

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРА LBV-КАНДИДАТА В NGC 4736****Е. О. Дедов, А. С. Винокуров, А. Е. Костенков, Ю. Н. Соловьева***Специальная астрофизическая обсерватория РАН*

Мы представляем результаты моделирования недавно полученного спектра LBV-кандидата J125055.8+410625 в галактике NGC 4736, проведенного с помощью не-ЛТР кода CMFGEN. Для воспроизведения наблюдаемых интенсивностей эмиссий водорода, нейтрального гелия и многочисленных разрешенных и запрещенных линий железа были построены как простая сферически симметричная модель протяженной атмосферы, так и более сложная составная модель, учитывающая полярное и экваториальное истечение вещества. В работе обсуждаются преимущества и недостатки обеих моделей, приводятся оценки фундаментальных параметров звезды.

**WIND MODELING OF LBV-CANDIDATE IN NGC 4736****E. O. Dedov, A. S. Vinokurov, A. E. Kostenkov, Y. N. Solovyeva***Special Astrophysical Observatory of RAS*

We present the results of radiative transfer modeling with non-LTE CMFGEN code of recently acquired spectra of LBV-candidate J125055.8+41062 in NGC 4736 galaxy. In order to approximate the observed emission lines intensities of hydrogen, neutral helium and numerous permitted and forbidden lines of iron we created the simple spherically symmetric model of extended atmosphere as well as more complex model which combines polar and equatorial modes of mass loss. Here we discuss positive and negative sides of each model and introduce stellar fundamental parameters estimates.

**Введение**

Яркие голубые переменные (Luminous blue variables, LBVs) — проэволюционировавшие звезды высокой светимости ( $L_{Bol} > 10^5 L_{\odot}$ ) массой более  $25 M_{\odot}$  [1]. Они характеризуются сильной спектральной и фотометрической переменностью.

Исследуемый в работе LBV-кандидат J125055.8+410625 ( $M_V < -8.6^m$ , [2]) обнаружен в галактике NGC 4736, находящейся на расстоянии 4.6 Мпк [3]. Для моделирования был выбран спектр с лучшим разрешением и соотношением сигнал/шум, полученный на телескопе БТА САО РАН с применением прибора SCORPIO-2 [4] в режиме длинной щели с гризмой VPHG1200@540 (спектральный диапазон 3600–7300 Å, разрешение  $\sim 4.3 \text{ \AA}$  с использованной при наблюдениях щелью шириной  $1''$ ).

Выбранный спектр содержит набор относительно широких (FWHM  $\sim 300 \text{ км/с}$ ) эмиссионных линий серии Бальмера, большое количество эмиссионных линий Fe II с P Cyg профилем, а также линии He I  $\lambda 4471$ ,  $\lambda 5875$ ,  $\lambda 6678$ ,  $\lambda 7065$ . Среди набора спектральных линий особенно отметим сильные линии дублета NaI.

## Методы

Для моделирования спектра J125055.8+410625 нами был использован не-ЛТР код CMFGEN [5], позволяющий рассчитывать сферически-симметричные модели звездных атмосфер с учетом оттока вещества в ветре. Изменение скорости ветра с расстоянием описывалось в рамках простого и двойного  $\beta$ -законов [6, 7]. При расчетах вид скоростного закона варьировался от стандартного для звездных ветров ( $\beta = 1.0$ ) [8] до квазилинейного с  $\beta_1 = 1.0$  и  $\beta_2 = 15.0$ .

При оценке эффективной температуры мы ориентировались на отношение интенсивностей линий Бальмеровской серии и линий Fe II при заданной металличности (см. ниже). На основании наличия в спектре объекта линий He I совместно с линиями Fe II эффективная температура была предварительно оценена как  $\lesssim 10\,000$  K. Подбор оптимального значения темпа потери массы проводился по линиям бальмеровской серии водорода (прежде всего  $H_\alpha$ ), чувствительным к этому параметру [9].

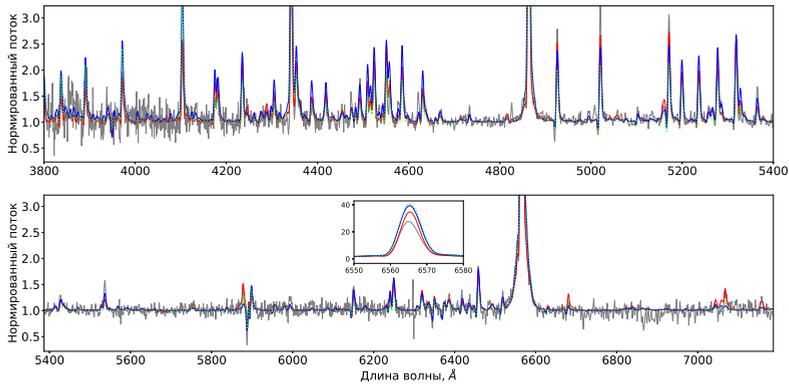
Помимо уже упомянутых водорода, гелия и железа модели включали в себя следующие ионы: C I-III, N I-III, O I-II, Na I-II, Mg I-II, Al I-II, Si I-III, Ca I. Металлы играют важную роль в ускорении ветра звезд при температурах  $\sim 10$  кК [10] и, кроме того, сильно влияют на ионизационное состояние вещества, поскольку являются источниками электронов в ветре. Металличность галактики NGC 4736 на расстоянии объекта от центра составляет  $0.7 Z_\odot$  [11], это значение было использовано в качестве обилия для всех перечисленных выше элементов, кроме азота, углерода и кислорода, для которых используются типичные для LBV звезд значения (например, [12]). Для восстановления наблюдаемой интенсивности эмиссионных линий Na I D1,2 содержание натрия было увеличено до исключительно высокого значения  $Z_{Na} = 10 Z_\odot$ , мало зависящего от температуры газа ветра в пределах ее допустимых значений и других параметров ветра.

## Результаты

В процессе моделирования был обнаружен ряд проблем, который мы поэтапно попытались решить в рамках трех моделей: модель с низким содержанием водорода (модель 1), низкотемпературная модель с более высоким содержанием водорода (модель 2) и двухсоставная модель (модель 3), состоящая из модели 2 и более горячей компоненты. При поиске наилучшего приближения наблюдаемого спектра было рассчитано несколько сотен промежуточных моделей. Параметры финальных моделей представлены в таблице, модельные спектры в сравнении с наблюдаемым показаны на рисунке.

Основные параметры моделей атмосфер.  $T_{\text{eff}}$  — температура на  $\tau = 2/3$  по Росселанду;  $R_*$  — гидростатический радиус (радиус атмосферы на  $\tau_{\text{Ross}} > 20$ );  $L$  — болометрическая светимость;  $\dot{M}$  — темп потери массы;  $f$  — объемный фактор заполнения;  $\beta_1, \beta_2$  — параметры скоростного закона;  $v_\infty$  — скорость ветра на бесконечности. Для модели 3 через запятую приводятся параметры холодного и горячего компонентов ветра

Параметр	Модель 1	Модель 2	Модель 3
$T_{\text{eff}}$ , K	8 900	7 600	7 600, 8 300
$\dot{M}$ , $M_\odot \text{ год}^{-1}$	$4.2 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-4}$ , $3.6 \times 10^{-4}$
$L$ , $L_\odot$	$8.5 \times 10^5$	$6.8 \times 10^5$	$6.8 \times 10^5$ , $6.8 \times 10^5$
$R_*$ , $R_\odot$	170	130	130, 120
$v_\infty$ , км с $^{-1}$	230	230	230, 250
$\beta_1$	1.0	2.0	2.0, 1.0
$\beta_2$	15.0	—	—, 15.0
$f$	0.5	0.5	0.5, 1.0



Сравнение нормированного наблюдаемого спектра объекта (серая кривая) с нормированными спектрами модели 1 (сплошная красная кривая), модели 2 (сплошная синяя кривая) и модели 3 (практичная зеленая кривая) сглаженными со спектральным разрешением  $4.3 \text{ \AA}$ . На врезке по центру нижней панели показана линия  $H_{\alpha}$  в тех же цветах

Модель 1 выделяется на фоне остальных наилучшим воспроизведением наблюдаемых интенсивностей спектральных линий водорода, нейтрального гелия и железа, хотя для ряда эмиссий Fe II имеются довольно сильные отклонения наблюдаемых и модельных интенсивностей. Подгонка относительных интенсивностей линий этих трех элементов потребовало уменьшения массовой доли водорода в ветре до 20 %, что довольно сильно выбивается за пределы типичных для LBV-звезд значений [13]. Это побудило нас искать альтернативные решения, позволяющие описать спектр J125055.8+410625.

Группа моделей 2 обладает типичной для LBV массовой долей водорода в ветре — 40 %. Относительно низких интенсивностей линий бальмеровской серии удалось добиться уменьшением степени ионизации водорода при низких температурах газа, например, значение на глубине  $\tau_{Ross} = 2/3$  в финальной модели составило 7600 К. Преимуществом низкотемпературной модели, помимо стандартного для LBV обилия водорода, является лучшее согласование относительных интенсивностей разных серий Fe II. В то же время из-за низкой температуры линии He I в модельном спектре практически полностью отсутствуют.

Сохранить преимущества модели 2 и одновременно решить проблему отсутствия линий нейтрального гелия мы попробовали с помощью двухсоставной модели, учитывающей возможный вклад более горячего полярного ветра, предсказываемый теорией для быстро-вращающихся звезд. Спектр двухсоставной модели получен суммированием спектра модели 2 со спектром модели с  $T_{\text{eff}} = 8300 \text{ K}$  в равных пропорциях. Подобные составные модели, учитывающие неоднородности распределения параметров в ветре по полярному углу, ранее применялись, например, при исследовании яркой голубой переменной HR Car [14] и сверхгиганта AV 83 в Малом Магеллановом Облаке [15]. Как видно из рисунка, нам удалось значительно увеличить интенсивности эмиссий He I, однако результирующий спектр стал хуже описывать ряд линий железа. Кроме того, воспроизведение наблюдаемого спектра все еще несравнимо с моделью 1, пусть при этом модель 3 и имеет менее экстремальное содержание водорода в ветре. Дальнейший процесс улучшения согласованности между спектрами предполагал уменьшение темпа потери массы и гидростатического радиуса для более горячего компонента с синхронным увеличением этих параметров для холодного компонента модели 3. Однако такое изменение параметров ветра неминуемо приведет к несоответствию теоретическим представлениям о свойствах полярного и экваториального ветров массивных звезд [16].

Данные наблюдений получены на уникальной научной установке Большой телескоп альтимутальный САО РАН. Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

## Библиографические ссылки

- [1] *Humphreys R. M., Weis K., Davidson K., Gordon Michael S.* On the Social Traits of Luminous Blue Variables // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 825, № 1. — P. 64. 1603.01278.
- [2] *Solovyeva Y., Vinokurov A., Fabrika S. et al.* New luminous blue variable candidates in NGC 4736 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Vol. 484, № 1. — P. L24–L28. 1901.05277.
- [3] *Tully R. B., Courtois H. M., Dolphin A. E. et al.* Cosmicflows-2: The Data // *Astron. J.* — 2013. — Vol. 146, № 4. — P. 86. 1307.7213.
- [4] *Afanasiev V. L., Moiseev A. V.* Scorpio on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects // *Baltic Astronomy.* — 2011. — Vol. 20. — P. 363–370. 1106.2020.
- [5] *Hillier D. J., Miller D. L.* The Treatment of Non-LTE Line Blanketing in Spherically Expanding Outflows // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 496, № 1. — P. 407–427.
- [6] *Lamers H. J. G. L. M., Najjarro F., Kudritzki R. P. et al.* The ISO-SWS spectrum of P Cygni. // *Astron. Astrophys.* — 1996. — Vol. 315. — P. L229–L232.
- [7] *Hillier D. J., Lanz T., Heap S. R. et al.* A tale of two stars: the extreme O7 Iaf+ supergiant AV 83 and the OC7. 5 III ((f)) star AV 69 // *The Astrophysical Journal.* — 2003. — Vol. 588, № 2. — P. 1039.
- [8] *Hillier D. J.* Hot Stars with Winds: The CMFGEN Code // *From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools* / ed. by Mercedes T. Richards, Ivan Hubeny. — 2012. — Vol. 282. — P. 229–234.
- [9] *Leitherer C.* H alpha as a Tracer of Mass Loss from OB Stars // *Astrophys. J.* — 1988. — Vol. 326. — P. 356.
- [10] *Abbott D. C.* The theory of radiatively driven stellar winds. II. The line acceleration. // *Astrophys. J.* — 1982. — Vol. 259. — P. 282–301.
- [11] *Pilyugin L. S., Grebel E. K., Kniazev A. Y.* The Abundance Properties of Nearby Late-type Galaxies. I. The Data // *Astron. J.* — 2014. — Vol. 147, № 6. — P. 131. 1403.5461.
- [12] *Vink J. S, de Koter A.* Predictions of variable mass loss for Luminous Blue Variables // *Astronomy & Astrophysics.* — 2002. — Vol. 393, № 2. — P. 543–553.
- [13] *Davies B.* Young Massive Clusters as Probes of Stellar Evolution // *Hot and Cool: Bridging Gaps in Massive Star Evolution* / ed. by C. Leitherer, P. D. Bennett, P. W. Morris, J. Th. Van Loon : *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — 2010. — Vol. 425. — P. 37. 0903.0979.
- [14] *Groh J. H., Damineli A., Hillier D. J. et al.* Bona Fide, Strong-Variable Galactic Luminous Blue Variable Stars are Fast Rotators: Detection of a High Rotational Velocity in HR Carinae // *Astrophys. J. Lett.* — 2009. — Vol. 705, № 1. — P. L25–L30. 0909.4459.
- [15] *Busche J. R., Hillier D. J.* Spectroscopic effects of rotation in extended stellar atmospheres // *The Astronomical Journal.* — 2005. — Vol. 129, № 1. — P. 454.
- [16] *Dwarkadas V. V., Owocki S. P.* Radiatively driven winds and the shaping of bipolar luminous blue variable nebulae // *The Astrophysical Journal.* — 2002. — Vol. 581, № 2. — P. 1337.