

Моделирование оптических спектров звёзд типа Р Cygni

А. Костенков, С. Фабрика и О. Шолухова

Санкт-Петербургский государственный университет
Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз
kostenkov@sao.ru

8 октября 2019 г.

P Cygni

P Cygni – одна из первых открытых LBV звезд (спектральный класс B1la+), была зарегистрирована во время вспышек 1600 и 1655 годов, в это время ее яркость достигала 3 mag. Сегодня яркость P Cygni составляет 4.8 mag с нерегулярной переменностью $\pm(0.02 - 0.03)$ mag на промежутках времени порядка нескольких лет.

MN112

MN112 впервые была представлена в работе Gvaramadze et al. (2010) и идентифицирована как LBV кандидат на основании исследования окружающей туманности в ИК диапазоне и анализа спектра центральной звезды. MN112 и P Cygni имеют очень близкие спектры с сильными эмиссионными линиями H, He I, N II, Si II и Fe III

Сравнение спектров Р Cygni и MN112

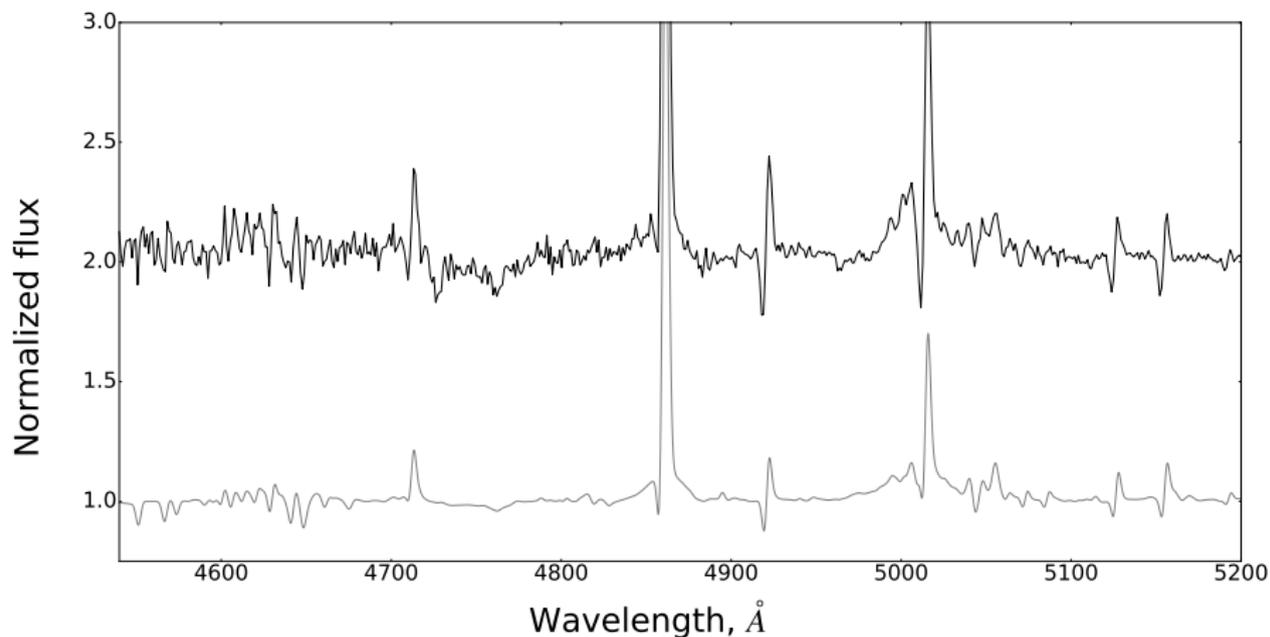


Рис. 1: Сверху: спектр MN112 (Калар Альто, Испания, 2009 год) Снизу: Р Cygni (получен в 1997 году, взят из архива *Elodie*, сглажен с инструментальным профилем 3.4 \AA)

Изменение спектра Р Cygni

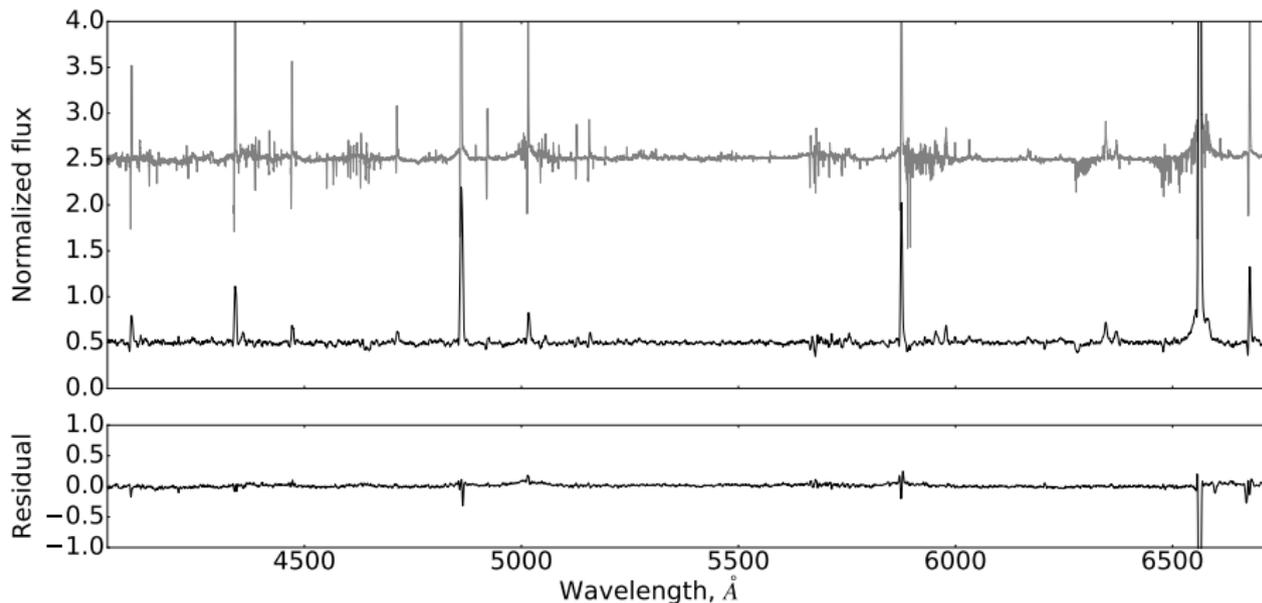


Рис. 2: Сверху: Сплошная серая линия – спектр Р Cygni высокого разрешения, полученный в 1997 (взят из архива *Elodie*), сплошной черной линией отмечен спектр Р Cygni, полученный на БТА в 2009 году. Снизу: разница между спектрами.

Какие параметры можно получить из спектров?

- Цель: получить как можно больше информации из спектра объекта (L , R , T_{eff} , \dot{M} , V_{∞} , β , f_{cl} , химический состав).
- Проблема: только некоторые параметры можно определить независимо (L , V_{∞}), остальные приведенные выше величины комплексно оказывают влияние на спектр.
- Решение: найти как можно больше критериев определения параметров, изолировать зависимости. Пример – определение температуры по отношению линий одного элемента в разных ионизационных состояниях.

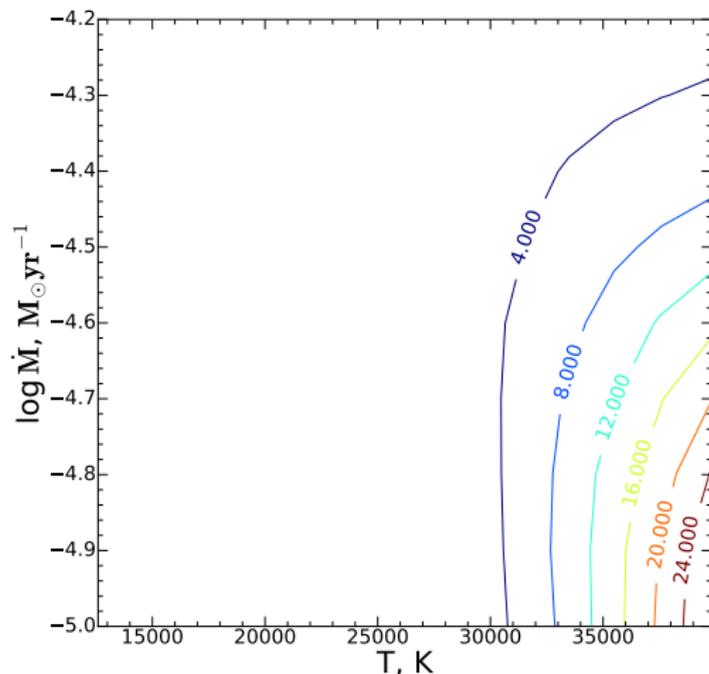


Рис. 3: Диаграмма эквивалентных ширин линии He II $\lambda 4686$ для ветра $V_{\infty} = 300 \text{ km s}^{-1}$, $\beta = 1.0$, $X_{\text{H}} = 40\%$

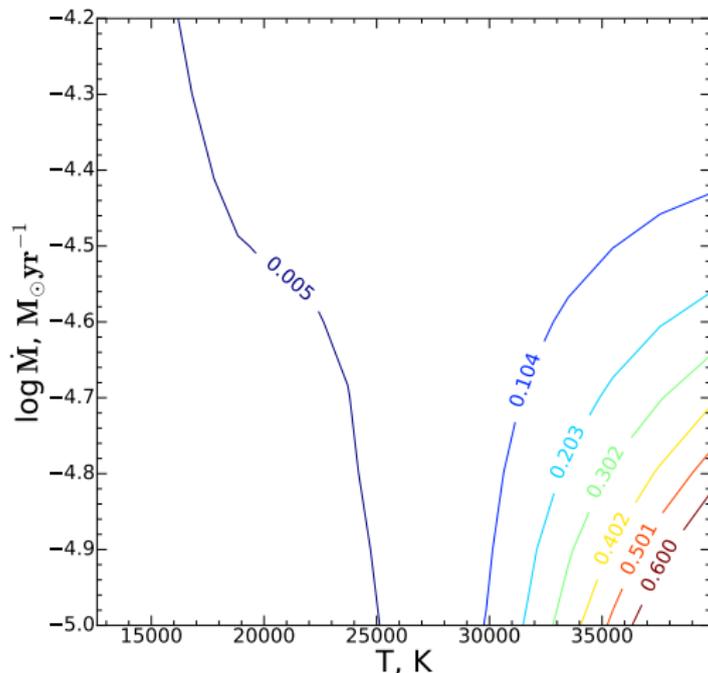


Рис. 4: Диаграмма отношения эквивалентных ширин линий He II $\lambda 4686$ и He I $\lambda 5876$ для ветра $V_{\infty} = 300 \text{ km s}^{-1}$, $\beta = 1.0$, $X_{\text{H}} = 40\%$

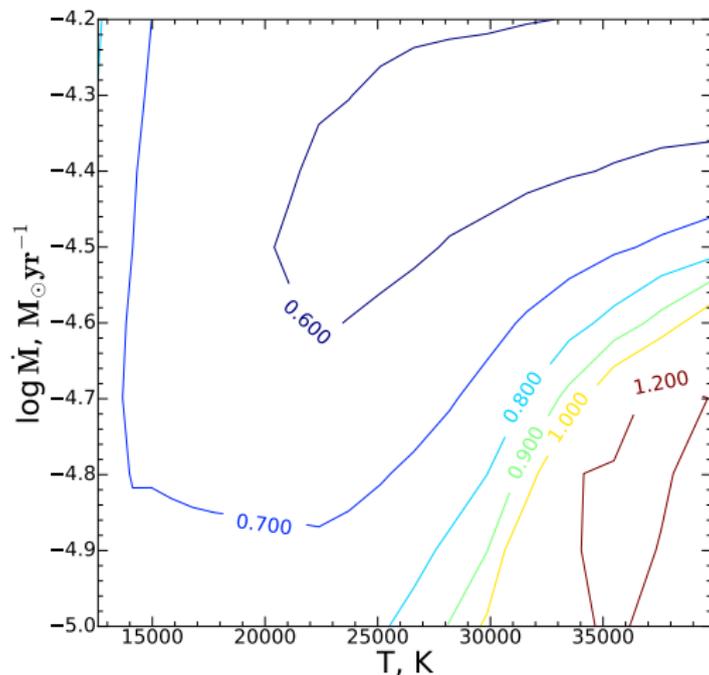


Рис. 5: Диаграмма отношения эквивалентных ширин линий He I $\lambda 6678$ и He I $\lambda 7065$ для ветра $V_{\infty} = 300 \text{ km s}^{-1}$, $\beta = 1.0$, $X_{\text{H}} = 40\%$

Si III $\lambda 4554$, $\lambda 4567$ and $\lambda 4575$

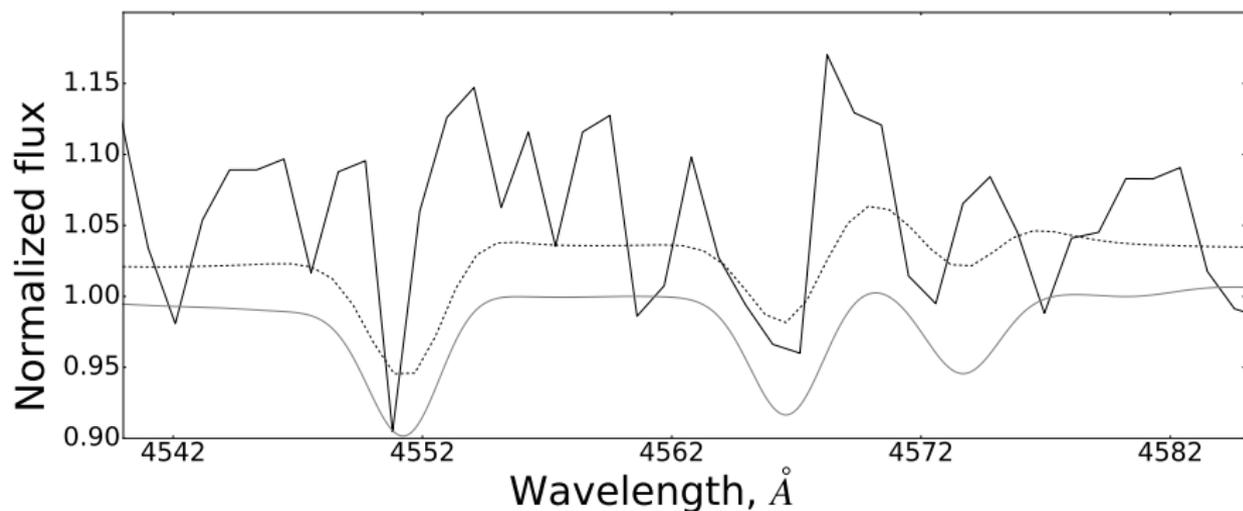


Рис. 6: Линии Si III $\lambda 4554$, $\lambda 4567$ and $\lambda 4575$ в спектре MN112 (черная сплошная линия) и P Cygni (серая сплошная линия). Наилучшая модель для MN112 отмечена черной пунктирной линией.

Косвенное определение температуры

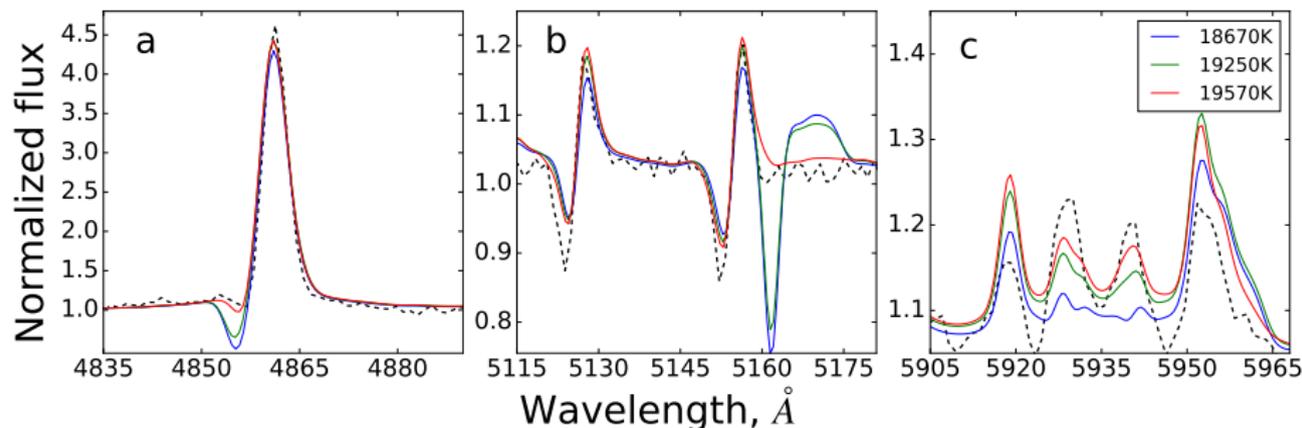


Рис. 7: (a) Абсорбционный компонент линии H β , (b) линии Fe III λ 5127, λ 5156 и Fe II λ 5169, (c) Si II λ 5916, 5959-5961; чувствительные к температуре группы линий N II λ 5915-5960 и Fe III λ 5919-5964 при температурах 18670 K, 19250 K и 19570 K. Пунктирной черной линией отмечен спектр MN112.

Абсорбционный компонент $H\beta$

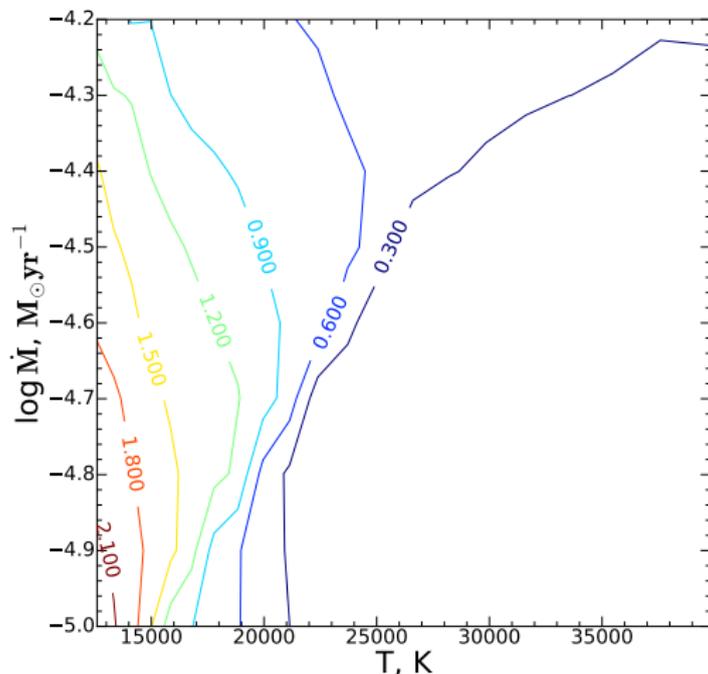


Рис. 8: Диаграмма эквивалентных ширин абсорбционного компонента линии $H\beta$ для ветра $V_{\infty} = 300 \text{ km s}^{-1}$, $\beta = 1.0$, $X_{\text{H}} = 40\%$, $f_{\text{cl}} = 0.3$

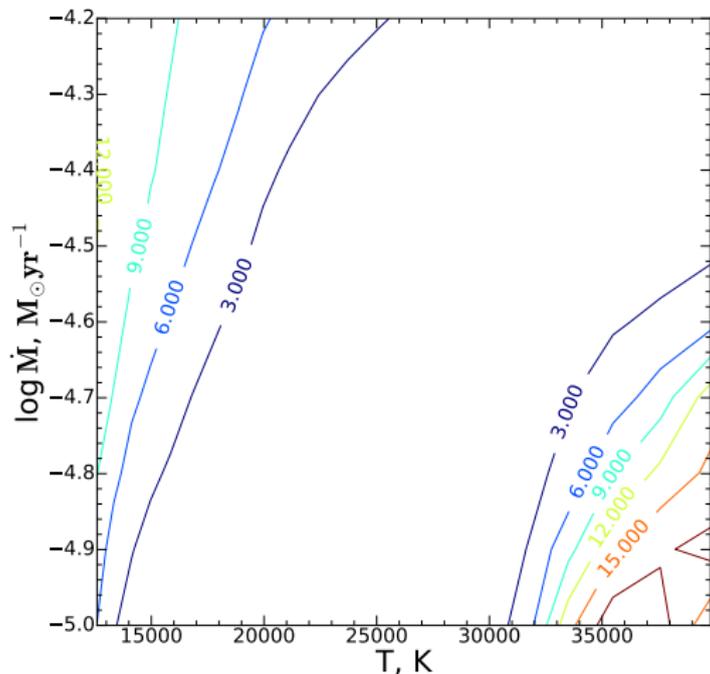


Рис. 9: Диаграмма отношения эквивалентных ширин линий Fe II $\lambda 5169$ и Fe III для ветра $V_{\infty} = 300 \text{ km s}^{-1}$, $\beta = 1.0$, $X_{\text{H}} = 40\%$

Оценка скорости ветра V_∞

- Терминальная скорость ветра V_∞ один из немногих параметров, которым можно независимо оценить скорость ветра.
- Нижние оценки скорости можно получить из смещения абсорбционных компонентов P Cyg профилей мощных водородных линий.
- Более точные оценки V_∞ можно получить по некоторым запрещенным линиям, которые могут формироваться в отдаленных частях ветра при низкой плотности (например, [N II] λ 5755, некоторые [Fe II])

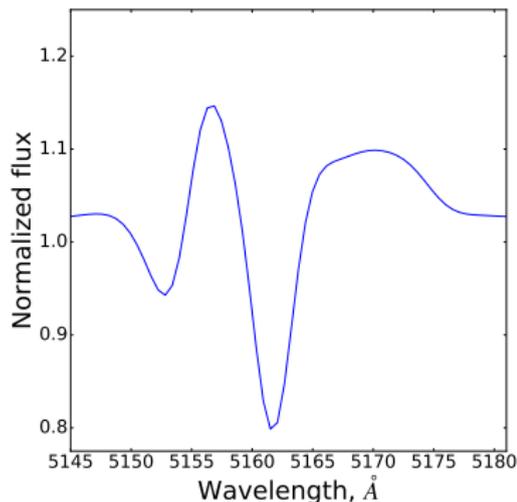


Рис. 10: Линии Fe III λ 5156 и Fe II λ 5169

Скоростной закон ветра β

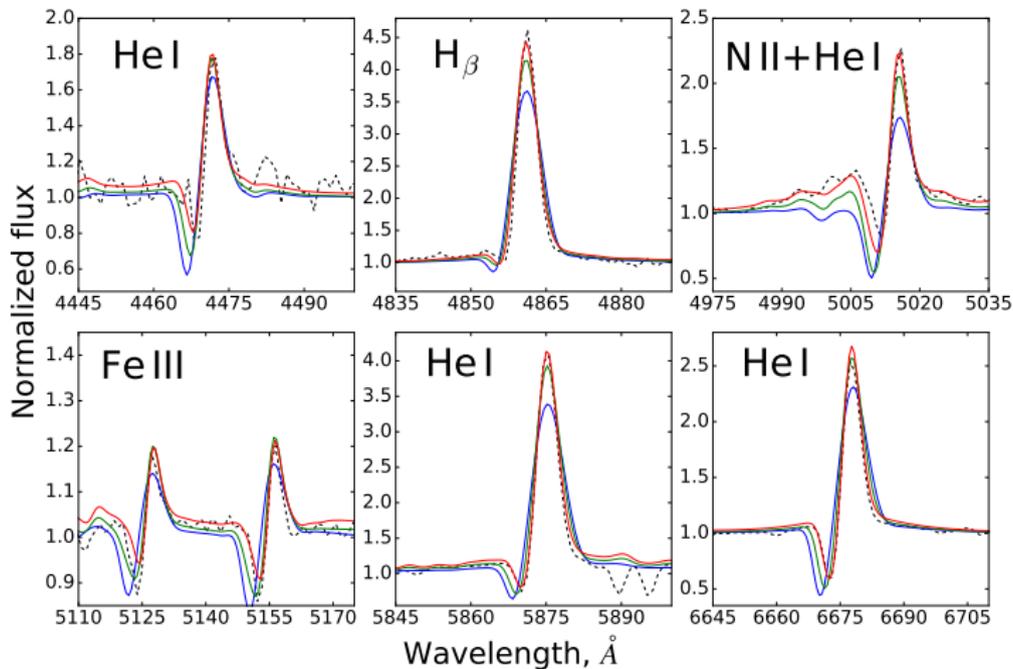
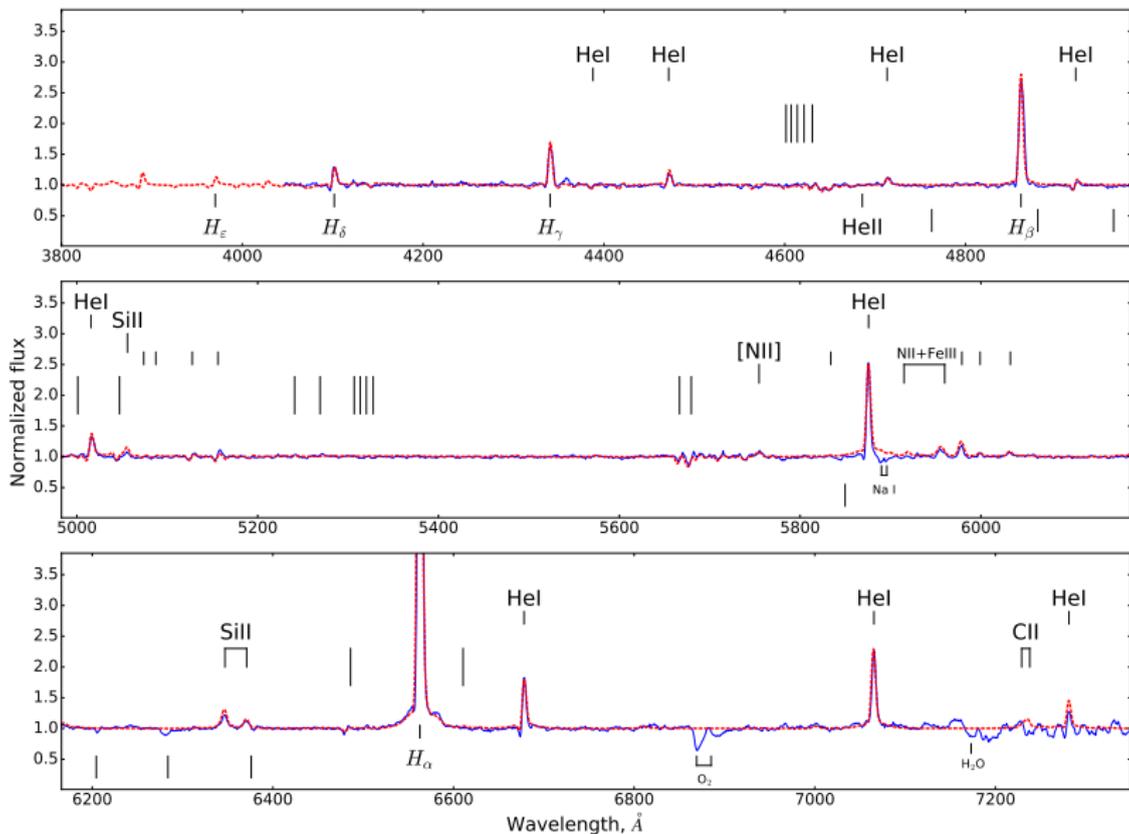


Рис. 11: Влияние скоростного закона на профили линий. Синяя линия соответствует спектру с $\beta = 1.0$, зеленая $\beta = 2.5$, красная $\beta = 4.5$. Пунктирной черной линией отмечен спектр MN112.

Модель Р Cygni



Модель MN112

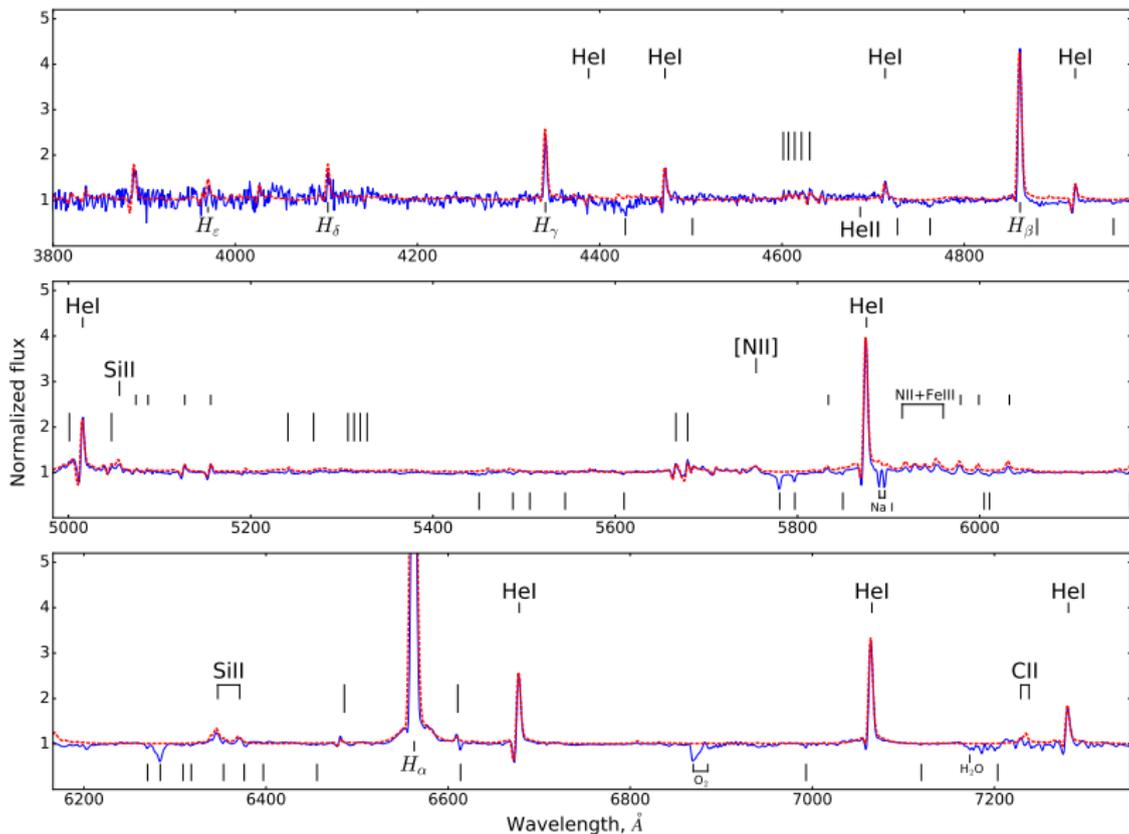


Таблица фундаментальных параметров P Cygni и MN112

	MN112	P Cygni
d [kpc]	6.93	1.37 (1.8)
L_* [L_\odot]	1.0×10^6	$4.0(6.1) \times 10^5$
R [R_\odot]	84	62 (76)
T_* [kK]	19.5 ± 0.5	18.7 ± 1.0
\dot{M} [$M_\odot \text{yr}^{-1}$]	$(1.4 \pm 0.2) \times 10^{-4}$	$(2.5 \pm 0.5)(3.3) \times 10^{-5}$
V_∞ [km s^{-1}]	388 ± 20	185
V_0 [km s^{-1}]	20	30
V_{turb} [km s^{-1}]	15	15
β	4.5	2.5
f	0.1	0.5
$X_{\text{He}}/X_{\text{H}}$	0.33	0.29
X_{N}/X_\odot	6.8	6.8
X_{C}/X_\odot	< 0.1	0.3
X_{Si}/X_\odot	1.0	1.1
X_{Fe}/X_\odot	1.0	1.0

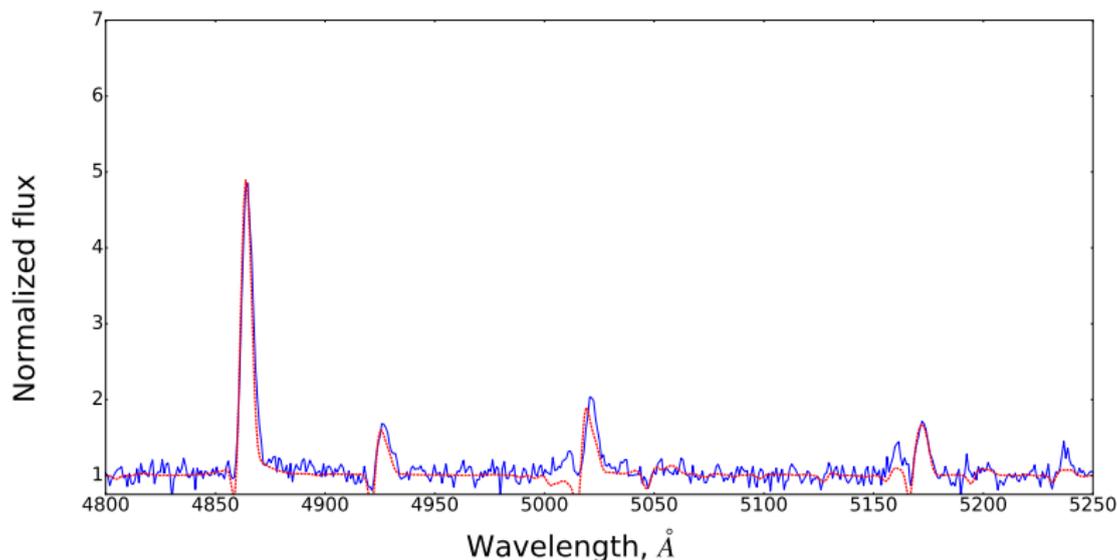


Рис. 14: Моделирование спектра LBV NGC4736_2. Красным отмечена лучшая модель с $\dot{M} = 3.0 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$, $L = 1.0 \times 10^6 L_{\odot}$, $T_* = 16000 \text{ K}$, $V_{\infty} = 300 \text{ km s}^{-1}$, $\beta = 1.0$, $X_{\text{H}} = 33\%$.

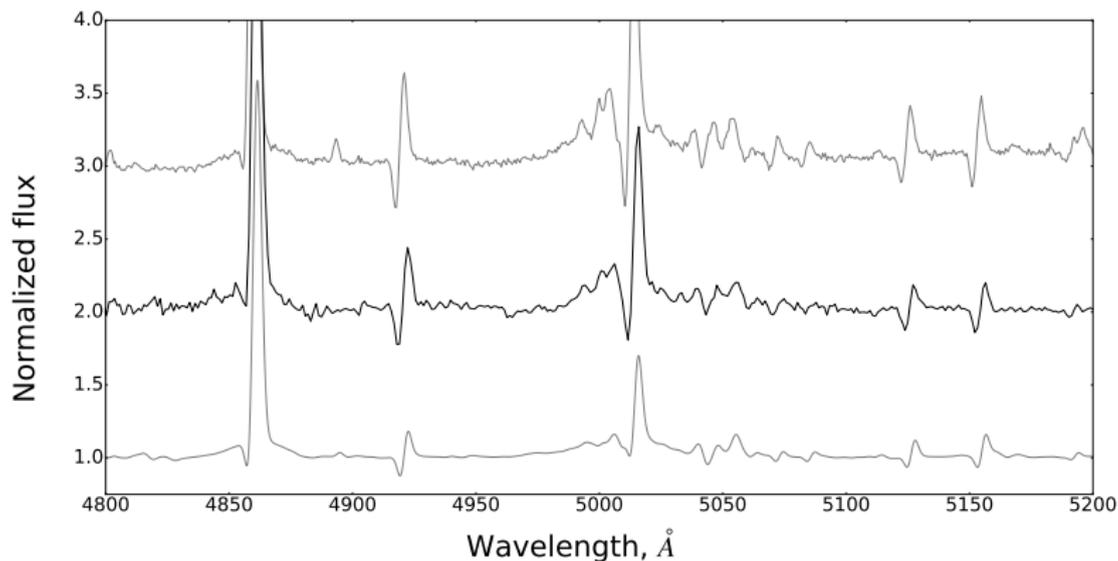


Рис. 15: Сравнение спектра AF And со спектрами MN112 и P Cygni.

V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, S. Fabrika, O. Sholukhova, L. N. Berdnikov, A. M. Cherepashchuk, and A. V. Zharova. MN112: a new Galactic candidate luminous blue variable. *MNRAS*, 405:520–524, June 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16469.x.