

Летняя школа Фонда «БАЗИС» — 2025
«Актуальные вопросы современной теоретической астрофизики»

Распределения масс релятивистских объектов и звезд Вольфа-Райе в тесных двойных звездных системах

Шапошников И.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга
МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет

iv.shaposhnikov@gmail.com

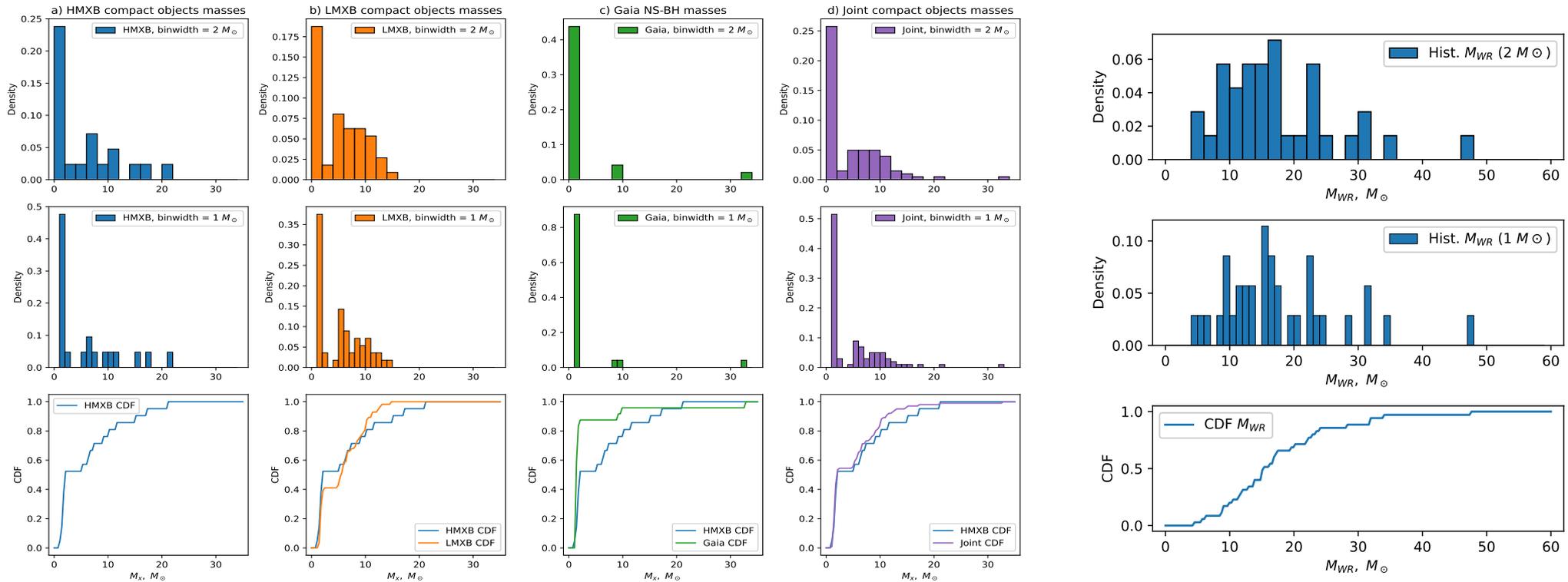
Введение

- Звезды Вольфа-Райе (WR) I типа населения Галактики являются обнаженными невырожденными гелиевыми ядрами первоначально массивных звезд, потерявших основную часть своих водородных оболочек либо вследствие обмена масс в тесных двойных системах (ТДС), либо в результате интенсивной потери массы в виде звездного ветра. Звезды WR в конце эволюции формируют CO-ядра, которые коллапсируют, генерируя взрывы сверхновых типа Ib/c, и формируют релятивистские объекты – нейтронные звезды (НЗ) и черные дыры (ЧД).
- С учетом накопленного за последние десятилетия наблюдательного материала по орбитальным параметрам рентгеновских двойных и ТДС типа WR+OB представляет интерес сравнить распределение финальных масс CO-ядер звезд WR, эволюционных предшественников релятивистских объектов, с распределением масс релятивистских объектов в рентгеновских двойных системах.

Наблюдательный материал

- Ранний каталог - Cherepashchuk et al. *Highly evolved close binary stars: Catalog*. – Taylor & Francis (1996)
- Каталог орбитальных параметров ТДС типа WR+ОВ (Черепашук и Шапошников, 2025)
- Neumann et al. *XRBCats: Galactic High Mass X-ray Binary Catalogue*, *A&A*, 677, A134 (2023)
- Fortin et al. *A catalogue of high-mass X-ray binaries in the Galaxy: From the INTEGRAL to the Gaia era*, 671, A149 (2023)
- Avakyan et al. *XRBCats: Galactic low-mass X-ray binary catalogue*, *A&A* 675, A199 (2023)
- Fortin et al. *A catalogue of low-mass X-ray binaries in the Galaxy: From the INTEGRAL to the Gaia era*, *A&A*, 684, A124 (2024)
- Уточнения масс для отдельных объектов: SS433 (Cherepashchuk et al., *New Astronomy*, 103, 102060, 2023), V518 Per (Cherepashchuk et al., *MNRAS*, 531, 4917, 2024)
- Широкие двойные, открытые по наблюдениям спутника Gaia (El-Badry et al. 2024a; El-Badry et al. 2024b; El-Badry et al. 2023a; El-Badry et al. 2023b; Gaia Collaboration 2024)

Сводное распределение по массам компактных объектов в двойных системах и звезд WR в ТДС типа WR+OB



Алгоритм расчета масс СО-ядер звезд WR перед коллапсом

Черепашук А.М., АЖ, 78, 145 (2001)

- Пусть имеется зависимость вида: $\dot{M}_{WR} = -kM_{WR}^\alpha$.

Требуется найти массу WR на момент завершения эволюции и финальную массу ее СО-ядра

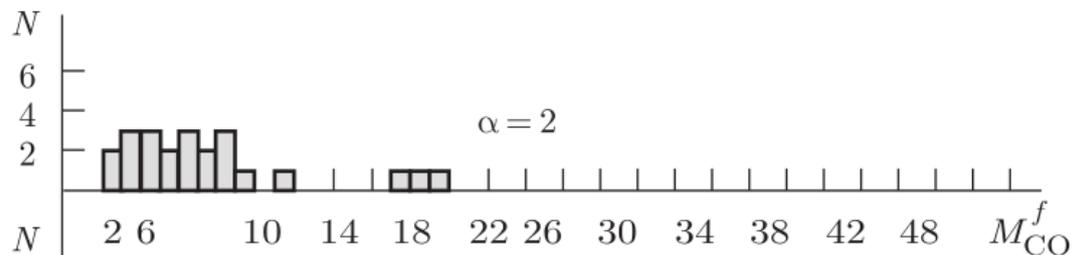
- Оценка времени эволюции звезды WN: $T \approx \frac{1.74 \cdot 10^6}{\sqrt{M_{WR}/M_\odot}}$ лет

- Для учета изменения массы и времени эволюции применяется итерационный процесс: находятся последовательные приближения для M_{WR}^f и T до достижения сходимости (за примерно 10 итераций поправка к T - менее 1 года)

- Конечная масса СО-ядра определяется по следующей аппроксимационной формуле (Paczynski, 1971; Юнгельсон и Масевич, 1982):

$$\frac{M_{CO}}{M_\odot} \approx 0.45 \left(\frac{M_{He}}{M_\odot} \right)^{1.2}$$

Наблюдаемое распределение по массам СО-ядер звезд WR перед коллапсом: ранние результаты



$$M_{\text{WR}}(t) = M_{\text{WR}}^i \exp(-7 \cdot 10^{-7} t), \quad \alpha = 1,$$

$$M_{\text{WR}}(t) = \frac{M_{\text{WR}}^i}{1 + 7 \cdot 10^{-8} M_{\text{WR}}^i t}, \quad \alpha = 2,$$

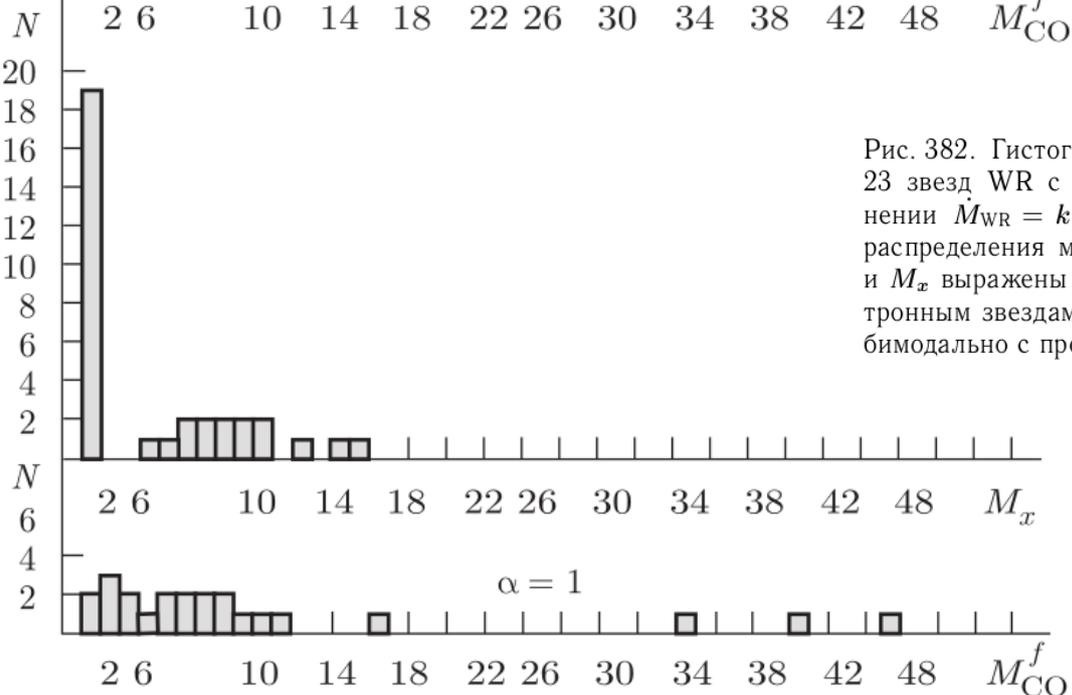
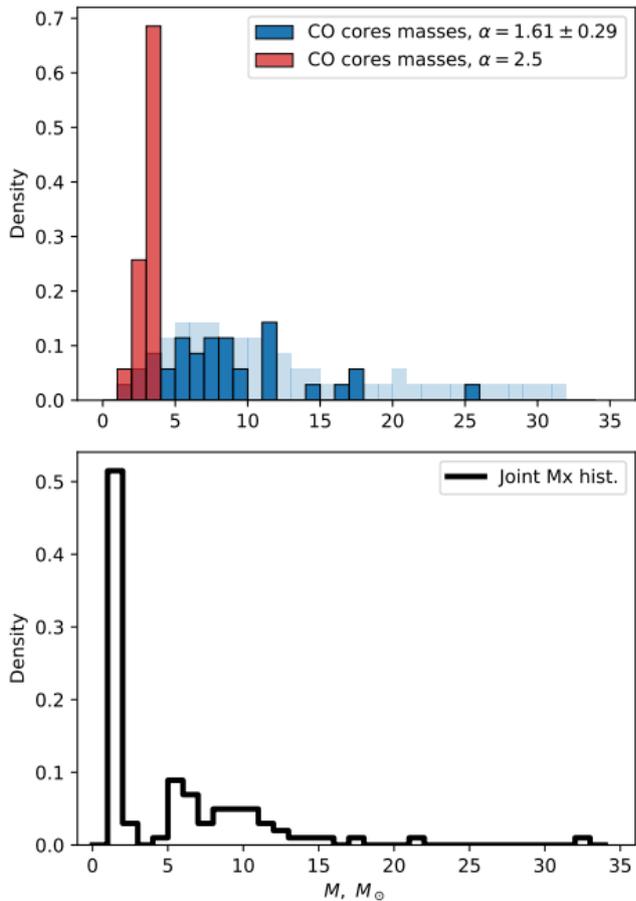


Рис. 382. Гистограмма распределения конечных масс углеродно-кислородных ядер M_{CO}^f для 23 звезд WR с известными массами (нижний график соответствует случаю $\alpha = 1$ в уравнении $\dot{M}_{\text{WR}} = k M_{\text{WR}}^\alpha$, верхний — случаю $\alpha = 2$). В середине рисунка показана гистограмма распределения масс M_x для 34 релятивистских объектов в двойных системах (массы M_{CO}^f и M_x выражены в солнечных единицах). Высокий пик в диапазоне $1-2 M_\odot$ соответствует нейтронным звездам. Распределение M_{CO}^f непрерывно в диапазоне $2-10 M_\odot$, а распределение M_x бимодально с провалом в области значений масс $M_x = 2-4 M_\odot$. (Из обзора Черепашука, 2003)

Черепашук А.М., Тесные двойные звезды. Часть II, Гл. VIII, § 9 б)

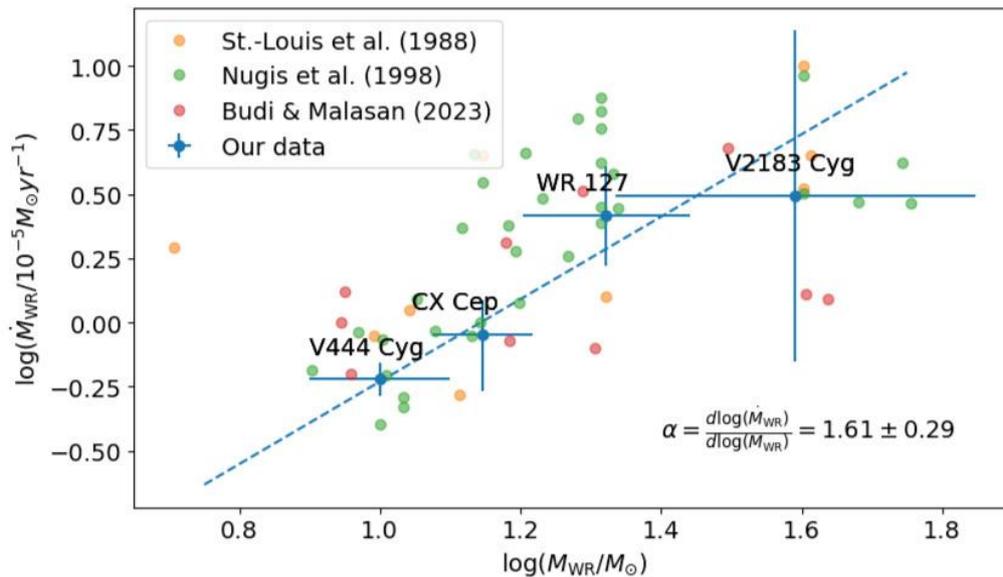
Черепашук А.М., УФН, 173, 345-384 (2003)

Наблюдаемое распределение по массам СО-ядер звезд WR перед коллапсом: последние результаты



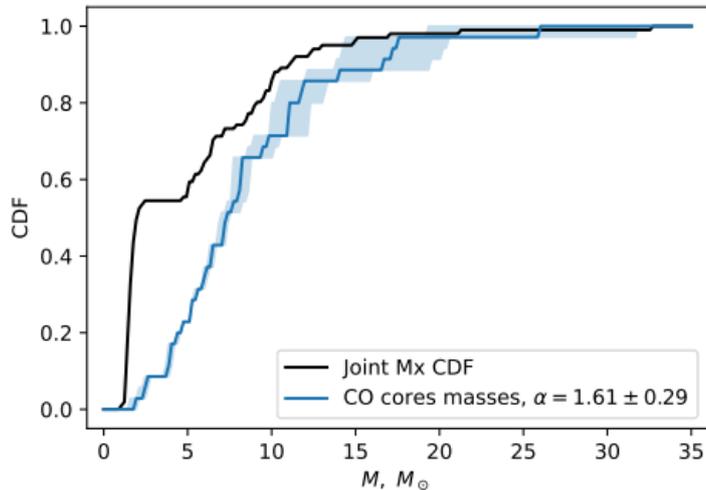
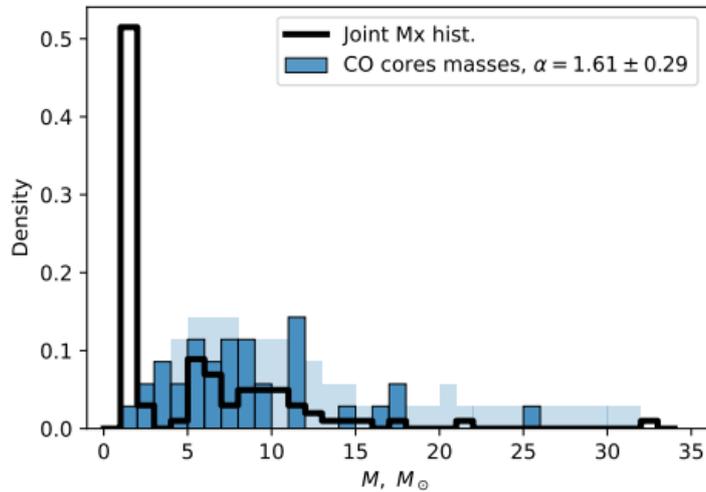
$$\dot{M}_{WR} = - (0,6-1,0) \cdot 10^{-7} \left(\frac{M_{WR}}{M_{\odot}} \right)^{2,5}$$

Langer, N., A&A, 220, 135 (1989) - «Эффект сходимости»



Shaposhnikov I.A., Proceedings of the VAK-2024 conference, 87 (2024)

Выводы



- На основе имеющихся наблюдательных данных построены распределения по массам для звезд WR в ТДС типа WR+OB и распределение по массам компактных объектов в двойных разных типов (преимущественно тесных)
- По расширенной выборке НЗ и ЧД с измеренными массами подтверждены обнаруженные ранее аномалии («mass gap» примерно между 2 и 5 массами Солнца)
- По основе наблюдаемого распределения по массам звезд WR оценено распределение их масс их СО-ядер к концу эволюции
- При используемых в расчете параметрах в зависимости темпа потери массы от массы, определенных по наблюдениям орбитальной эволюции ряда ТДС типа WR+OB, распределение масс СО-ядер оказывается достаточно широким, однако не обнаруживает явного соответствия с распределением масс НЗ и ЧД

Спасибо за внимание!

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда
(грант 23-12-00092)*