

Определение фундаментальных параметров LBV звезды J122809.72+440514.8 в галактике NGC 4449

Соловьева Ю.¹, Винокуров А.¹, Саркисян А.¹, Костенков А.¹, Атапин К.^{1,2}

¹САО РАН
²ГАИШ МГУ



Аннотация

Мы представляем исследование массивной звезды в галактике NGC 4449, которая классифицирована нами как яркая голубая переменная (LBV). Звезда продемонстрировала заметные изменения блеска ($\Delta I = 0.69 \pm 0.13^m$), а также переменность профилей линий ионизованного железа и водорода. Аппроксимация спектральных распределений энергии звезды в двух состояниях моделью черного тела дает оценки эффективной температуры $T=7600$ К и $T=13500$ К соответственно, однако, в холодном состоянии имеются значительные отклонения от чернотельного спектра. Применение не-ЛТР кода CMFGEN позволило получить более точные значения температуры в холодном состоянии $T=9300$ К, а также оценить темп истечения вещества $\dot{M} = 5.2 \times 10^{-3} M_{\odot} yr^{-1}$. Болометрическая светимость звезды составляет около $2.6 \times 10^6 L_{\odot}$.

Спектры

Эмиссионные линии He I $\lambda\lambda 4472, 4922$ и Fe II $\lambda\lambda 4400-4700$, $\lambda\lambda 5100-5400$ в спектре J122809.72+440514.8 2015 года имеют профили типа P Cug, которые ослабевают к 2018 году и не наблюдаются в 2020 году (рис.1). Крылья линий H β , H γ заметно уширены в 2020 году. Также наблюдается поярчание линий [Fe II] ($\lambda 5157$) и Fe II ($\lambda 5169$) и ослабление других линий железа. В спектре J122809.72+440514.8 также присутствуют линии Cr II и Ti II. Изучение узких компонент водородных линий, формирующихся в окружающей туманности, позволило произвести оценку межзвёздного поглощения $A_V = 0.8 \pm 0.2$.

Таблица 1: Параметры модели спектра J122809.72+440514.8 и содержания химических элементов (X).

$L_*, L_{\odot}$	2.58×10^6
$\dot{M}, M_{\odot} yr^{-1}$	5.2×10^{-3}
$R_{2/3}^*, R_{\odot}$	620
$R_*^*, R_{\odot}$	410
T^*, K	9300
T_*^*, K	11360
β	1.0
$V_{\infty}, km s^{-1}$	300
f	1
H, %	20
$X_C/X_{\odot}$	0.2
$X_N/X_{\odot}$	5.4
$X_{Si}/X_{\odot}$	0.5
$X_{Fe}/X_{\odot}$	0.5

Notes. * $R_{2/3}$ и T - радиус и температура на $\tau = 2/3$, T_* - температура на гидростатическом радиусе R_* ($\tau > 20$)

Литература

- [1] D. John Hillier and D. L. Miller. The Treatment of Non-LTE Line Blanketing in Spherically Expanding Outflows. ApJ, 496(1):407–427, March 1998.
- [2] Y. Solovyeva, A. Vinokurov, A. Sarkisyan, and et al. Search for LBVs in the Local Volume galaxies: study of four stars in NGC 4449. MNRAS, July 2021.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 19-52-18007).

Определение параметров

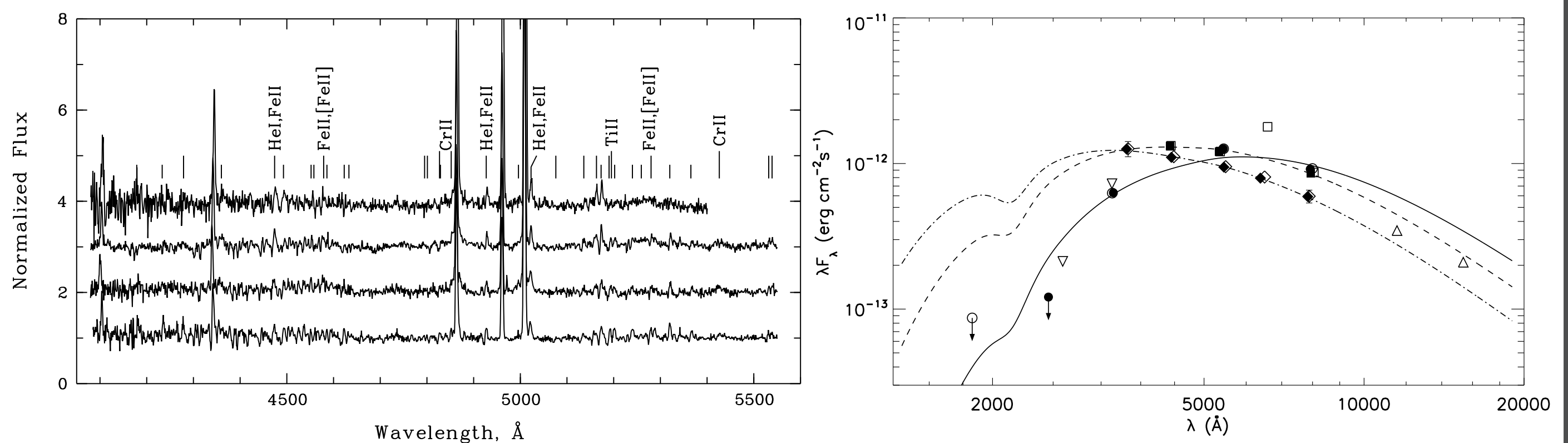


Рис. 1: Слева: Нормализованные спектры J122809.72+440514.8, полученные в 2015, 2017, 2018 и 2020 (снизу-вверх). Неподписанные короткие и длинные штрихи обозначают линии железа Fe II и [Fe II]. Справа: SEDы J122809.72+440514.8. Черные сплошная и пунктирная линии соответствуют наилучшей чернотельной модели. Незаполненные и заполненные символы соответствуют данным, приведённым к опорной длине волны λ_{pivot} фильтров HST, и данным, скорректированным за наклон спектра. Треугольниками вершиной вверх и вершиной вниз отмечены ИК-данные (2019) и УФ-данные (2014) HST WFC3. Кружки обозначают фотометрию HST/WFPC2 (1997). Квадратами обозначены данные камеры HST/ACS/WFC (2005). Ромбами отмечены данные 2.5-м КГО ГАИШ (2020).

Фотометрическая переменность J122809.72+440514.8 составила $\Delta V = 0.48 \pm 0.14^m$, $\Delta I = 0.69 \pm 0.13^m$ с 1997 по 2020 годы.

Холодному состоянию звезды соответствует спектральное распределение энергии (SED) 1997 года и спектр 2015 года, а более горячее состояние наблюдалось в 2020 году. Совместная аппроксимация SEDs звезды в двух крайних состояниях моделью абсолютно чёрного тела при постоянных A_V и L_{Bol} не дала удовлетворительных результатов, поэтому L_{Bol} выбран в качестве свободного параметра. Наилучшая модель имеет следующие параметры: $T = 7600 \pm 300$ К, $\log(L_{Bol}/L_{\odot}) = 6.20 \pm 0.11$ (1997 год) и $T = 13500 \pm 4300$ К, $\log(L_{Bol}/L_{\odot}) = 6.44 \pm 0.64$ (2020) при значении $A_V = 0.6^m$. Разница между двумя полученными значениями L_{Bol} вероятно связана с недооценкой температуры фотосферы в холодном состоянии из-за наличия бальмеровского скачка. Для проверки это предположения использовался не-ЛТР код CMFGEN [1], позволяющий получить более точные оценки фундаментальных параметров. Наилучшее соответствие наблюдаемого и модельного спектров достигнуто при значении $\dot{M} = 5.2 \times 10^{-3} M_{\odot} yr^{-1}$ и температуре фотосферы $T = 9300$ К. Данная оценка эффективной температуры значительно превышает значение, полученное из аппроксимации SED моделью абсолютно черного тела ($T = 7600 \pm 300$ К), что указывает на недооценку температуры при фитировании SED.

Болометрическая светимость определялась путем аппроксимации SED (1997 год) полученным модельным спектром с учётом межзвездного поглощения (рис. 2). Наилучшее соответствие достигнуто при $A_V = 1.05 \pm 0.07^m$. Оценка болометрической светимости составила $\log(L_{Bol}/L_{\odot}) = 6.41 \pm 0.03$. Таким образом, оценки болометрической светимости, полученные для холодного и горячего состояния, совпадают в пределах ошибок. Подробное описание моделирования спектра, а также определения параметров J122809.72+440514.8 представлено в работе [2].

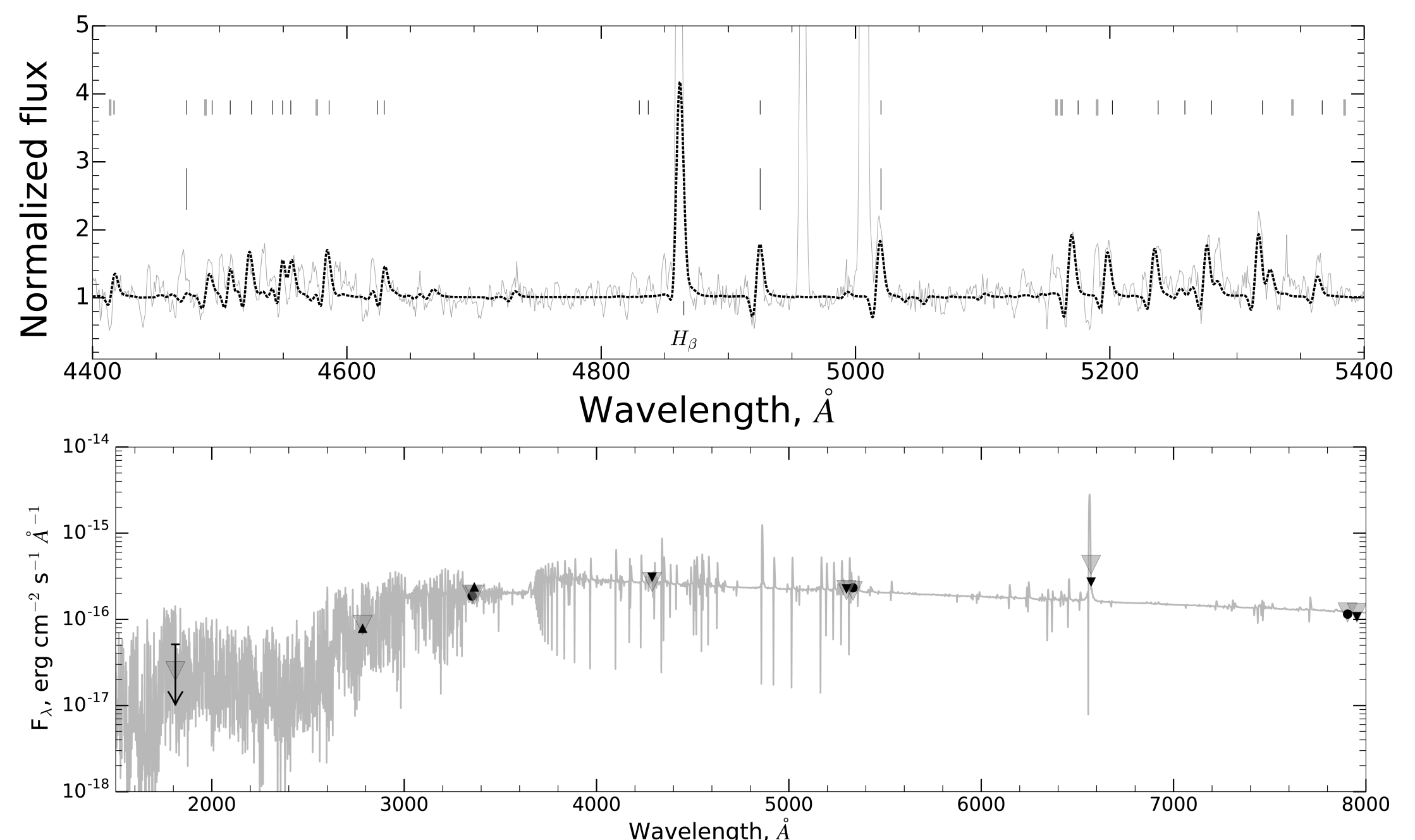


Рис. 2: Сверху: Нормализованный спектр J122809.72+440514.8 2015 года (серая линия) и наилучшая модель, рассчитанная с помощью кода CMFGEN (чёрная линия). Длинные чёрные штрихи обозначают линии He I; линии Fe II и [Fe II] отмечены короткими чёрными и толстыми серыми штрихами, соответственно. Снизу: Наилучшая модель спектра J122809.72+440514.8 2015 года (серая линия). Модельные потоки в фильтрах F170W, F336W, F555W и F814W отмечены серыми треугольниками. Чёрные кружки обозначают фотометрические данные HST/WFPC2 (1997 год), чёрные треугольники вершиной вниз - данные HST/ACS/WFC (2005 год), чёрные треугольники вершиной вверх - WFC3/UVIS data (2014 год).