии [Fe II] имеют прямоугольный профиль, а линии [N II] — параболический. Очевидно, что линии [Fe II] возникают в сферически-симметричном слое, расширяющемся с постоянной скоростью ~ 230 км/с. На рис. 1 показан спектр Р Суг в диапазоне 4200—4420 Å. Нам также удалось найти линии [Fe II] на спектрограммах, полученных М. де Грутом в 1942 г.

Согласно Виотти [20], отношение интенсивности линий [Fe II] 4244 А и Fe II 4233 А может служить для оценки температуры  $T$  и концентрации  $N$  в оболочке. Анализируя все возможные физические механизмы, приводящие к возникновению линий [Fe II], мы заключили, что эти линии возникают в звездном ветре на расстоянии  $r > 300 R_*$  ( $W < 10^{-5}$ ), с температурой  $T \sim 10^4$  и с концентрацией  $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Здесь  $R_*$  представляет собой радиус Р Суг. Очевидно, что на таком расстоянии от звезды для ионов [Fe II] имеет место небулярный режим. И тогда при  $W < 10^{-5}$ ,  $N \cdot T^{-\frac{1}{2}} \ll 10^7$ , где  $W$ —фактор дилуции, равный  $W = (R_*/r)^2$  при  $r \gg R_*$ . Это также следует из результатов недавней работы [25], согласно которой терминальная скорость в звездном ветре достигает максимального значения  $\sim 200 \text{ км/с}$  на расстоянии  $\sim 300 R_*$ , а не  $30 R_*$ , как предполагалось ранее [11]. Отметим, что смещение коротковолновых компонентов линий Fe III 5127 и 5153 А тоже равно  $230 \text{ км/с}$ , и, следовательно, они рождаются в той же оболочке, где линии [Fe II].

Нам удалось также различить линии [N II] 6548 и 6583 А, которые блендированы мощными крыльями H $\alpha$ . Как было показано в [21], эти крылья возникают в звездном ветре, в результате рассеяния фотонов на максвелловских электронах (рис. 2). Линии [N II] имеют параболический профиль и, следовательно, возникают в тех частях звездного ветра, где скорость меняется с расстоянием. Если предположим, что линии [N II] рождаются в одном и том же объеме, то отношение

$$\frac{I(6548) + I(6583)}{I(5755)} = 7.53 \exp(2.5 \cdot 10^4 / T) / (1 + 2.7 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot T^{-\frac{1}{2}})$$

может служить для определения  $N$ , если известно  $T$  [22]. Согласно модели Дрю [23], температура на расстоянии  $r \geq 100 R_*$  порядка  $T = 8000$ — $10000 \text{ К}$ . Это отношение в спектре Р Суг равно 1.125 и при  $T = 10^4 \text{ К}$  приводит к величине концентрации  $N = 3.2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ , что хорошо согласуется с результатами радионаблюдений [12]. Отметим, что полуширина линии 5755 А меньше  $180 \text{ км/с}$ , что тоже в свою очередь указывает на то, что линии [N II] образуются на  $r > 100 R_*$ . [25].

Таким образом, согласно нашей гипотезе, линии [N II] рождаются в объеме  $100 \cdot R_* < r < 300 \cdot R_*$ , где скорость меняется с расстоянием. Линии ионизованного железа возникают в оболочке на расстоянии  $r > 300 R_*$ , которая имеет скорость  $\sim 230 \text{ км/с}$ .

В заключение отметим, что линии [N II] были найдены в спектрах семи звезд ранних классов с эмиссионными линиями в Большом Магеллановом Облаке [24]. Было показано также, что существование линий [N II] в спектрах горячих звезд с эмиссионными линиями не есть что-то необычное, а является общей чертой этих звезд. С этой точки

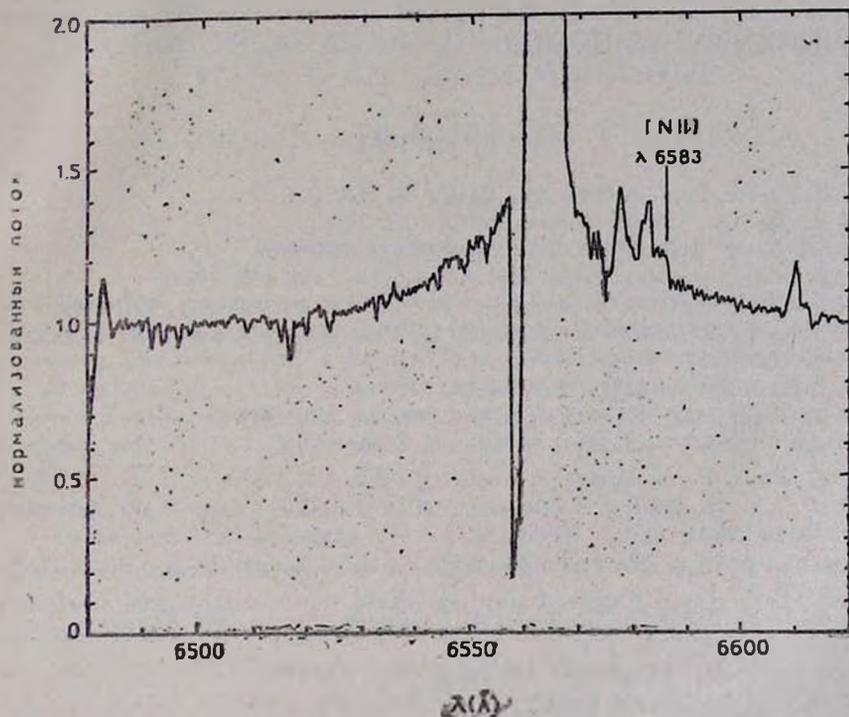


Рис. 2. Линии [N II] блендированы мощными крыльями  $H_{\alpha}$ .

зрения неудивительно, что эти линии существуют также в спектре P Cyg. Вышеупомянутое отношение линий [N II] у звезды S Dog равно 1.2, что не очень отличается от P Cyg и указывает на сходство внешних частей звездного ветра P Cyg и S Dog. Интересно, что у звезд типа S Dog линии [Fe II] имеют параболический профиль, а линии [N II]—прямоугольный. Это различие может быть обусловлено эволюционными причинами.

Выражаем благодарность д-ру О. Штаалу за предоставление спектров P Cyg.

## FORBIDDEN LINES IN P CYG SPECTRA

G. L. ISRAELIAN, M. DE GROOT

We discussed the origin of the flat-topped [Fell] lines and almost parabolic [NII] lines in the spectrum of P Cyg found recently by O. Stahl et. al. We found, that the lines [NII] are formed at  $r > 100R_*$ , and the [Fell] lines at  $r > 300 R_*$  and also estimate physical parameters of P Cygni's stellar wind.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J. D. Fernie, Publ. Astron. Soc. Pacif., 81, 168, 1961.
2. H. L. Johnson, Lowell. Observ. Bull., 4, 37, 1958.
3. M. de Groot, Bull. Astron. Inst., Netherl., 20, 225, 1969.
4. J. B. Hutchings, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 144, 235, 1969.
5. V. A. Ambartsumian, L. Mirzogan, T. P. Snow, Astrophys. J., 227, 519, 1979.
6. H. J. G. L. M. Lamers, M. de Groot, A. Cassatella, Astron. and Astrophys., 128, 299, 1983.
7. O. Struve, Astrophys. J., 81, 66, 1935.
8. C. S. Beals, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 95, 580, 1935.
9. D. van Blerkom, Astrophys. J., 221, 186, 1978.
10. R. L. White, R. H. Becker, Astrophys. J., 262, 657, 1982.
11. H. J. G. L. M. Lamers, P. Korevaar, A. Cassatella, Astron. and Astrophys., 149, 29, 1985.
12. Van den Oord et. al., Radio Stars, ed. R. M. Hjellming, D. M. Gibson, 1985, p. 111.
13. B. Wolf, O. Stahl, J. Smoltnakt, A. Cassatella, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 74, 239, 1988.
14. Leitherer et. al. Astron. and Astrophys., 153, 168, 1985.
15. H. J. G. L. M. Lamers, IAU Symp. no. 116, 1985, p. 157.
16. L. B. F. M. Waters, P. P. Wessellias, Astron. and Astrophys., 155, 104, 1986.
17. F. J. Ziegler, Physics of Formation of Fell Lines Outside LTE, ed. R. Viotti et. al., 1988, p. 125.
18. B. Wolf, O. Stahl, M. de Groot, C. Sterken, Astron. and Astrophys., 99, 351, 1981.
19. O. Stahl, H. Mandel, Th. Szelfert, B. Wolf, F. Zhao, Astron. and Astrophys., 1991 (in press).
20. R. Viotti, Astrophys. J., 224, 293, 1976.
21. A. P. Bernat, D. L. Lambert, Publ. Astron. Soc. Pacif., 90, 520, 1978.
22. D. E. Osterbrock, Astrophysics of Gaseous Nebulae, Freeman and Company, San Francisco, 1974.
23. J. E. Drew, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 217, 867, 1985.
24. O. Stahl, B. Wolf, Astron. and Astrophys., 158, 371, 1986.
25. Pauldrach A. W. A., J. Puls, Astron. and Astrophys., 237, 409, 1990.