

Яркие голубые переменные: методы их поиска и наблюдательные свойства

Соловьева Ю. Н., Винокуров А. С., Костенков А. Е., Саркисян А. Н.,
Шолухова О. Н., Тихонов Н. А., Фабрика С. Н.



Что такое яркие голубые переменные?

Яркие голубые переменные — это массивные звезды высокой светимости, показывающие иррегулярную переменность различной амплитуды. Исторически первые LBV- η Киля и P Лебедя, которые показывали вспышки в 19 и 17 веках.

- Переменные Хаббла-Сендиджа (M33, M31)
- Переменные типа S Dor (LMC)
- Горячие переменные звезды нашей Галактики

Humphreys R. M. 1978:
Luminous blue variables

Conti P. S. 1984:
Luminous blue variables

Что такое LBV?

Для LBV характерно:

- Высокие светимости $> 10^5 L_{\text{sun}}$, высокий темп потери массы $\sim 10^{-3} - 10^{-4} M_{\text{sun}} \text{yr}^{-1}$
- Спектральная и фотометрическая переменность:
 - Редкие гигантские вспышки амплитудой $> 2.5 \text{ m}$ (переменные типа $\eta \text{ Car}$). Масштабы времени – сотни-тысячи лет. Боллометрическая светимость не сохраняется. Иногда ассоциируют с импосторами Сверхновых (псевдосверхновые, имеют спектры сверхновых SNIIn);
 - Более частые вспышки амплитудой от 0.1 m до 2.5 m (переменные типа S Dor). Боллометрическая светимость остаётся приблизительно постоянной, но возможны изменения до 0.2 dex . Например, AG Car (Groh et al. 2009), S Dor (Lamers 1995), AFGL2298 (Clark et al. 2009).
- Во время визуального максимума — спектр A-F звёзд (Humphreys et al. 1994). Температура фотосферы — 7000-8000 К. Часто профили типа P Cyg;
- Во время визуального минимума – спектр WNLh-звезд. Температура фотосферы — более 35000 К (Clark et al. 2005);

Эволюционный статус LBV

- **Одинокaя массивная звезда:** сценарий Контти — короткая стадия перехода от одиночной массивной звезды на ГП к WR звезде. Иногда переход непосредственно к сверхновым (Trundle et al. 2008, Andrews et al. 2021)
 - $M \sim 20M : O7.5V \rightarrow BSG \rightarrow RSG \rightarrow BSG/BHG \rightarrow LBV \rightarrow SN$ (Groh et al. 2013);
 - $M \sim 25M : O6V \rightarrow OSG \rightarrow RSG \rightarrow OSG/WNL \rightarrow LBV \rightarrow SN$ (Groh et al. 2013).
 - $M \sim 25 - 40M : O \rightarrow LBV/RSG \rightarrow WN(H\text{-poor}) \rightarrow SN Ib$;
 - $M \sim 40 - 75M : O \rightarrow LBV \rightarrow WN(H\text{-poor}) \rightarrow WC \rightarrow SN Ic$;
 - $M > 75M : O \rightarrow WN(H\text{-rich}) \rightarrow LBV \rightarrow WN(H\text{-poor}) \rightarrow WC \rightarrow SN Ic$ (Crowther, 2007)
- **Результат эволюции двойной системы** с обменом масс (Smith & Tombleson 2015):
LBV изолированы от массивных O-звезд (Магеллановы облака)
O-type star $\rightarrow WN \rightarrow WC \rightarrow SNIbc$ (donor)
O-type star $\rightarrow LBV/B[e] \rightarrow SNIIn$ (gainer)
- **Объекты Торна-Житков** (Smith & Tombleson 2015) - ?

Сколько LBV известно?

К настоящему моменту обнаружено и подтверждено около 50 LBV звезд (+ около сотни кандидатов) (Richardson & Mehner 2018 — Местная группа):

Наша Галактика — 19;

LMC (~50 крс) — 8;

SMC (~62 крс) — 2;

M31 (~760 крс) — 7;

M33 (970 крс) — 5;

NGC 2366 (3.2 Мрс) — 1;

NGC 2403 (~3 Мрс) — 3;

DDO 68 (12.8 Мрс) — 1;

NGC 1156 (7 Мрс) — 2*;

NGC 4449 (4.3 Мрс) — 2*;

NGC 4736 (4.6 Мрс) — 1*;

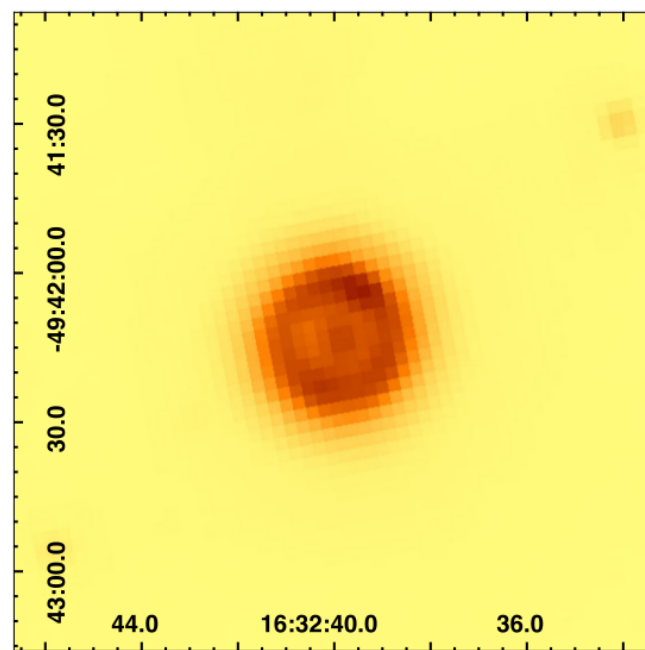
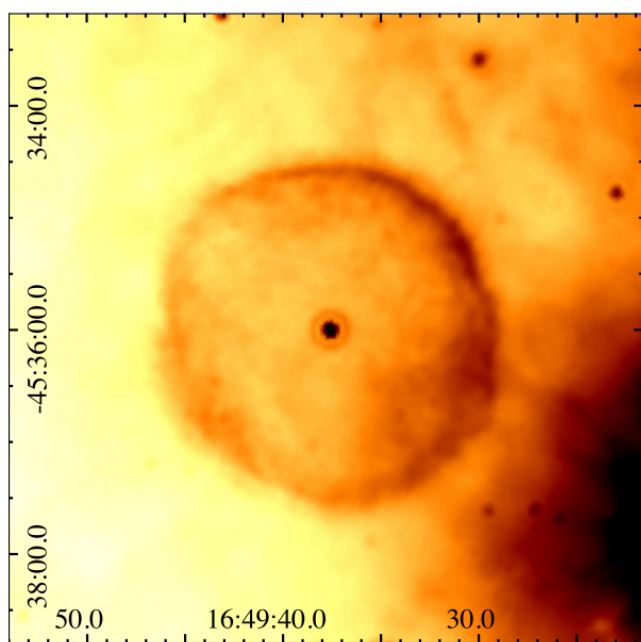
PHL 293 B (~24 Мрс) — 1?

* Обнаруженные нашей группой LBV с 2019 года на основе данных БТА САО РАН

Методы поиска LBV

1) По фотометрической переменности

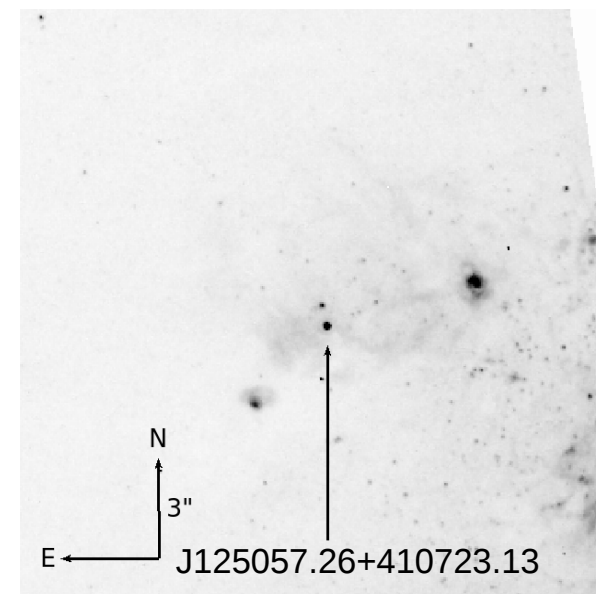
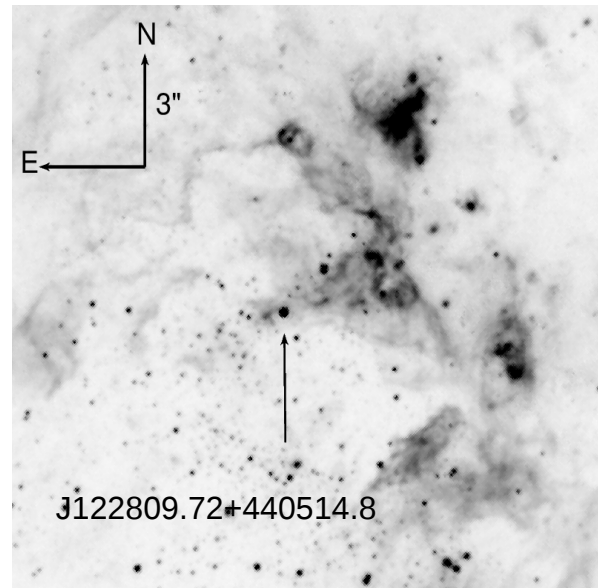
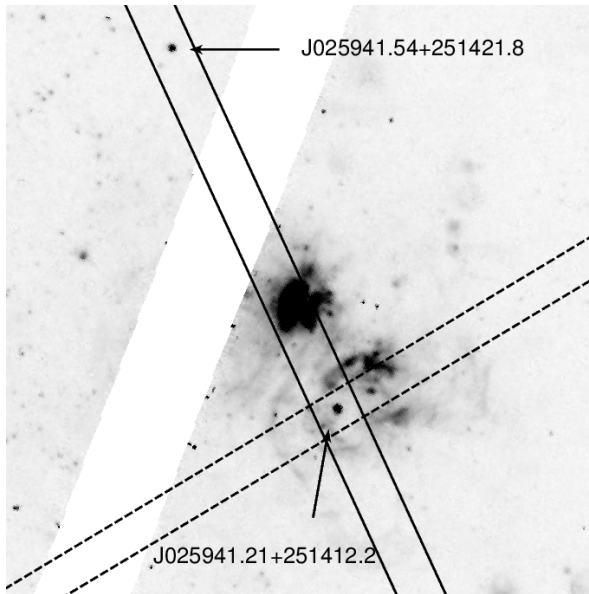
2) По пылевым оболочкам в ИК диапазоне (в нашей Галактике) (Gvaramadze et al. 2010a, 2010b, 2012, 2014, 2015, Kniazev et al. 2015, 2016)



MN48 (Kniazev et al. 2016) и MN44 (Gvaramadze et al. 2015), Spitzer MIPS/24 μ m

Методы поиска LBV

3) По $H\alpha$ эмиссиям, связанным с яркими голубыми звездами (Massey et al. 2006, Sholukhova et al. 1997, Valeev et al. 2010, Neese et al. 1991, Coral L.J. 1996, Solovyeva et al. 2019, 2020, 2021, 2023)



Изображения обнаруженных нами LBV звезд в фильтрах HST/ACS/WFC/F658N

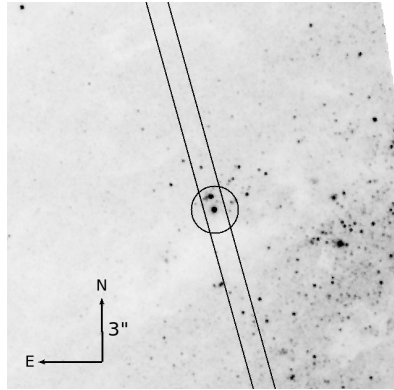
4) По отношению потоков в фильтрах $[S II] / H\alpha$ (для исключения остатков сверхновых и $H II$ областей) (King et al. 1998)

5) Фотометрия в УФ диапазоне — яркие голубые звезды + последующая оптическая спектроскопия (Humphreys et al. 1990, Massey et al. 1995, 1996);

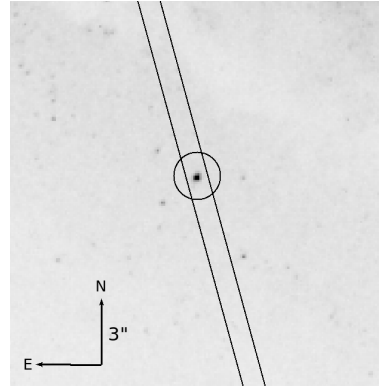
Где и как мы ищем LBV?

- С 90-х годов — галактики M33, M31, NGC 2403 (напр., Fabrika&Sholukhova 1995, Sholukhova et al. 1997, 1998, Valeev et al. 2009, 2010a, 2010b, 2012). Использовались наземные данные в широкополосных фильтрах и H α -фильтре. Кандидаты — голубые звезды с избытком H α . Спектроскопия — БТА САО РАН (мультиобъектная MFS, длиннощелевая - Scorpio)
- С середины 2010х - галактики за пределами Местной группы, в частности NGC 4736 (4.59 Мпк, Tully et al 2013), NGC 247 (3.52 Мпк, Tully et al 2013), NGC 4449 (4.27 Мпк, Tully et al 2013) и NGC 1156 (7.01 Мпк, Solovyeva et al. 2023). Отбор по архивным данным космического телескопа им. Хаббла (HST) в широкополосных фильтрах и H α -фильтре на северном и южном небе. Спектроскопия - БТА (Scorpio/Scorpio-2), SALT(RSS) и Subaru(FOCAS). В перечисленных галактиках было выбрано 11 потенциально интересных объектов.

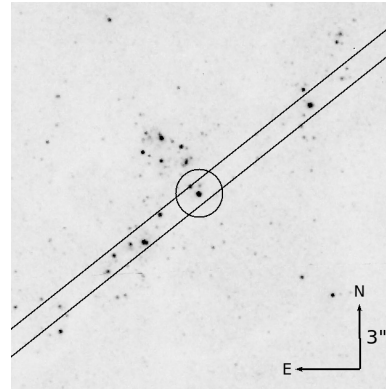
Отобранные кандидаты в NGC 4736, NGC 247, NGC 4449, и NGC 1156



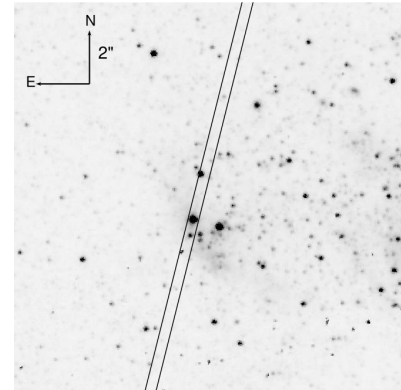
J125057.26+410723.13



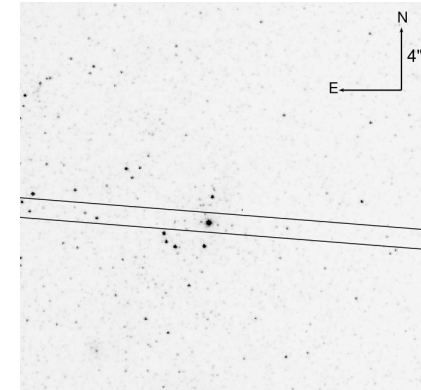
J125055.84+410625.44



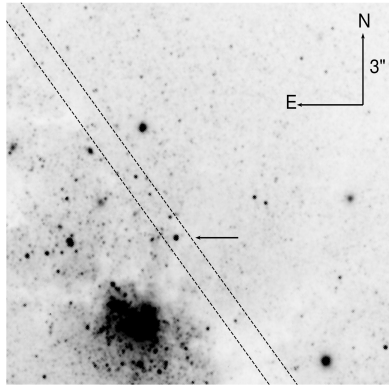
J125103.35+410635.37



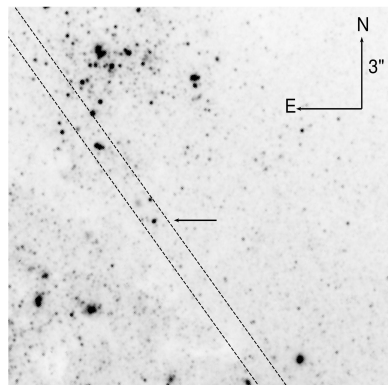
J004703.27-204708.4



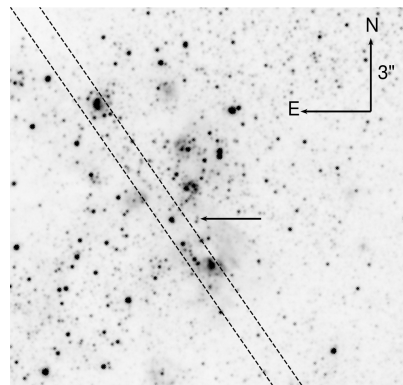
J004702.18-204739.93



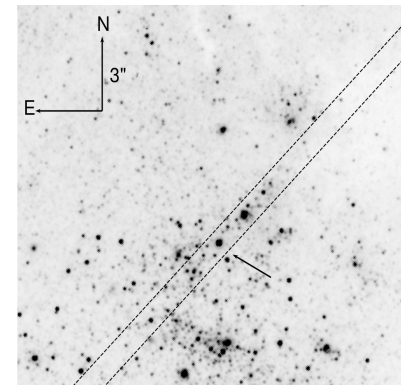
J122810.94+440540.6



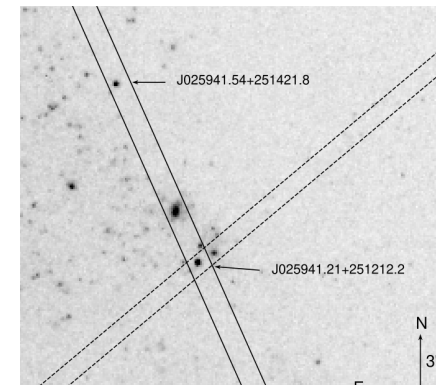
J122811.70+440550.9



J122817.83+440630.8

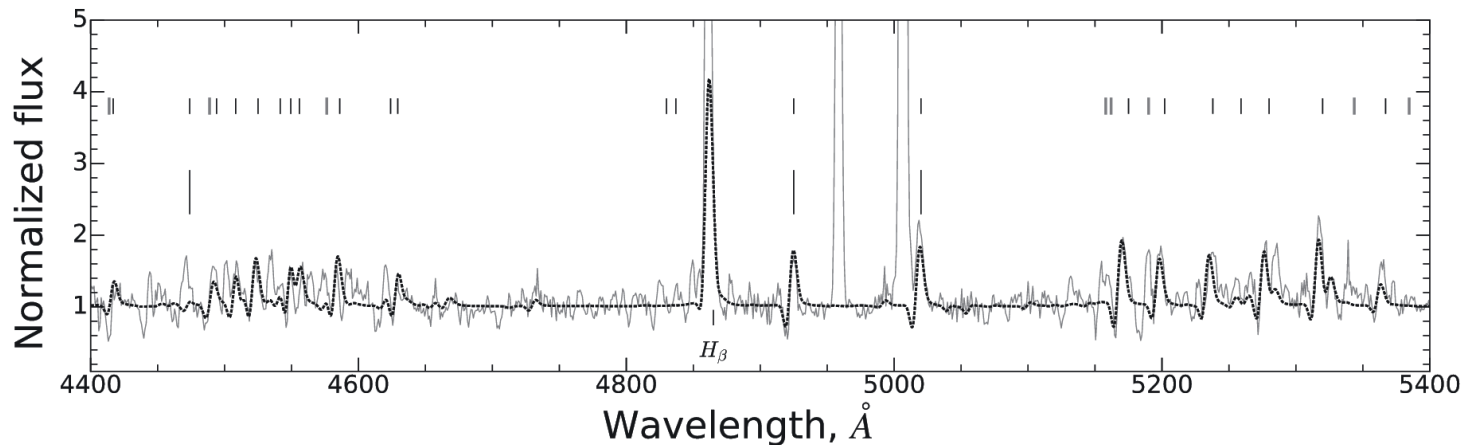
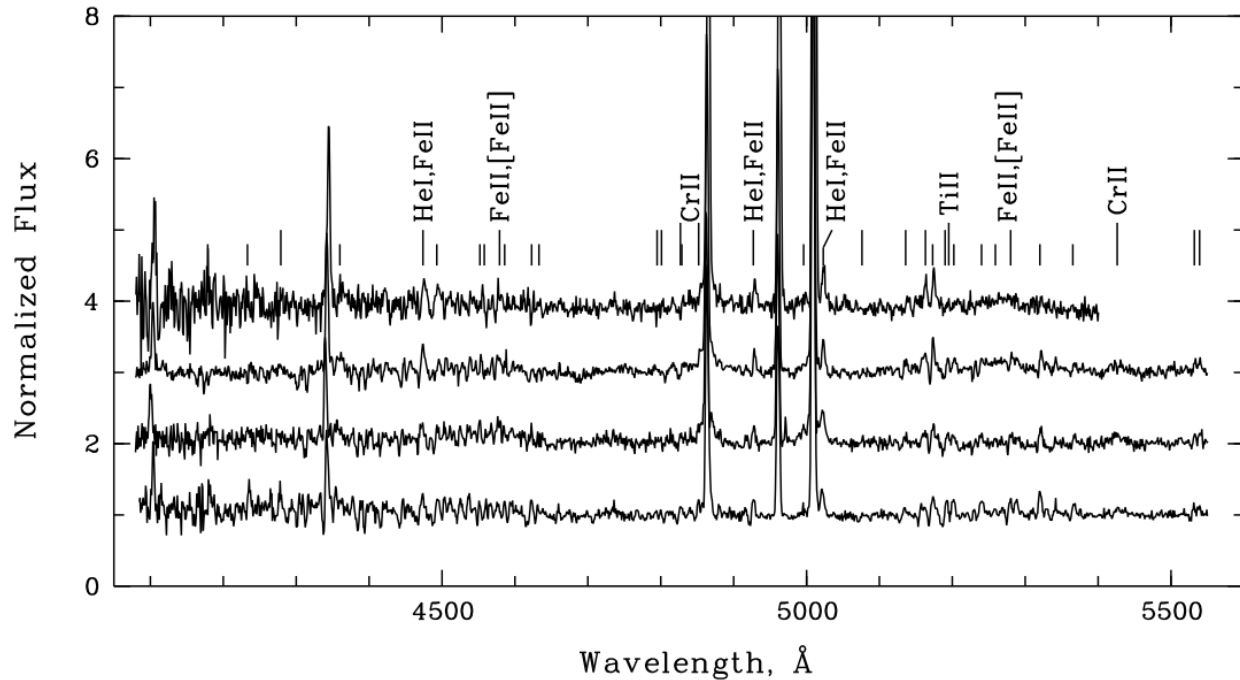


J122809.72+440514.8



J025941.21+251412.2
J025941.54+251421.8

LBV звезды: J122809.72+440514.8



Параметры модели CMFGEN
для холодного состояния

$L_{\text{bol}}, L_{\text{sun}}$	2.58×10^6
$\dot{M}_{\text{dot}} f^{0.5}, M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$	5.2×10^{-3}
$R_{2/3}, R_{\text{sun}}$	620
T_{eff}, K	9300
β	1.0
$V_{\infty}, \text{km s}^{-1}$	300
f	1
$H, \%$	20
$X_{\text{C}}/X_{\text{sun}}$	0.2
$X_{\text{N}}/X_{\text{sun}}$	5.4
$X_{\text{Fe}}/X_{\text{sun}}$	0.5

* $T_{\text{eff}} = 13500 \pm 4300 \text{ K}$,
 $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\text{sun}}) = 6.44 \pm 0.64 (\sim 2.75 \times 10^6)$
 для «горячего» состояния (2020) $A_{\text{V}} = 0.6^{\text{m}}$

J122809.72+440514.8 (NGC 4449) $\Delta I = 0.69^{\text{m}} \pm 0.13^{\text{m}}$ с 1997 по 2020 г. (Solovyeva et. al 2021)

Верхний рисунок: Спектры получены на БТА/SCORPIO в 2015, 2017, 2018 и 2020 годах. Неподписанные короткие и длинные штрихи обозначают линии железа Fe II и [Fe II] соответственно. Нижний рисунок: Нормированный спектр J122809.72+440514.8, полученный в 2015 году (серая линия) и наилучшая модель спектра, рассчитанная с помощью кода CMFGEN (чёрная линия). Длинные черные штрихи - линии He I; линии Fe II и [Fe II] - короткие чёрные и толстые серые штрихи, соответственно. $A_{\text{V}} = 0.8 \pm 0.2^{\text{m}}$ (по водородным линиям Бальмеровской серии окружающей туманности)

LBV звезды: J025941.21+251412.2

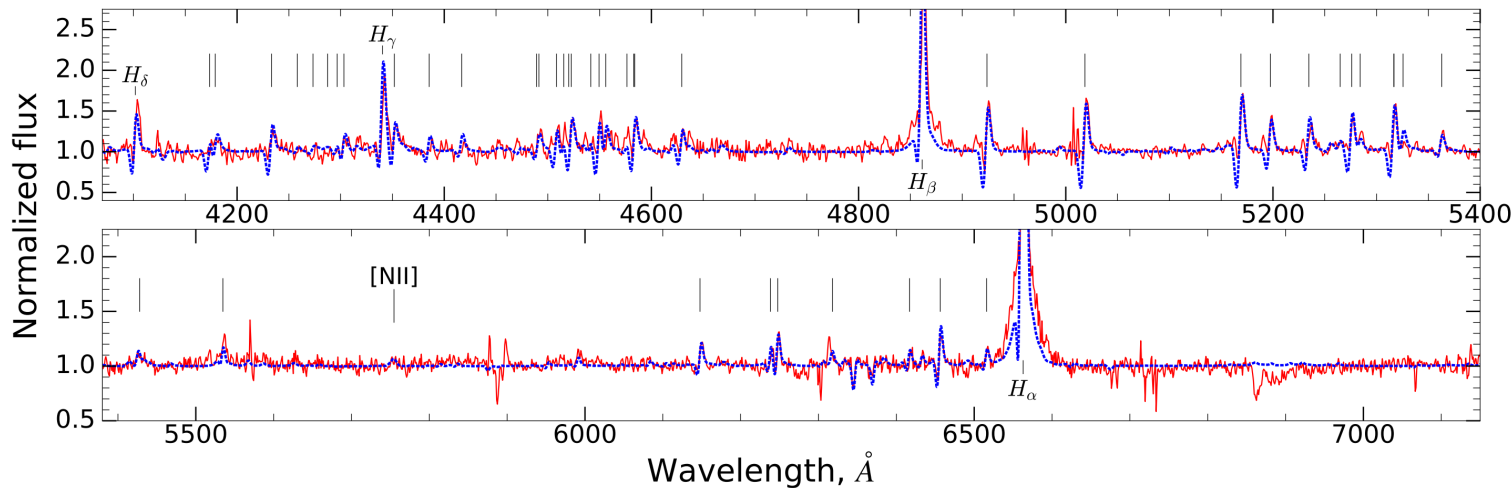
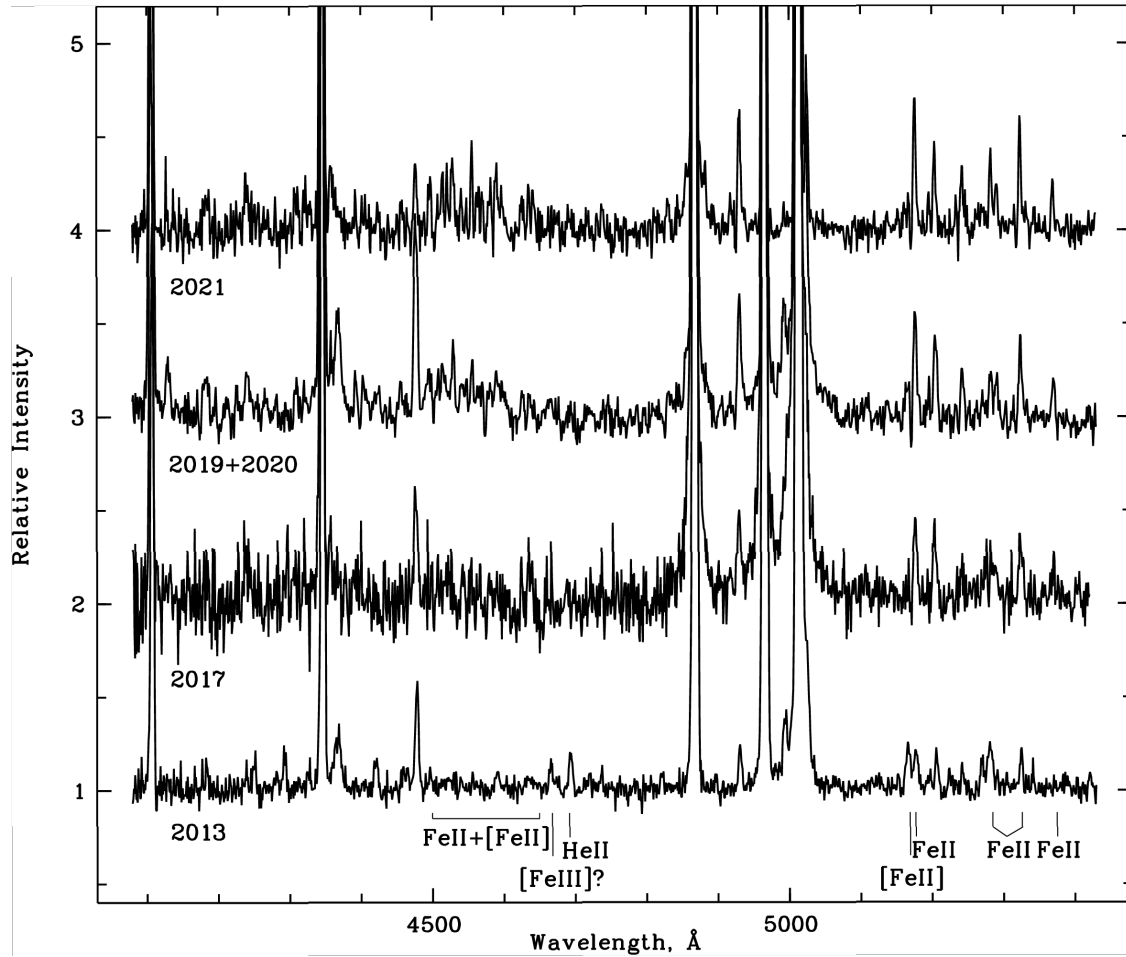
J025941.21+251412.2 (NGC 1156)

$\Delta R_C = 0.84^m \pm 0.23^m$ с 2013 по 2018 г.

(Solovyeva et al. 2023)

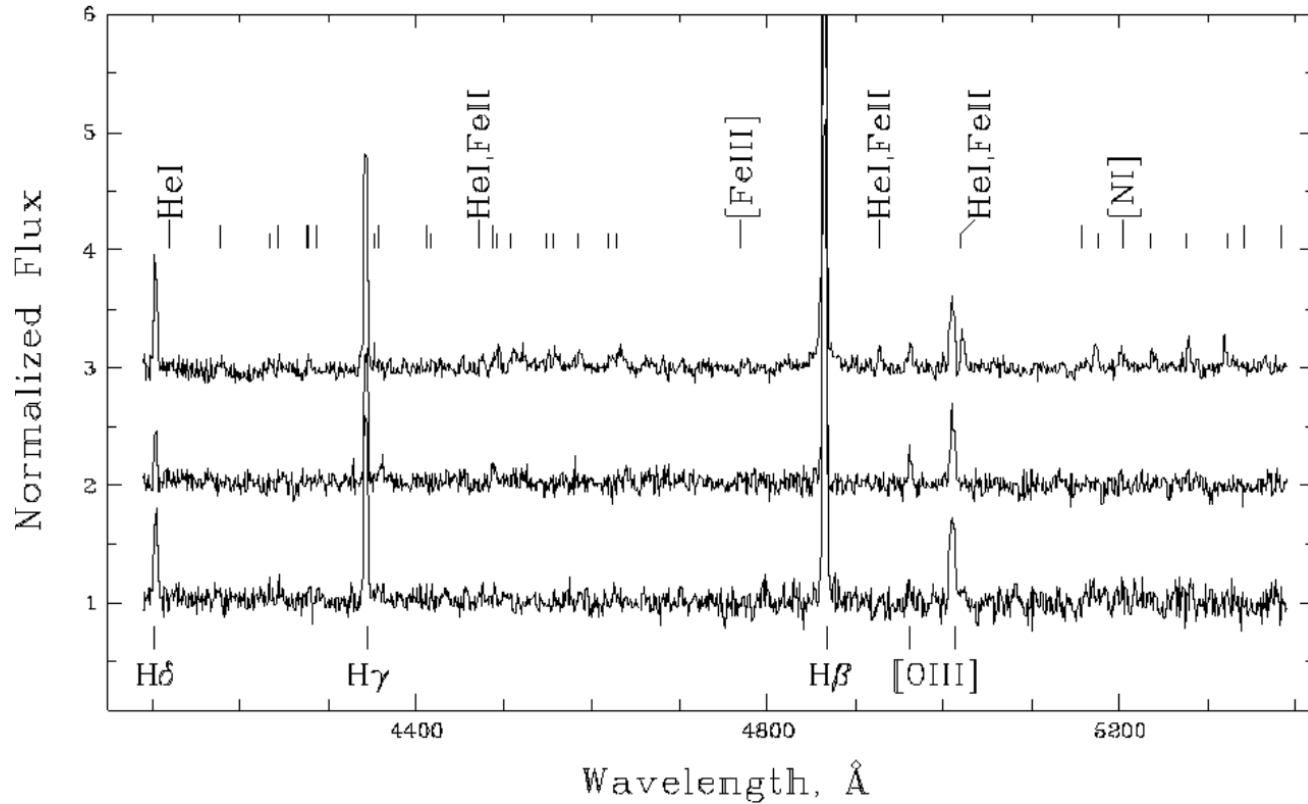
Спектры получены на БТА/SCORPIO-1(2) в 2013 – 2021 гг. Отмечены линии, испытывающие наибольшие изменения. *Нижний рисунок:*

Нормированный спектр J025941.21+251412.2 2021 года (красная линия) и наилучшая модель спектра, рассчитанная с помощью кода CMFGEN (красная линия). Линии Fe II отмечены черными вертикальными линиями. $A_V = 0.90 \pm 0.13^m$



L_{bol}, L_{sun}	$(1.6 \pm 0.2) \times 10^6$
$M_{dot} f^{0.5}, M_{sun} yr^{-1}$	$(8.2 \pm 1.0) \times 10^{-4}$
$R_{2/3}, R_{sun}$	680
T_{eff}, K	7900 ± 400
β	4.0
$V_{\infty}, km s^{-1}$	300
f	0.3
$H, \%$	20
X_C / X_{sun}	0.20
X_N / X_{sun}	5.41
X_{Fe} / X_{sun}	0.5

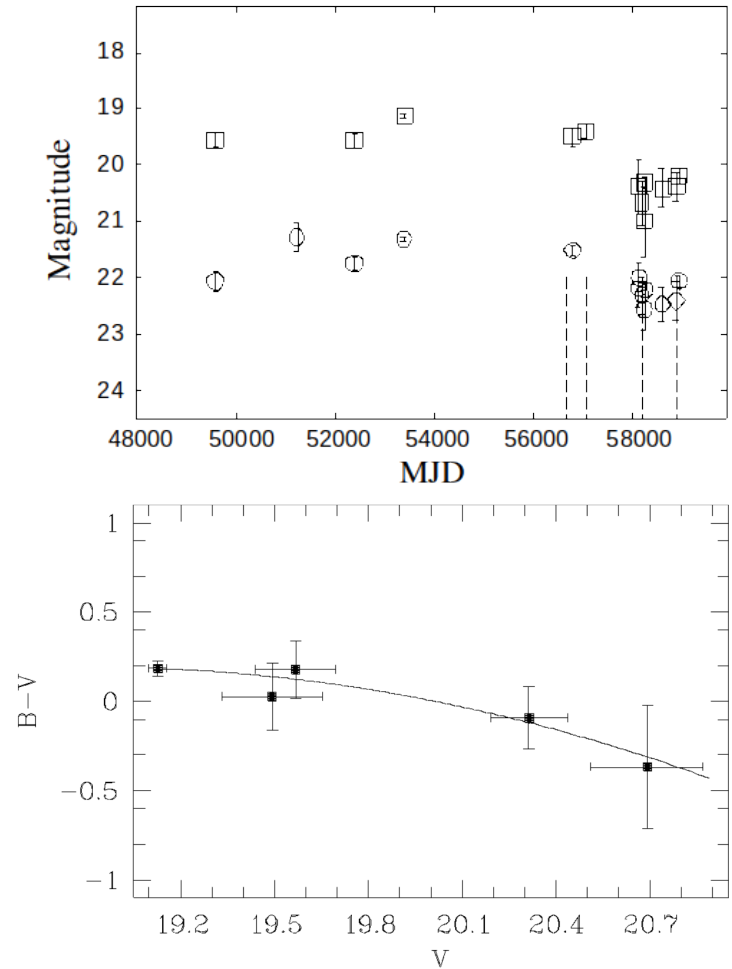
LBV звезды: J125057.26+410723.13



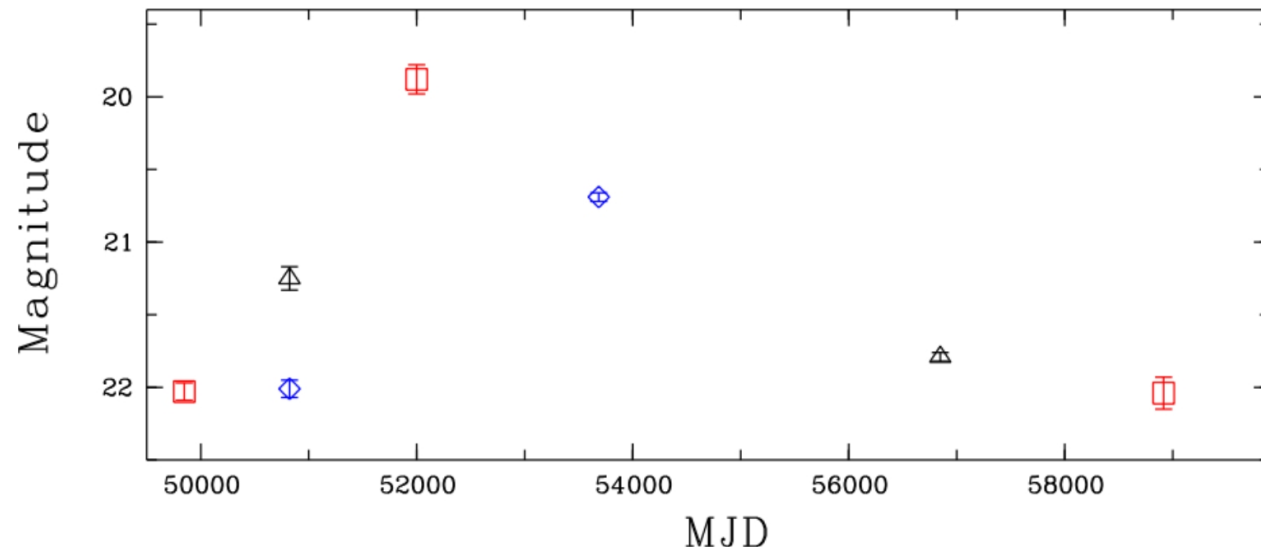
J125057.26+410723.13 (NGC 4736), $\Delta V = 1.18 \pm 0.12^m$ с 2005 по 2018 г.
(Solovyeva et al. 2019)

Спектры получены на ВТА/SCORPIO в 2015, 2018 и 2020 годах (сверху-вниз). Неподписанные короткие и длинные штрихи обозначают линии Fe II и [Fe II] соответственно. Справа показана кривая блеска звезды в полосах В (кружки) и V (квадраты). Кривая блеска в фильтре В смещена вниз на 2 звёздных величины. Справа внизу приведена зависимость изменения цвета (B-V) от изменения блеска.

$T_{\text{eff}} = 17000 \pm 3000$ К, $A_V = 1.0 \pm 0.1^m$, $\log(L_{\text{bol}}/L_{\text{sun}}) = 6.5 \pm 0.2$



LBV звезды: J122817.83+440630.8

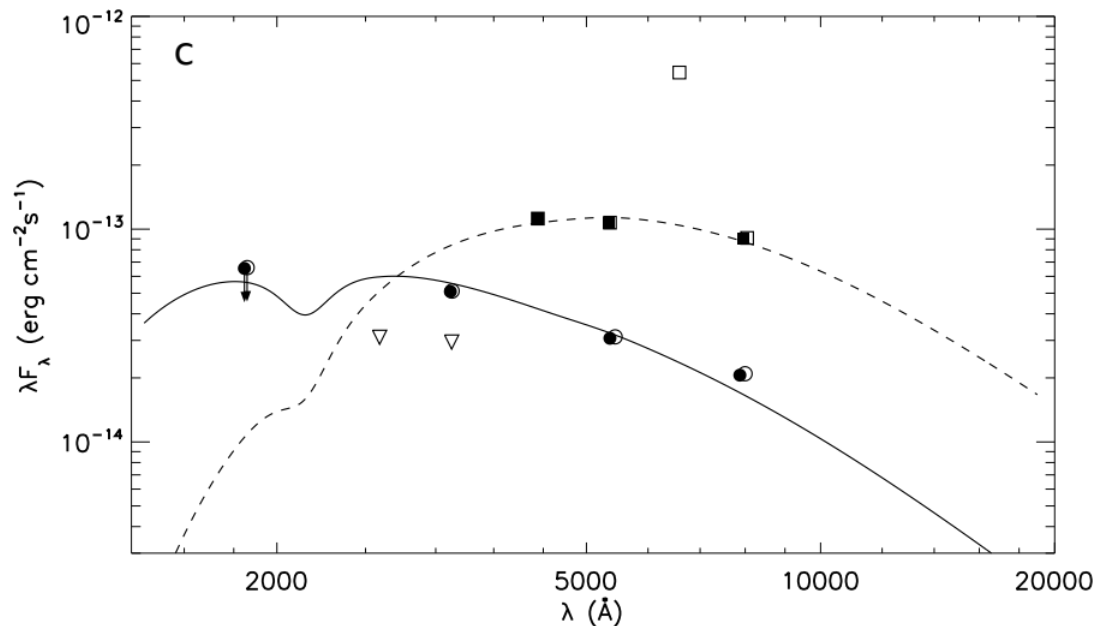


J122817.83+440630.8 (NGC 4449),

$\Delta R = 2.15 \pm 0.13^m$ с 1995 по 2001 г.

(Solovyeva et al. 2021)

Кривые блеска J122817.83+440630.8 в полосах V (голубые ромбы), U (черные треугольники) и R (красные квадраты).



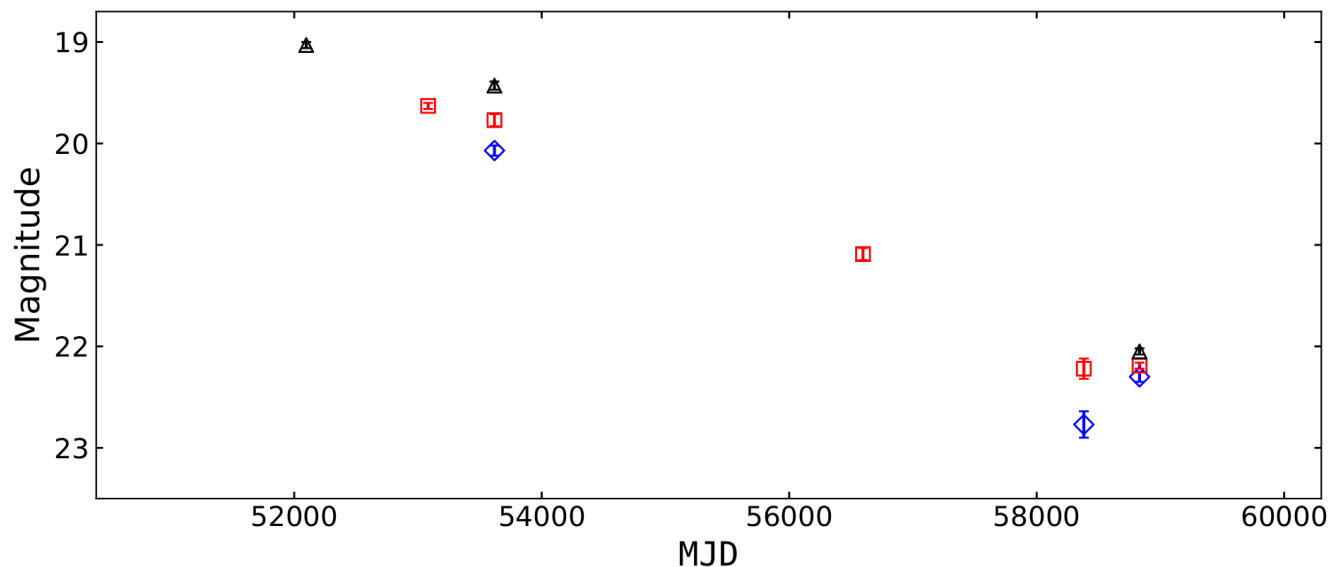
SED J122817.83+440630.8. Черные сплошная и черная пунктирная линии обозначают чернотельную модель, наилучшим образом описывающую наблюдаемое распределение энергии. Треугольники – данные HST/WFC3/UVIS (2014), кружки – данные HST/WFPC2 (1998), квадраты – данные HST/ACS/WFC (2005).

Треугольники – данные HST/WFC3/UVIS (2014), кружки – данные HST/WFPC2 (1998), квадраты – данные HST/ACS/WFC (2005).

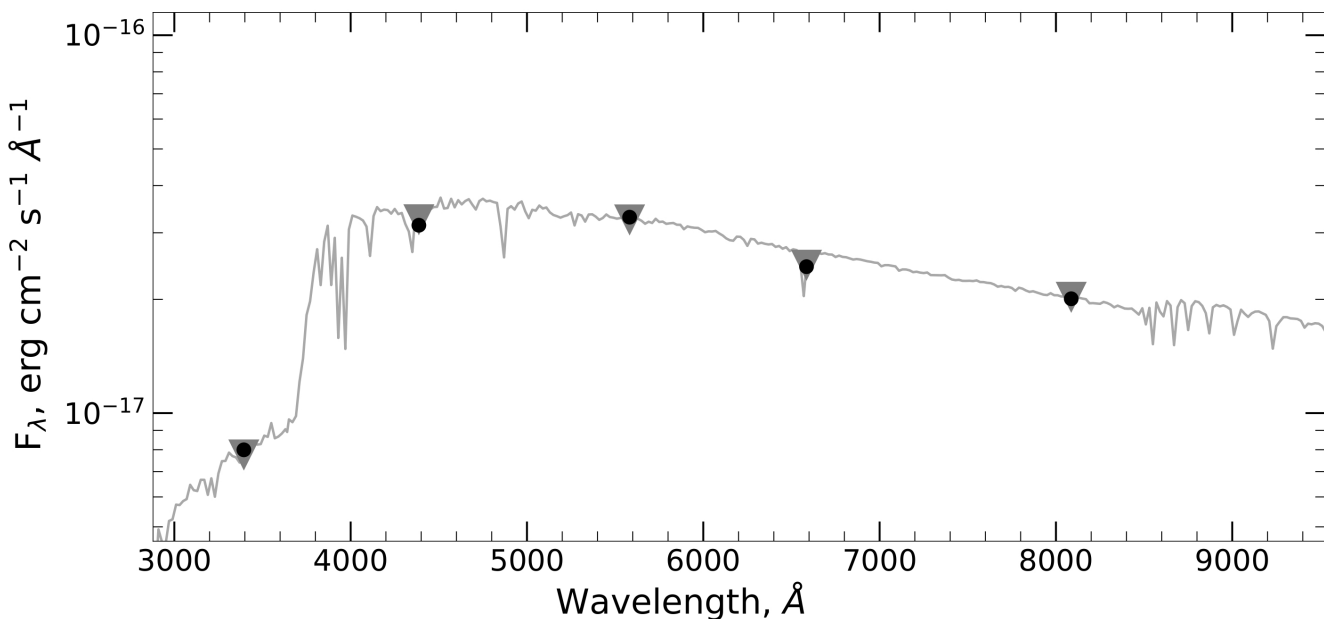
$T_{\text{hot}} = 19000 \pm 1200$ K, $T_{\text{cold}} = 9000 \pm 600$ K при $A_V \approx 0.6^m$ ($A_V = 0.4 \pm 0.2^m$ по туманности)

$\log(L_{\text{bol}} / L_{\text{sun}}) = 5.24 \pm 0.15$

LBV звезды: J025941.54+251421.8



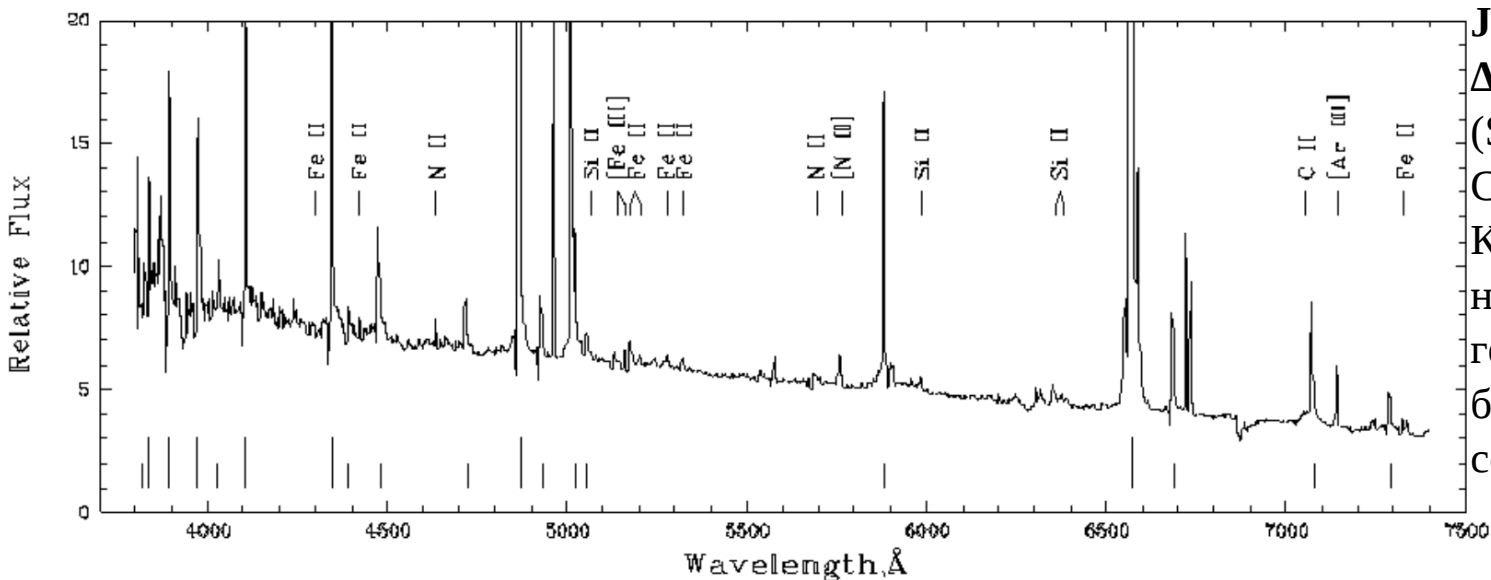
J025941.54+251421.8 (NGC 1156), $\Delta R_c = 2.59 \pm 0.10^m$ с 2004 по 2018 г. (Solovyeva et al. 2019)
 Кривые блеска в полосах V (голубые ромбы), R_c (красные квадраты) и I_c (черные треугольники).



SED J025941.54+251421.8. Серая линия - наиболее подходящая модель Куруца¹. Черные кружки - наблюдаемые потоки по данным HST/ACS/HRC 2005 года, серые треугольники — модельные потоки в фильтрах HST.

¹параметры модели Куруца:
 $[M/H] = -0.5$, $T_{\text{eff}} = 6750 \pm 330 \text{ K}$,
 $\log(g) = 2.00 \pm 0.53$ (при $\chi^2/\text{dof} = 1.28$),
 светимость $L_{\text{bol}} = (7.9 \pm 1.5) \times 10^5 L_{\text{sun}}$,
 радиус $R = 650 \pm 90 R_{\text{sun}}$
 $A_V = 0.90 \pm 0.13^m$ (по туманности)

LBV кандидаты: J004703.27-204708.4



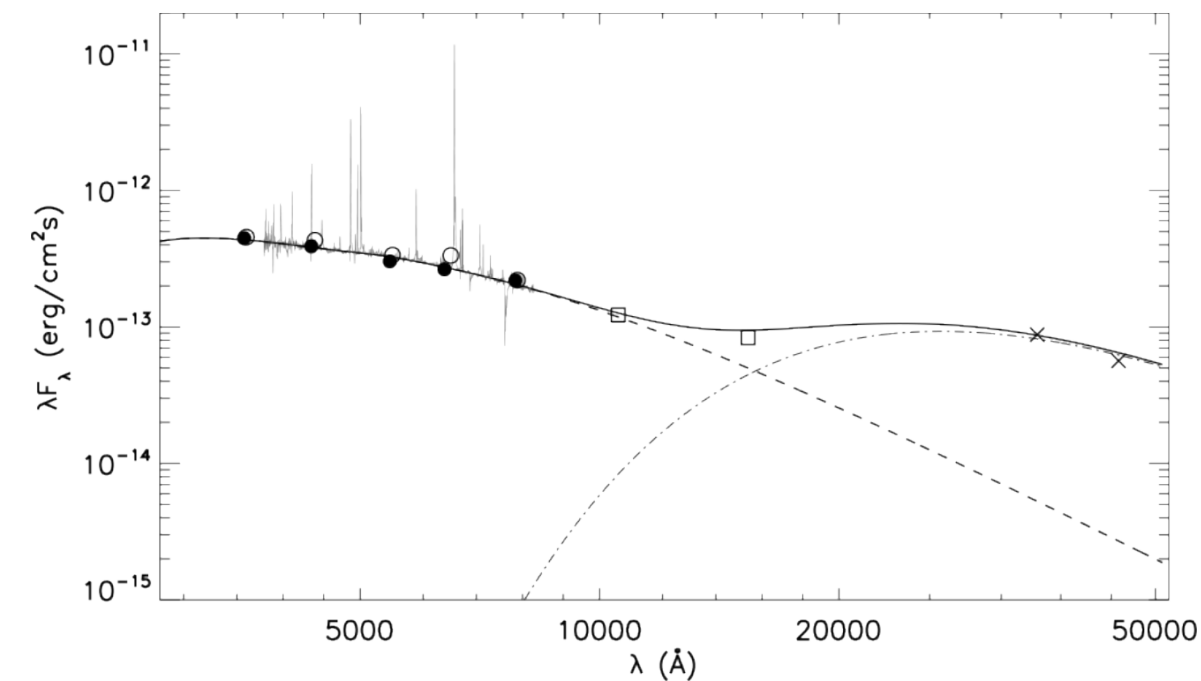
J004703.27-204708.4 (NGC 247)

$\Delta V = 0.88 \pm 0.09^m$ с 2005 по 2011 г.

(Solovyeva et al. 2020)

Спектр получен на Subaru.

Короткие и длинные
неподписанные штрихи - линии
гелия He I и водорода
бальмеровской серии
соответственно.

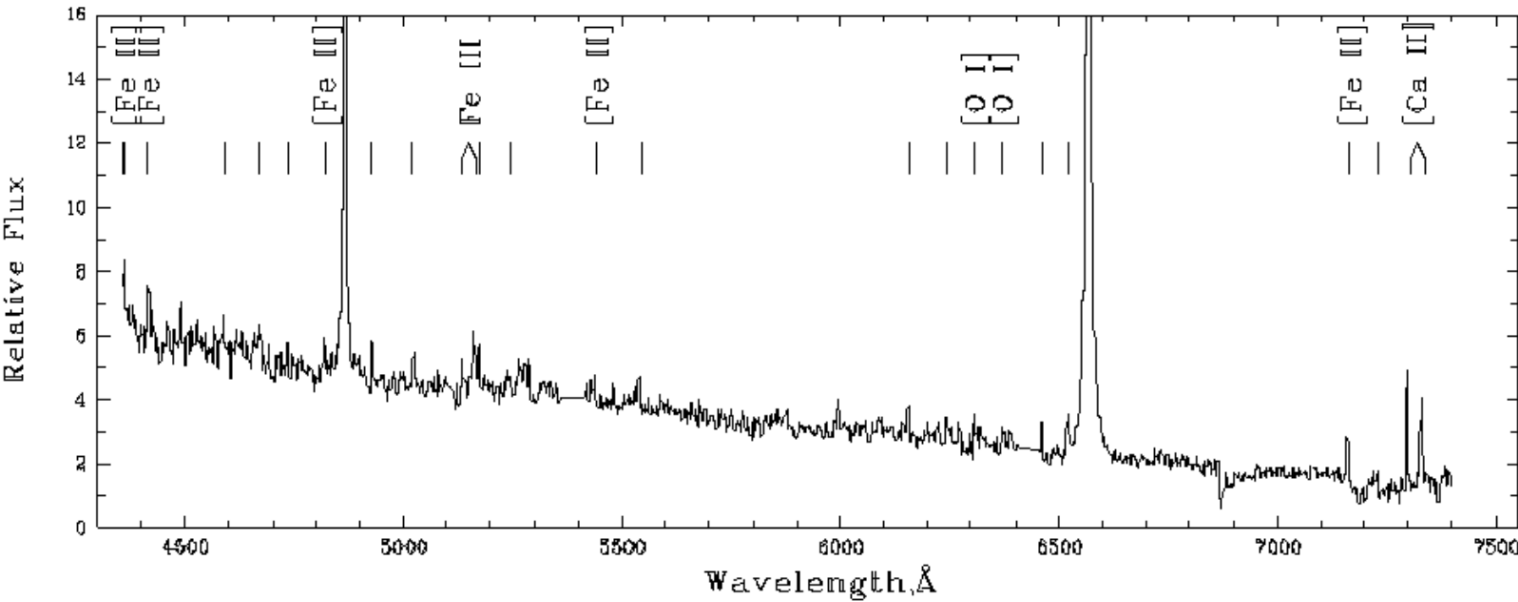


SED J004703.27-204708.4. SED
аппроксимирован двумя моделями bb
(сплошные линии), описывающими излучение
фотосферы звезды (пунктирная линия) и ИК-
избыток (штрихпунктирная линия),
возникающий в пылевой оболочке вокруг
звезды. Круги — фотометрия Subaru (2016),
квадраты — данные HST/WFC3 (2014), ромбы
— Spitzer/IRAC (2012);

$T = 18000 \pm 2000$ К при $A_V \approx 0.9^m$, $T_{\text{dust}} \approx 1400$ К,
 $\log(L_{\text{bol}}/L_{\text{sun}}) = 6.11 \pm 0.20$

$A_V = 0.8^m \pm 0.1^m$ (по туманности)

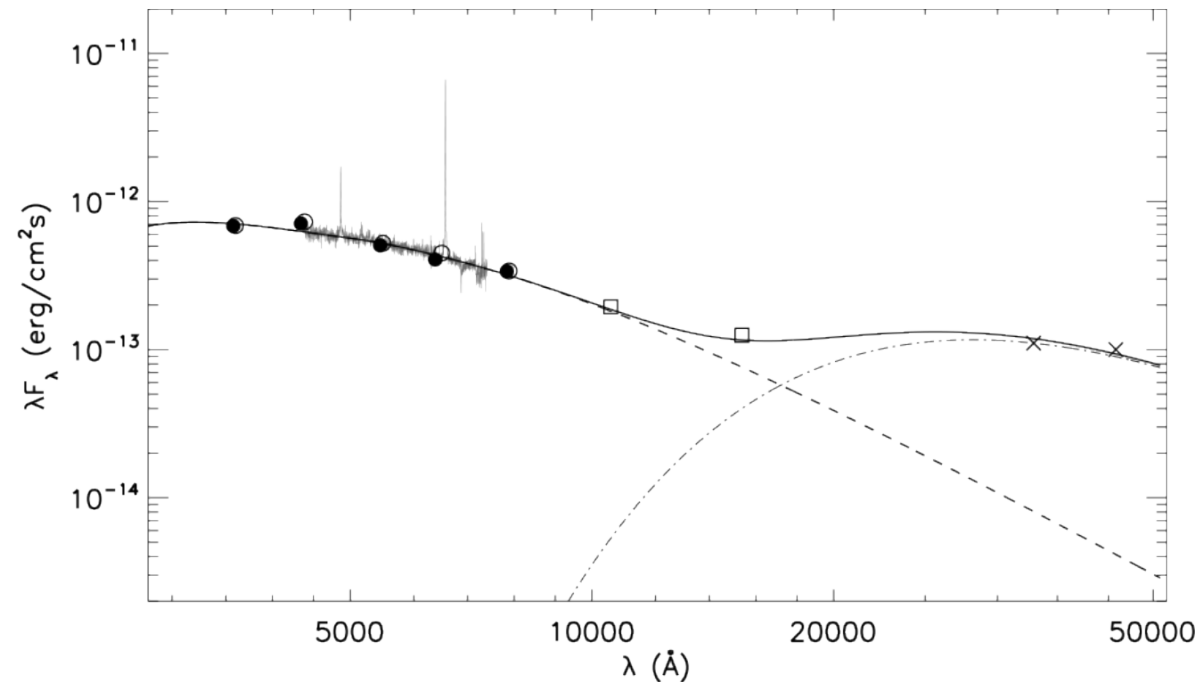
В[е]-сверхгигант J004702.18-204739.93



J004702.18-204739.93 (NGC 247). $\Delta V = 0.29 \pm 0.09^m$ с 2011 по 2018 г. (Solovyeva et al. 2020)

Спектр получен на телескопе SALT. Неподписанные штрихи - линии железа Fe II.

Запрещённые линии [Fe II], [O I] и [Ca II] наблюдаются в спектрах В[е]-SG (Aret et al. 2016; Humphreys et al. 2017)

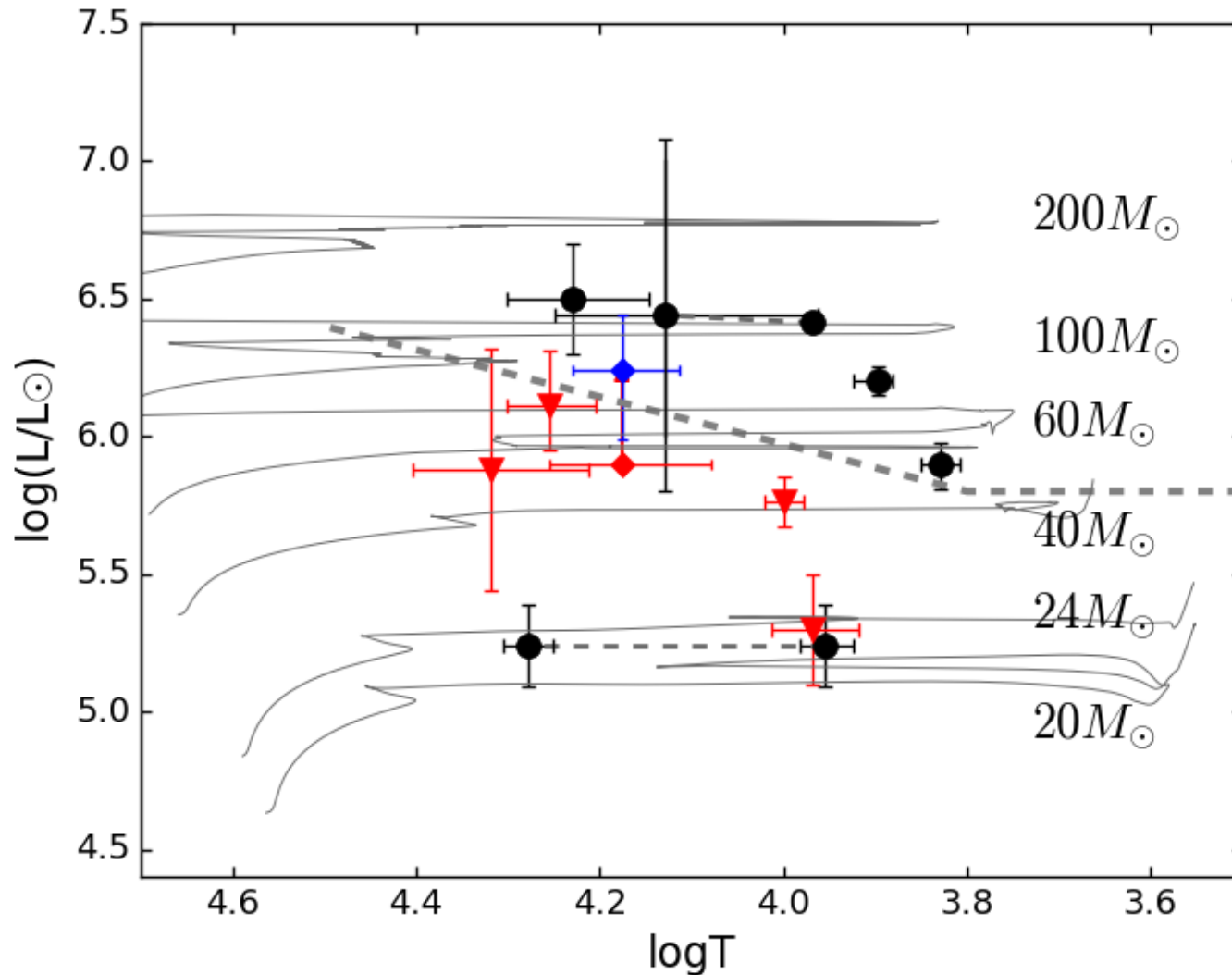


SED J004702.18-204739.93. SED аппроксимирован двумя моделями bb (сплошные линии), описывающими излучение фотосферы звезды (пунктирная линия) и ИК-избыток (штрихпунктирная линия), возникающий в пылевой оболочке вокруг звезды. Кружки — фотометрия Subaru (2016), квадраты — данные HST/WFC3 (2014), ромбы — Spitzer/IRAC (2012);

$T = 15000 \pm 2000$ К при $A_V \approx 0.7^m$, $T_{\text{dust}} \approx 1300$ К,
 $\log(L_{\text{bol}}/L_{\text{sun}}) = 6.24 \pm 0.22$

$A_V = 0.9^m \pm 0.2^m$ (по туманности)

Диаграмма «температура-светимость»



Черные круги — обнаруженные LBV, красные треугольники — LBV кандидаты, синие ромбы — B[e]-сверхгиганты. Черные тонкие пунктирные линии — переходы LBV между состояниями, серые пунктирные линии — предел Хэмфрис — Дэвидсона. Серые кривые — эволюционные треки массивных звёзд (Tang et al. 2014) при металличности $Z = 0.5 Z_{\text{sun}}$.

Спасибо за внимание!