

Спектроскопический поиск эволюционных изменений орбитального периода $WR+OB$ затменных двойных систем CQ Cep и CX Cep

И.А. Шапошников,
А.М. Черепашук, А.В. Додин, К.А. Постнов

«Физика звёзд: теория и наблюдения»

ГАИШ МГУ

26-30 июня 2023

Темпы потери массы звездами WR важны для изучения их эволюции и формирования компактных объектов

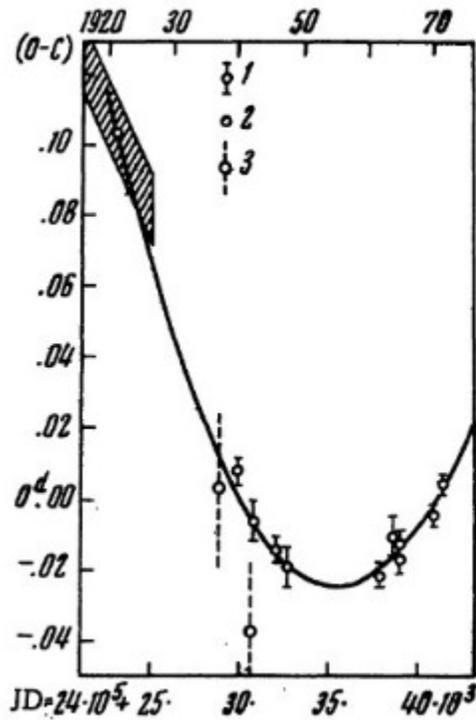
Наиболее надежно dM/dt определяются по изменениям орбитальных периодов dP/dt короткопериодических систем типа WR+OB

В свою очередь, dP/dt определяется из анализа затмений, которые наблюдаются лишь для ограниченного числа WR+OB

Для поиска dP/dt спектроскопических двойных WR+OB систем можно сравнивать кривые лучевых скоростей, полученные в разные эпохи

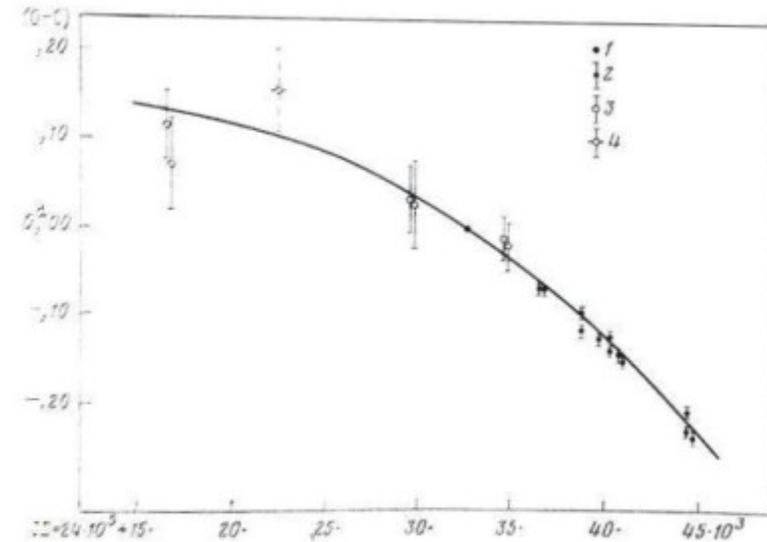
Поиск изменений орбитальных периодов WR+OB систем: история вопроса

$$(O - C) = A \cdot E^2 + B \cdot E + C, \text{ where } \dot{P} = 2 \cdot A$$



Khaliullin (1974)
V444 Cyg

Fig. 2. Residuals $O - C$ for V444 Cygni:
1) photoelectric; 2) photographic; 3) spectroscopic observations.



Antokhina et al (1982)
CQ Cep

Орбитальная эволюция массивных тесных двойных систем

Консервативный
обмен

Перетекание вещества
с одной звезды на другую
через внутреннюю точку Лагранжа

$$\frac{dP}{P} = -3 \frac{m_2 - m_1}{m_1 m_2} dm_1$$

Мода Джинса

Радиальный звёздный ветер
уносит угловой момент из системы

$$\frac{dP}{P} = -2 \frac{d(m_1 + m_2)}{(m_1 + m_2)}$$

$$\frac{\dot{P}}{P} = -3 \frac{\dot{M}_{WR}^{(2)}}{M_{WR}} (q - 1) + 3 \frac{\dot{M}_O^{(2)}}{M_{WR}} (q - 1) + 2 \frac{\dot{M}_{WR}^{(1)}}{M_{WR}} \frac{q}{1 + q},$$

Проблема: простая модель не учитывает размеров звёзд, что может оказаться существенным в случае массивных ТДС

Влияние конечных размеров звезд в ТДС на орбитальную эволюцию

Рассмотрим систему из двух сферических приливно-синхронизированных звёзд, вращающихся по круговой орбите, имеющих радиальный симметричный ветер и/или перетекание вещества

Введем параметры системы и коэффициенты, характеризующие относительный вклад того или иного процесса в темп потери массы каждой звездой:

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_{1,w} + \dot{M}_{1,t} = \alpha \dot{M}_1 + \beta \dot{M}_1, \quad \alpha + \beta = 1, \quad (\text{A1})$$

$$\dot{M}_2 = \dot{M}_{2,w} - \dot{M}_{1,t} = x \dot{M}_1 - \beta \dot{M}_1. \quad (\text{A2})$$

Вычислим орбитальный момент и вклад его изменений в эволюцию периода:

$$J = \frac{M_1 M_2}{M} \omega a^2 = \frac{M_1 M_2}{M} \sqrt{GMa}, \quad M = M_1 + M_2. \quad (\text{A3})$$

$$\frac{\dot{J}}{J} = \frac{\dot{M}_1}{M_1} + \frac{\dot{M}_2}{M_2} - \frac{\dot{M}}{M} + \frac{1}{2} \frac{\dot{a}}{a} = \frac{\dot{J}_{\text{out}}}{J} \quad (\text{A4})$$

$$\frac{\dot{P}}{P} = -\frac{1}{2} \frac{\dot{M}}{M} + \frac{3}{2} \frac{\dot{a}}{a} = \frac{\dot{M}}{M} - 3 \frac{\dot{M}_1}{M_1} - 3 \frac{\dot{M}_2}{M_2} + 3 \frac{\dot{J}_{\text{out}}}{J}. \quad (\text{A5})$$

После интегрирования по поверхности звёзд получим выражение для производной углового момента, уносимого ветром:

$$\frac{dJ_{\text{out},i}}{dt} = \dot{M}_{i,w} \omega \left(a_i^2 + \frac{2}{3} R_i^2 \right), \quad i = 1, 2. \quad (\text{A6})$$

Окончательная формула для векового изменения периода:

$$\frac{\dot{P}}{P} = -\frac{\dot{M}_1}{M_1} \left\{ 3 + 3\frac{x-\beta}{q} - \frac{\alpha+x}{1+q} - 3\frac{1+q}{q} \left(\alpha \left[\left(\frac{q}{1+q} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{R_1}{a} \right)^2 \right] + x \left[\left(\frac{1}{1+q} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{R_2}{a} \right)^2 \right] \right) \right\} \quad (\text{A7})$$

Частные случаи:

$$\alpha = 0, x = 0 \text{ and } \beta = 1: \dot{P}/P = -3(\dot{M}_1/M_1)(1 - 1/q)$$

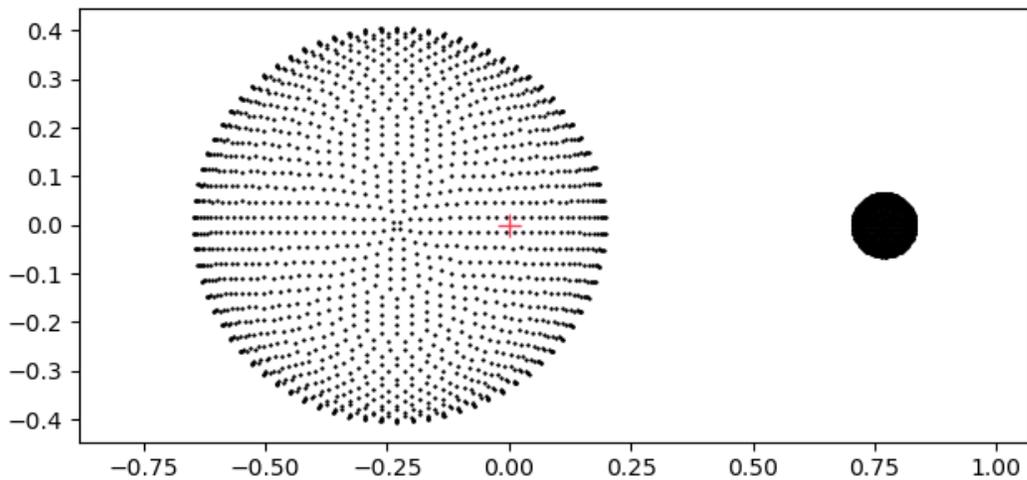
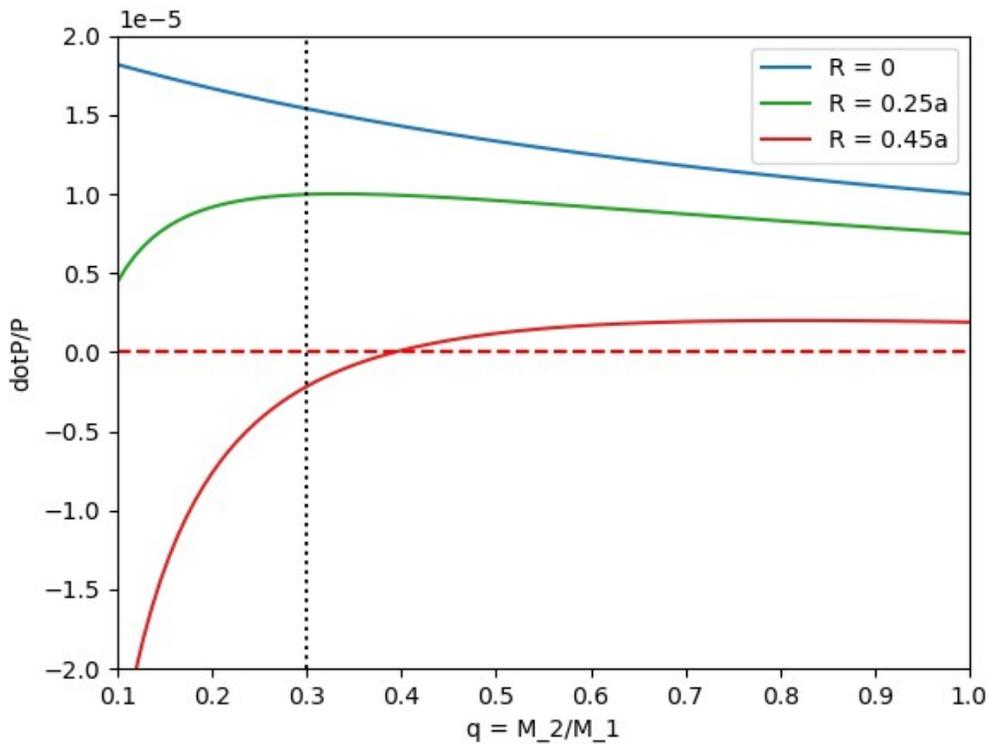
$$\beta = 0, R_1 = R_2 = 0 \text{ and } \alpha = 1: \dot{P}/P = -2\dot{M}/M.$$

Для случая, в котором отсутствует перенос массы, имеем

$$(\beta = 0, \alpha = 1),$$

$$\frac{\dot{P}}{P} = -2 \frac{\dot{M}_1}{M_1} \frac{1+x}{1+q} \left\{ 1 - \frac{(1+q)^2}{q(1+x)} \left[\left(\frac{R_1}{a} \right)^2 + x \left(\frac{R_2}{a} \right)^2 \right] \right\}. \quad (\text{A8})$$

Второй член в фигурных скобках отсутствует для точечных масс. В случае же звезд с конечными радиусами для очень больших и очень малых q он может превосходить единицу, что приводит к *отрицательным* dP/dt при наличии одного лишь сферического звездного ветра!



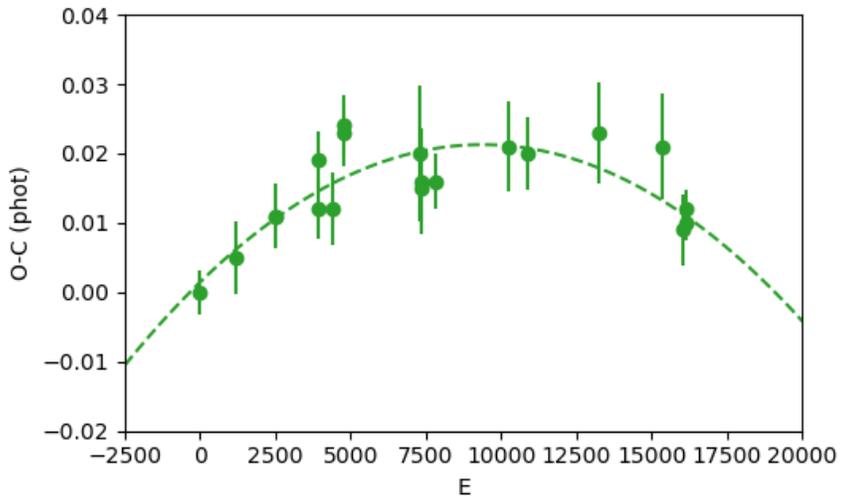
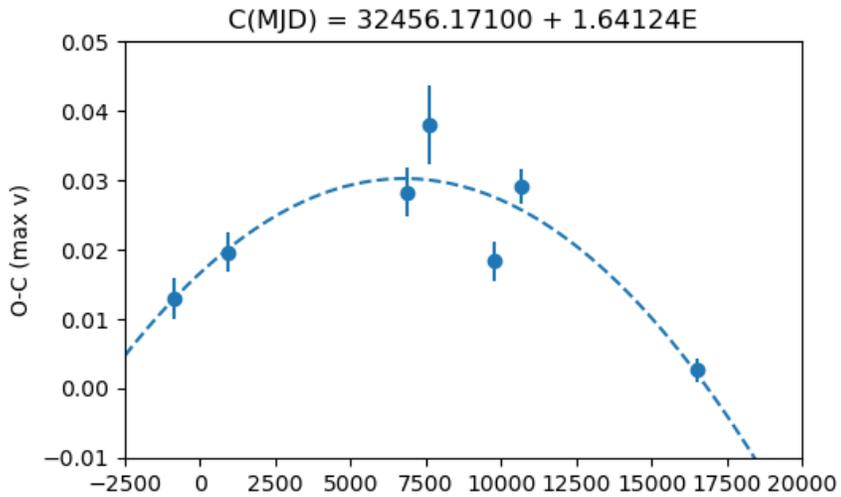
**Спектроскопический поиск изменения
орбитального периода двойных WR+OB
систем:
случай систем CQ Cep (1.64d) и CX Cep (2.13d)**

Был проведен анализ архивных фотометрических и спектральных наблюдений

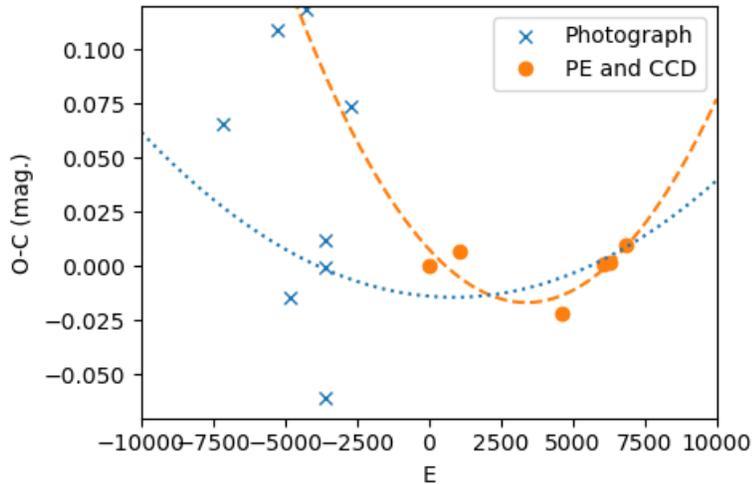
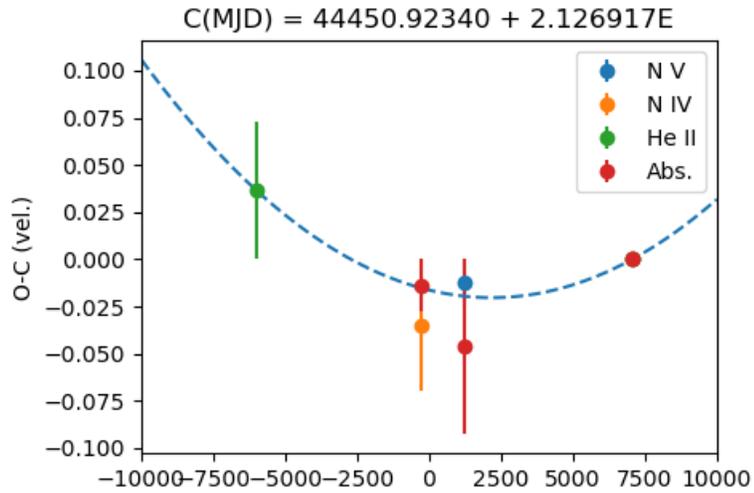
В 2020-2023 г. проводились регулярные спектральные измерения на базе КГО ГАИШ МГУ (2.5-м телескоп, спектрограф TDS, R~2000)

Поиск эволюционных изменений периода

CQ Cep



CX Cep



Оценки dP/dt

CQ Cep:

$$\dot{P} = -0.0151 \pm 0.0013 \text{ s yr}^{-1}$$

CX Cep:

$$\dot{P} = 0.054 \pm 0.009 \text{ s yr}^{-1}$$

Учет конечных размеров в случае СХ Сер

Был проведен расчет для двух предположений о размерах звезд:

$R_O = 8.5R_\odot$, $R_{WR} = 7.0R_\odot$ (из анализа формы кривой блеска)

$R_O = R_{WR} = 0$ (простая модель)

С учетом радиусов получаем $\dot{M}_{WR}^{(w)} = -(9.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-6} M_\odot \text{yr}^{-1}$

Из простой модели $\dot{M}_{WR} = -(5.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-6} M_\odot \text{yr}^{-1}$

Учет конечных размеров в случае CQ Сер

Данный случай осложнен необходимостью учёта возможного массообмена

Если эволюция P обусловлена только перетеканием массы от OB-звезды к WR, то $|\dot{M}_{OB}^{(t)}| = (0.97 \pm 0.09) \cdot 10^{-6} M_{\odot} yr^{-1}$

При наличии радиальных ветров от WR и OB и условии, что около 10 % массы, теряемой OB-звездой, принимает участие в массообмене, общий темп потери массы OB-звездой, обеспечивающий наблюдаемое значение dP/dt , составляет $|\dot{M}_{OB}| = 8.2 \cdot 10^{-6} M_{\odot} yr^{-1}$

Учёт конечных размеров звёзд сокращает эту величину до диапазона $|\dot{M}_{OB}| = (4.8 - 6.2) \cdot 10^{-6} M_{\odot} yr^{-1}$, представляющегося более вероятным для звезды O9-B0 V

Итоги работы и перспективы

Из анализа фотометрических и спектроскопических измерений затменных двойных

WR+OB систем CQ Сер и CX Сер были получены оценки темпа эволюции орбитального периода dP/dt

Для системы CQ Сер надежно подтверждено вековое уменьшение P

Для системы CX Сер обнаружено увеличение P

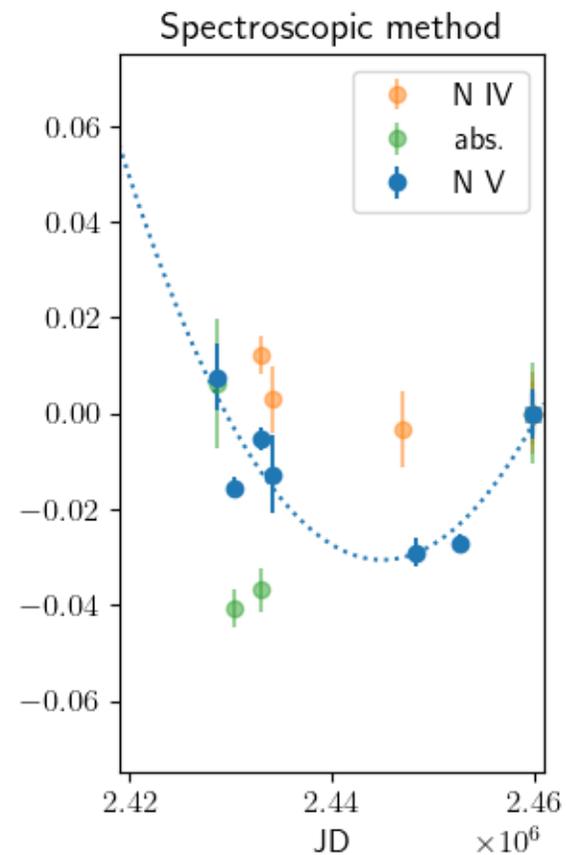
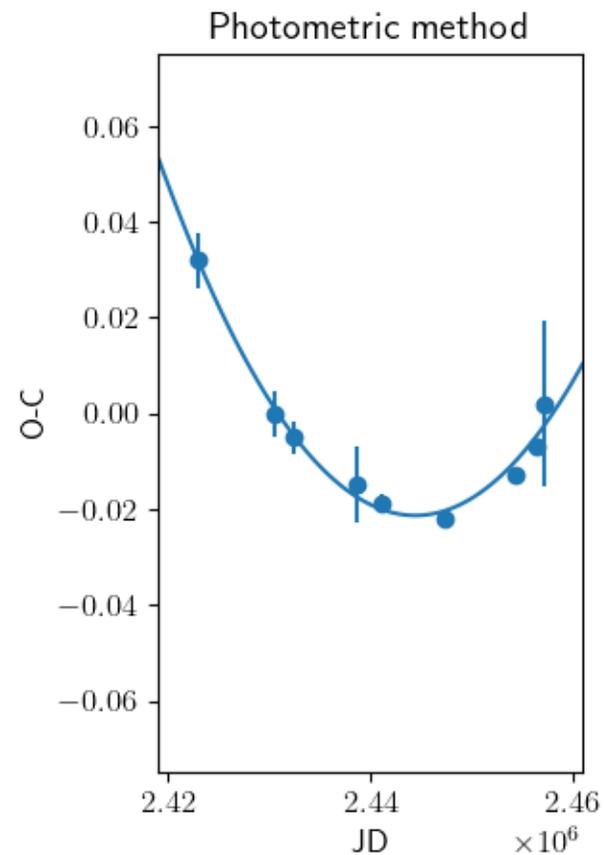
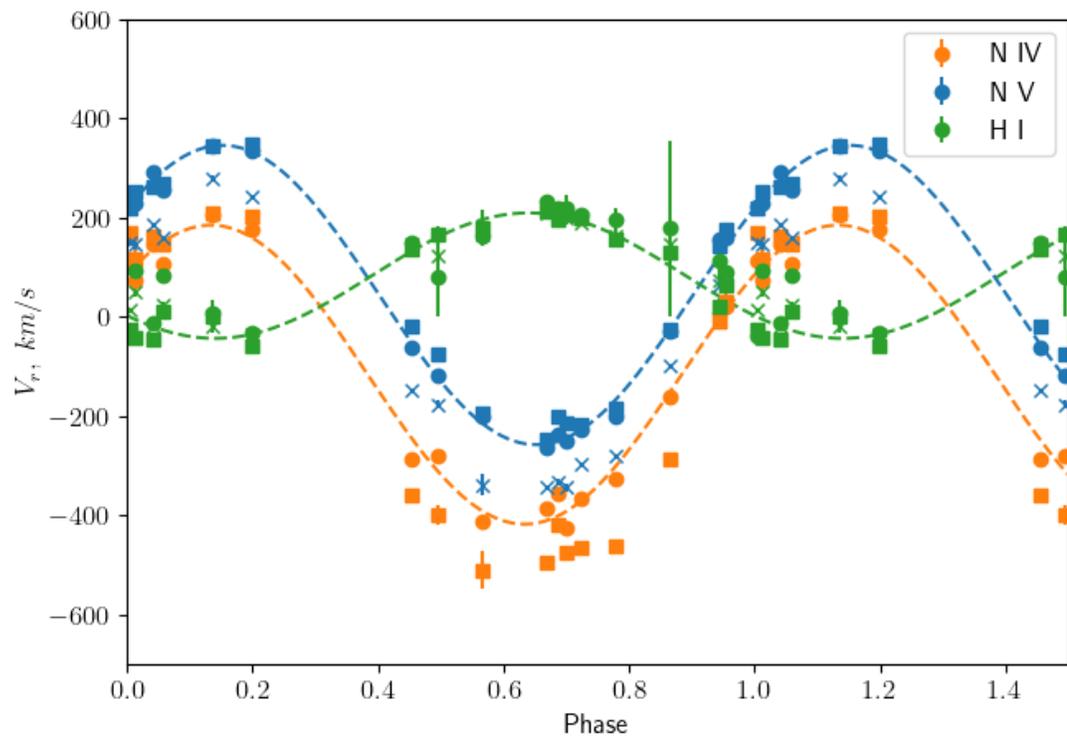
Оценки dP/dt , полученные фотометрическим и спектроскопическим методами, находятся в хорошем согласии друг с другом

Это открывает перспективы поиска dP/dt у WR+OB-систем, для которых не наблюдаются затмения и имеются архивные спектроскопические измерения

Выполнен учет конечных размеров звёзд в ТДС при оценке dM/dt на основе наблюдаемого dP/dt

I. Shaposhnikov, A. Cherepashchuk, A. Dodin, K. Postnov
MNRAS, vol. 523 (1), p. 1524–1537,
<https://doi.org/10.1093/mnras/stad1491>

V444 Суг: предварительные результаты



Спасибо за внимание!