

Поправка в скрижали:
молодые и **металлические** звезды типа
RR Лиры в диске нашей Галактики

Василий Белокуров

Institute of Astronomy, Cambridge
Center for Computational Astrophysics, New York

RR Lyrae From Binary Evolution: Abundant, Young and Metal-Rich

Alexey Bobrick^{1*}, Giuliano Iorio^{2,3,4†}, Vasily Belokurov^{5,6}, Joris Vos⁷,
Maja Vučković⁸, Nicola Giacobbo⁹

¹*Technion - Israel Institute of Technology, Physics Department, Haifa, Israel 32000*

²*Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università di Padova, vicolo dell'Osservatorio 3, IT-35122, Padova, Italy*

³*INAF - Osservatorio Astronomico di Padova, vicolo dell'Osservatorio 5, IT-35122 Padova, Italy dell'Osservatorio 3, IT-35122, Padova, Italy*

⁴*INFN - Padova, Via Marzolo 8, I-35131 Padova, Italy*

⁵*Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge CB3 0HA, UK*

⁶*Center for Computational Astrophysics, Flatiron Institute, 162 5th Avenue, New York, NY 10010, USA*

⁷*Astronomical Institute of the Czech Academy of Sciences, CZ-25165, Ondřejov, Czech Republic*

⁸*Instituto de Física y Astronomía, Universidad de Valparaíso, Gran Bretaña 1111, Playa Ancha, Valparaíso 2360102, Chile*

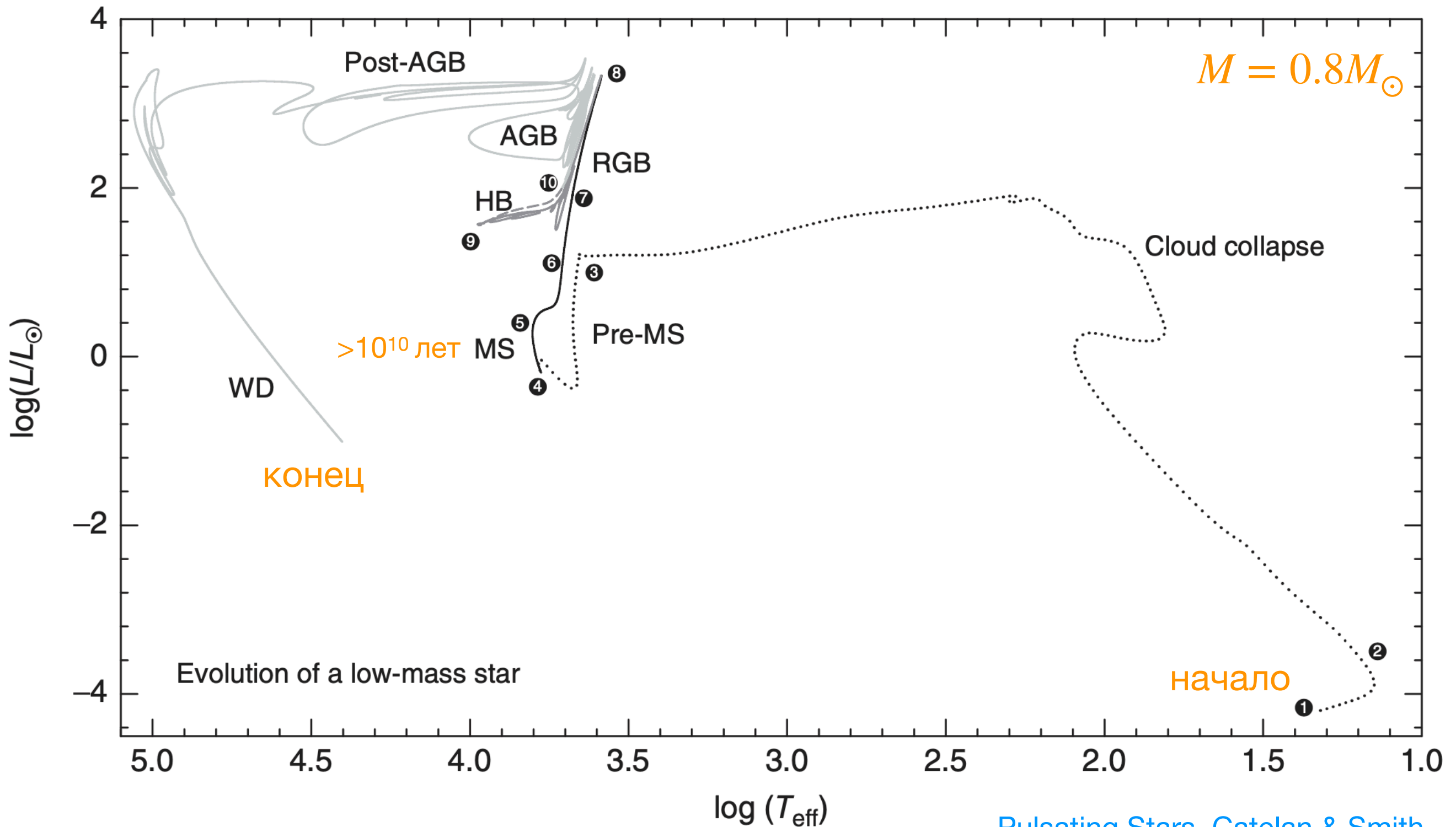
⁹*School of Physics and Astronomy & Institute for Gravitational Wave Astronomy, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK*

Accepted XXX. Received YYY; in original form ZZZ

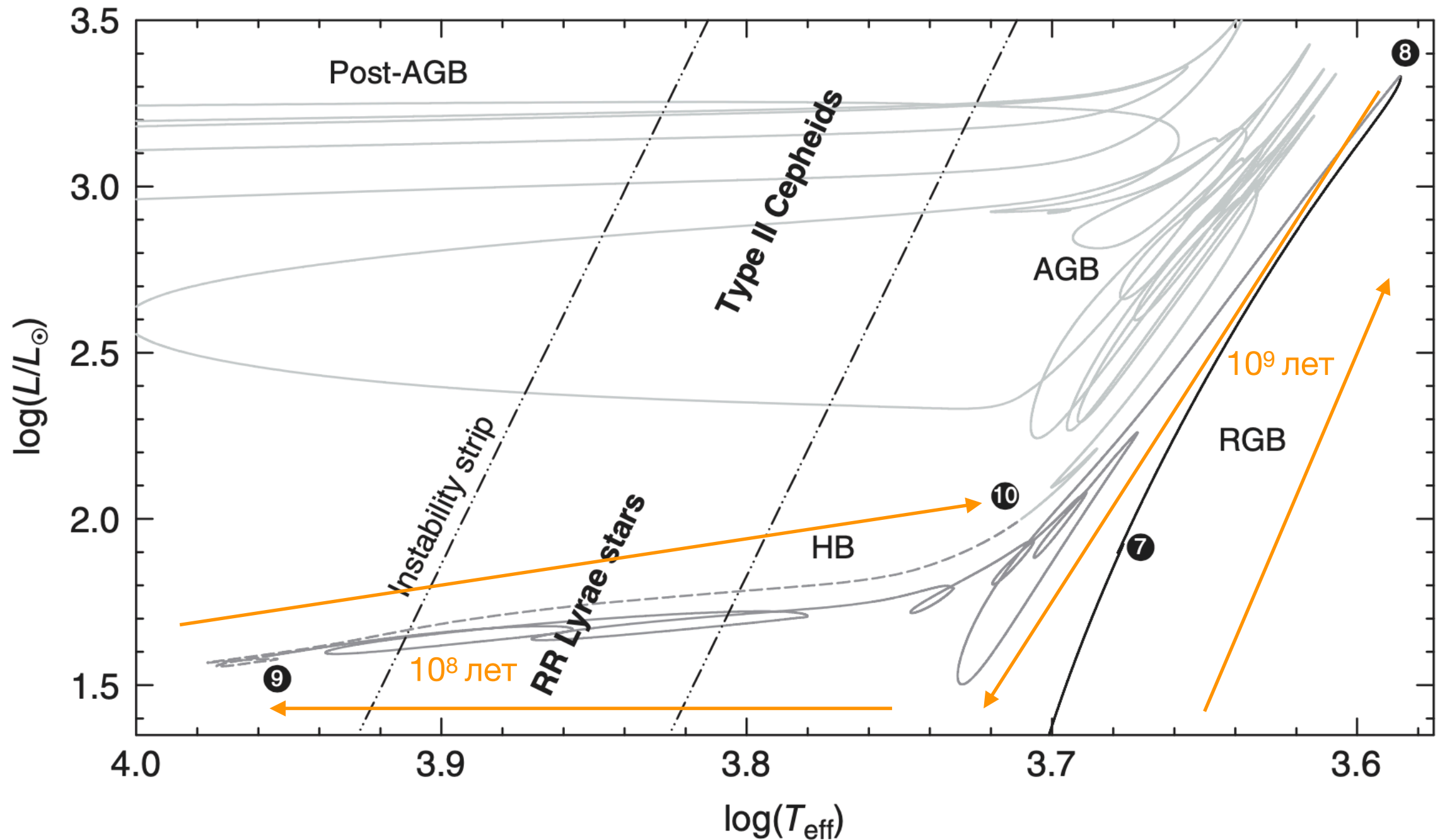
ABSTRACT

RR Lyrae are a well-known class of pulsating horizontal branch stars widely used as tracers of old, metal-poor stellar populations. However, mounting observational evidence shows that a significant fraction of these stars may be young and metal-rich. Here, through detailed binary stellar evolution modelling, we show that all such metal-rich RR Lyrae can be naturally produced through binary interactions. Binary companions of such RR Lyrae partly strip their progenitor's envelopes during a preceding red giant phase. As a result, stripped horizontal branch stars become bluer compared to their isolated stellar evolution counterparts and thus end up in the instability strip. In contrast, in the single evolution scenario, the stars can attain such colours only at large age and low metallicity. While RR Lyrae from binary evolution generally can have any ages and metallicities, the Galactic population is relatively young (1 – 9 Gyr) and dominated by the Thin Disc and the Bulge. We show that Galactic RR Lyrae from binary evolution are produced at rates compatible with the observed metal-rich population and have consistent G-band magnitudes, Galactic kinematics and pulsation properties. Furthermore, these systems dominate the RR Lyrae population in the Solar Neighbourhood. We predict that all metal-rich RR Lyrae have a long-period ($P \gtrsim 1000$ d) A, F, G or K-type companion. Observationally characterising the orbital periods and masses of such stellar companions will provide valuable new constraints on mass and angular momentum-loss efficiency for Sun-like accretors and the nature of RR Lyrae populations.

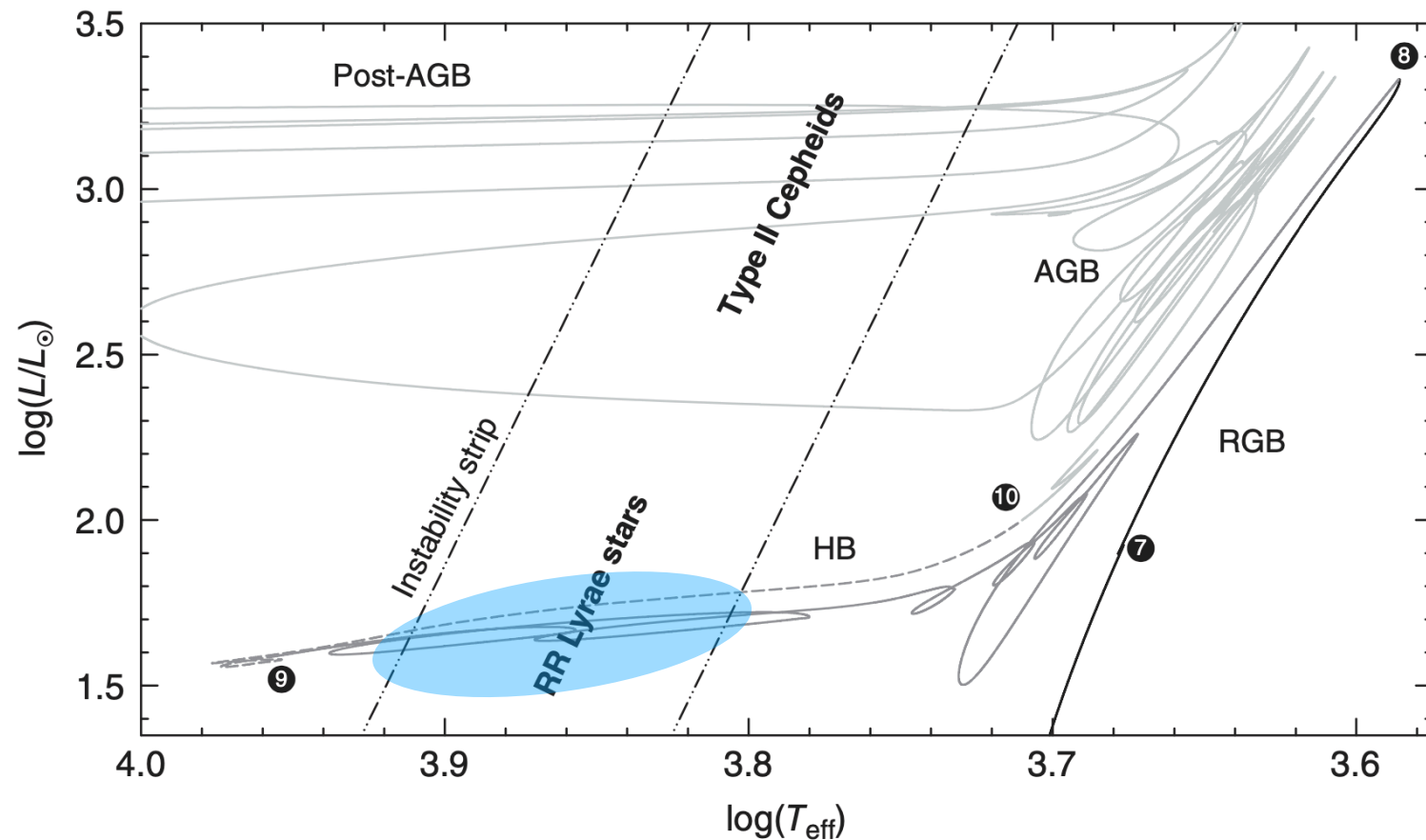
Эволюция звезды с $M < 2M_{\odot}$



Эволюция звезды с $M < 2M_{\odot}$

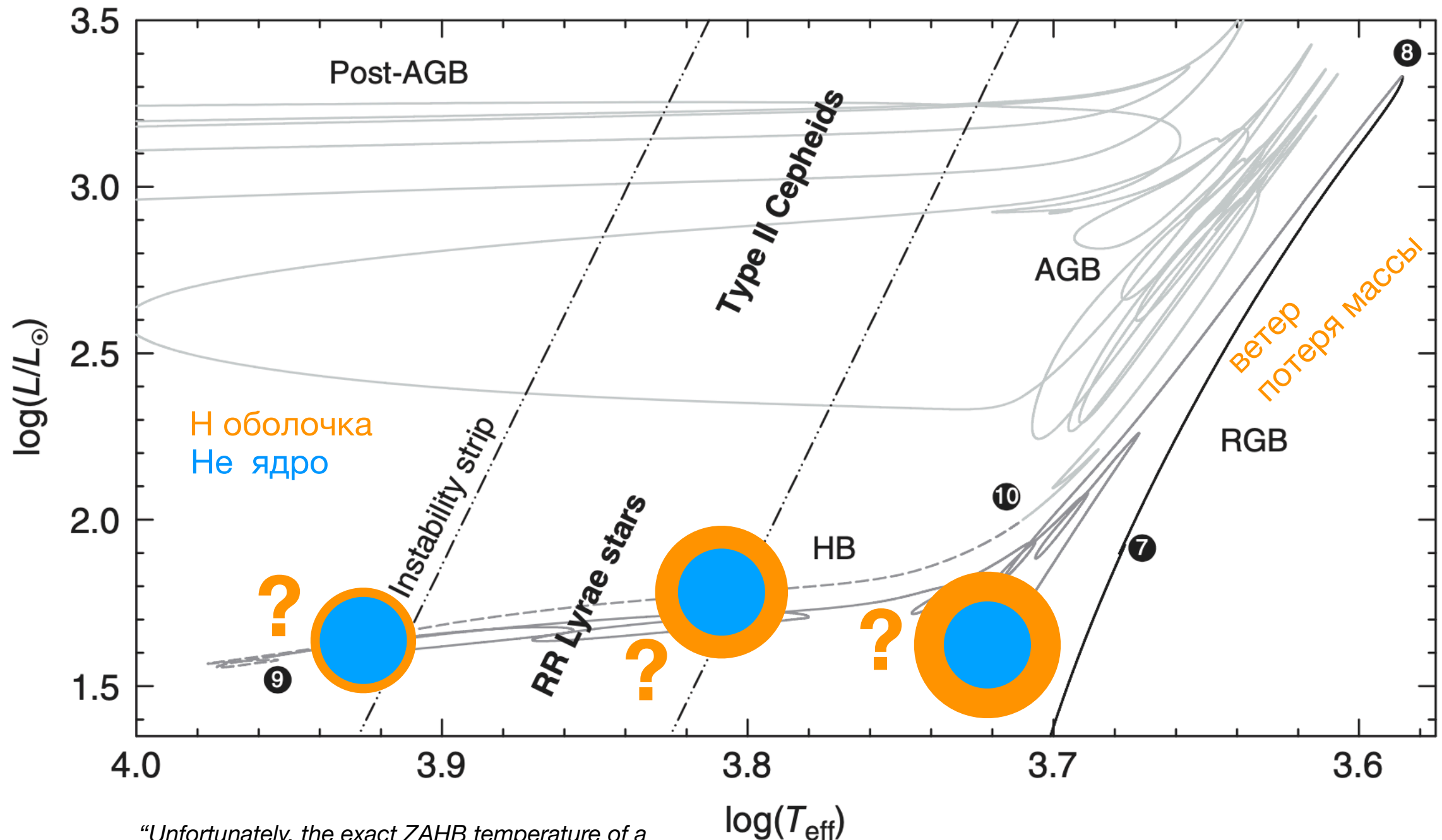


RR Лиры для измерения расстояний



Узкий диапазон температур (цветов) и светимостей делает RR Лиры прекрасными “стандартными свечами”

Эволюция звезды с $M < 2M_{\odot}$



“Unfortunately, the exact ZAMS temperature of a star cannot be predicted a priori, depending as it does on how much mass the star may have lost on its ascent of the RGB”

Бюджет массы

- Масса гелиевого ядра примерно одинакова $0.5M_{\odot}$
- Модели предсказывают что звезды с начальными массами порядка $0.6 - 0.8M_{\odot}$ могут стать RR Лирами
- Типичная потеря массы на ветви красных гигантов $0.1 - 0.3M_{\odot}$

Чтобы обнажить ядро (и стать RR Лирой) звезде в массе $M > 0.8M_{\odot}$ нужно сбросить гораздо больше массы на стадии гиганта

Вопрос металличности

- Металлические звезды эволюционируют медленнее

Звезда с $[Fe/H] = -2$ $M = 0.7M_{\odot}$ живет 7 млрд лет на ГП

Звезда с $[Fe/H] = 0$ сидит на ГП 13 млрд лет

- Металлические оболочки менее прозрачны, значит нужно или начинать с меньшей массой или сбрасывать больше чтобы добить до Полосы Нестабильности

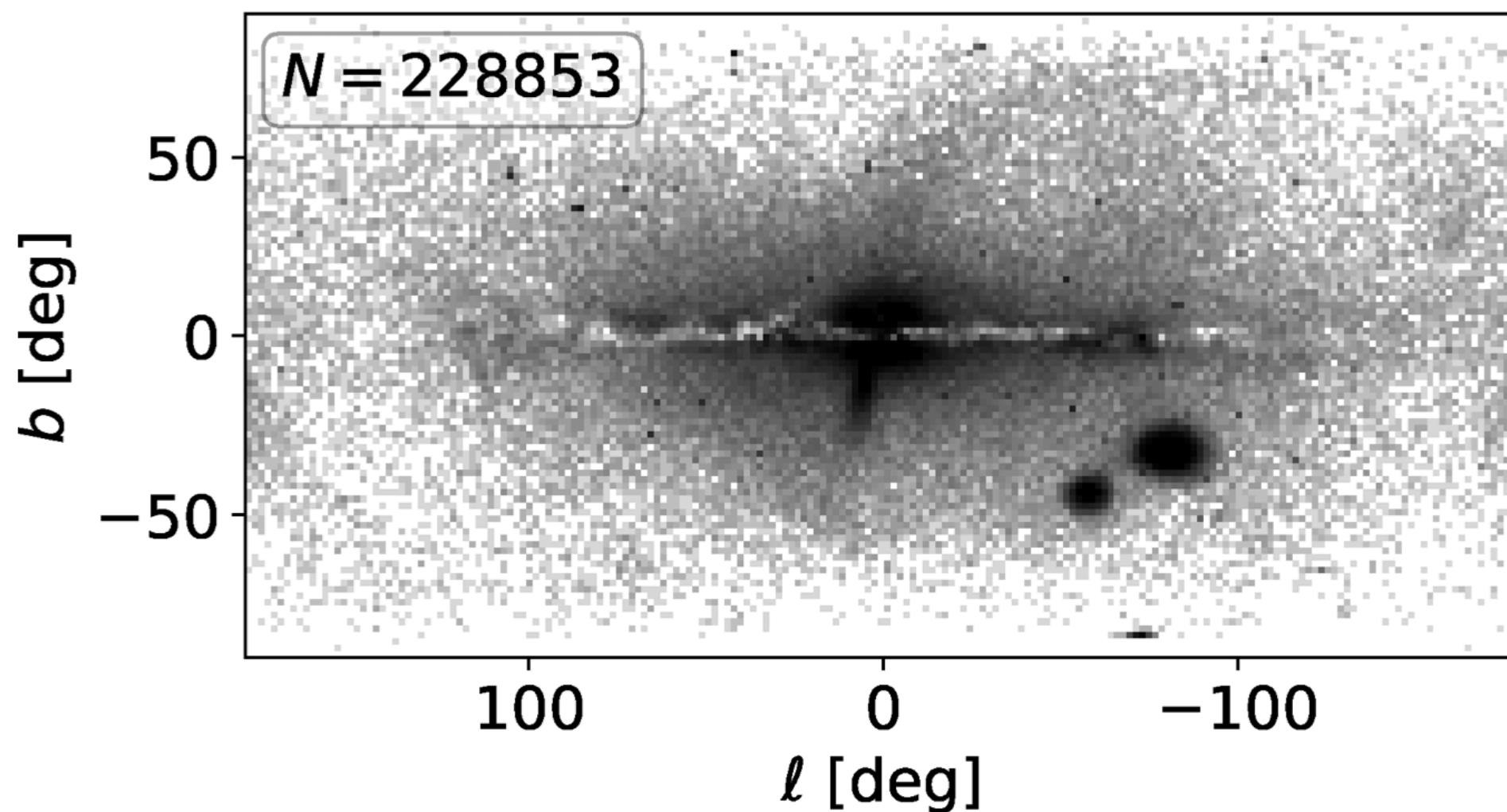
Чтобы стать RR Лирой металлической звезде нужно провести на ГП больше времени Хаббла (или сбросить огромное количество массы на ветви гигантов)

Консенсус в учебниках

- Только старые (>8 млрд лет) и преимущественно мало металлические звезды могут быть RR Лирами
- RR Лир - характерные представители “гало” Млечного Пути

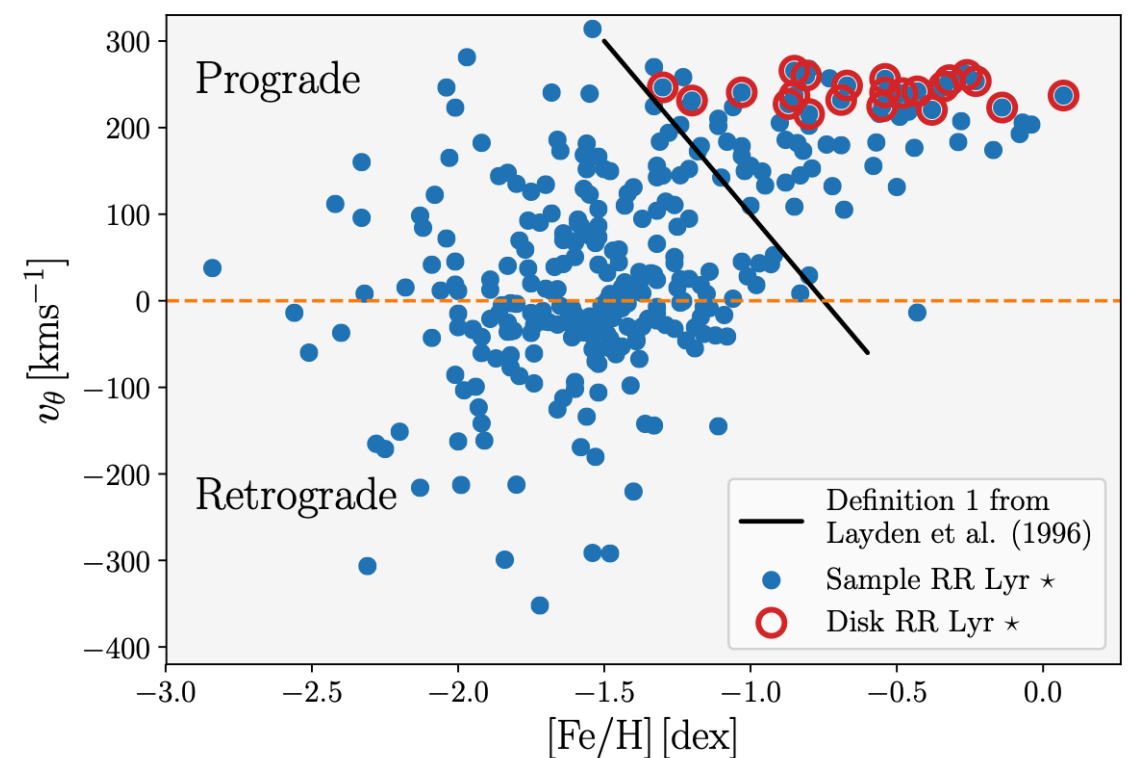
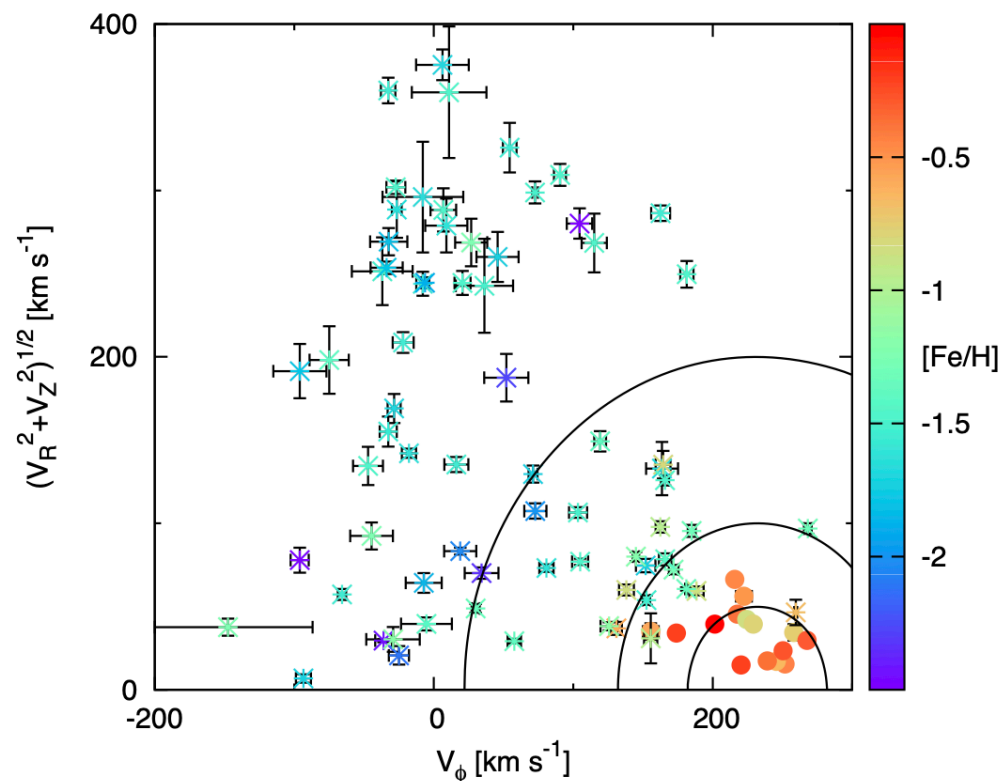
Наблюдения RR Лир в гало Галактики

- Многие шаровые скопления: предел на возраст >10 млрд лет
- Все карликовые галактики-спутники
- Звездные “потоки” и “облака”



Редкие экзотичные находки

- Отдельные сильно металличные RR Лир в окрестности Солнца попадались уже давно (см. например [Б.В. Кукаркин 1949](#))
- Гайя помогла разобраться с кинематикой металличных RR Лир: они оказались представителями населения диска (см. например [Marsakov et al 2018](#), [Zinn et al 2020](#), [Prudil et al 2020](#))



Невозможные RR Лирь?

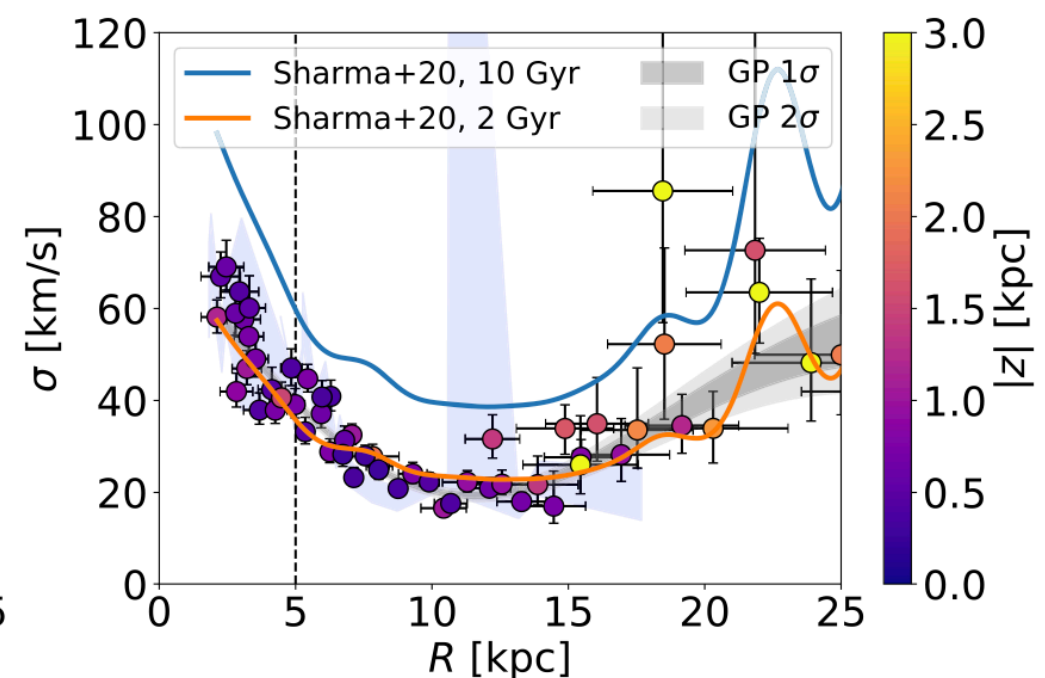
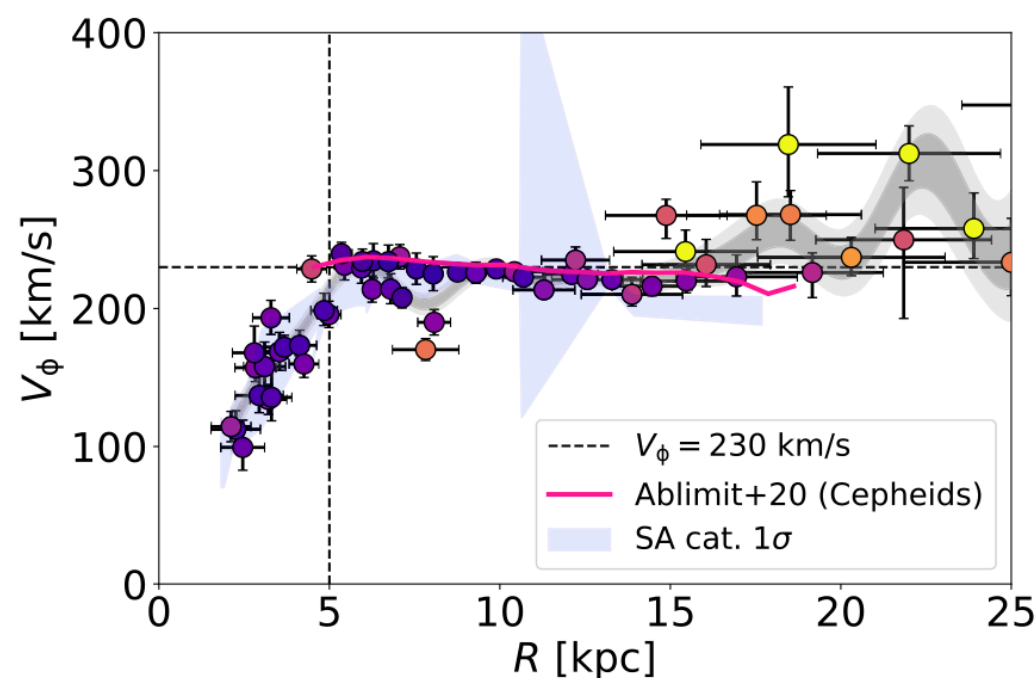
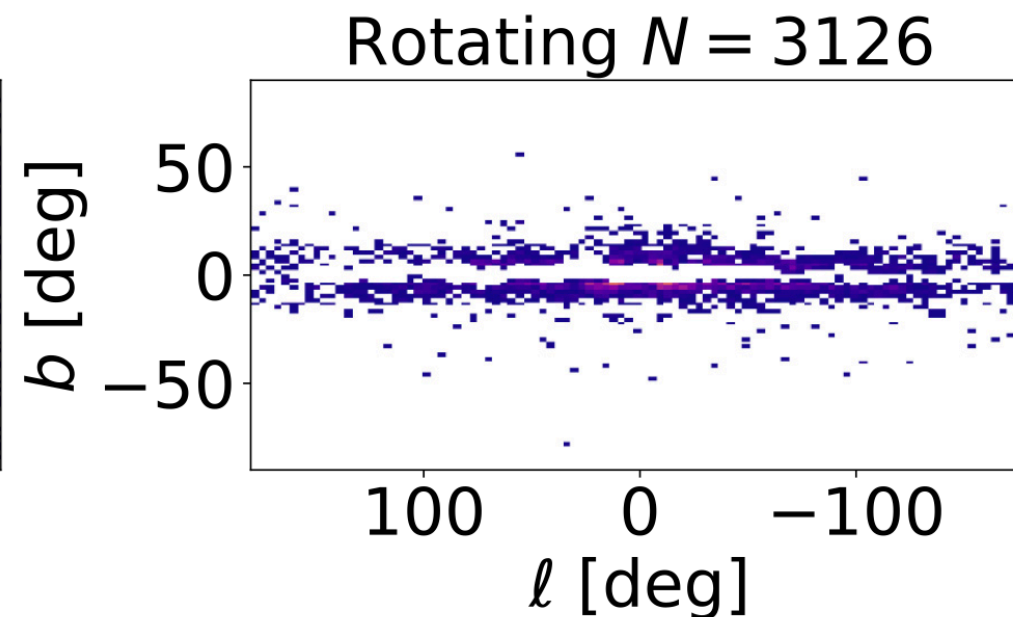
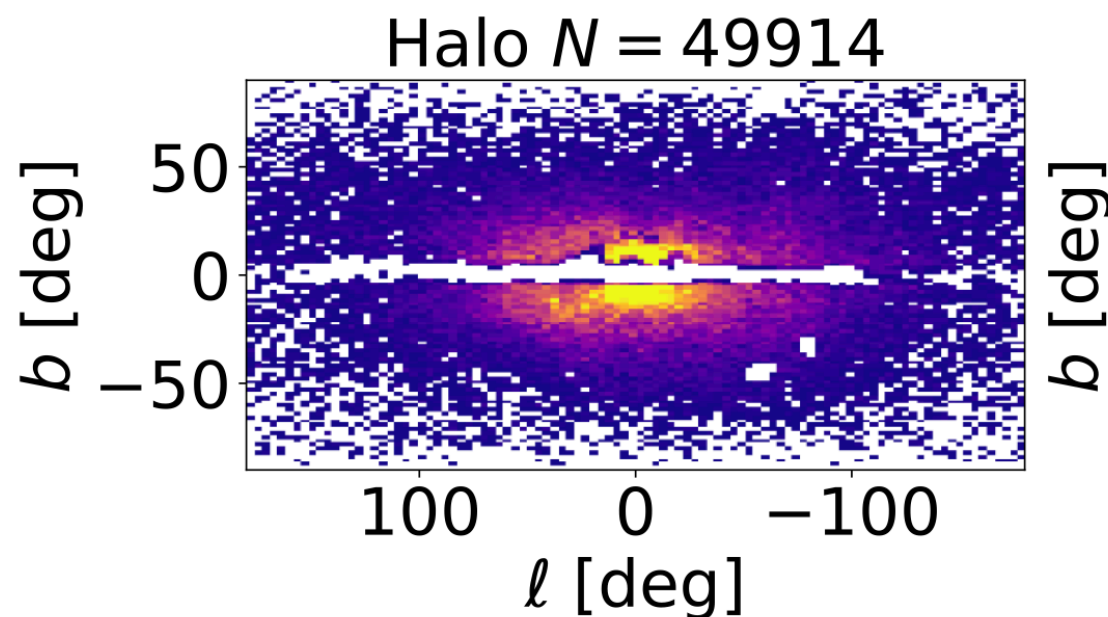
- Кинематика и химия указывают на возраста меньше 8 млрд лет
- Модели и наблюдения в шаровых скоплениях требуют >10 млрд лет

Единственное объяснение

Редкие представители мифического старого (доисторического) тонкого диска Млечного Пути?

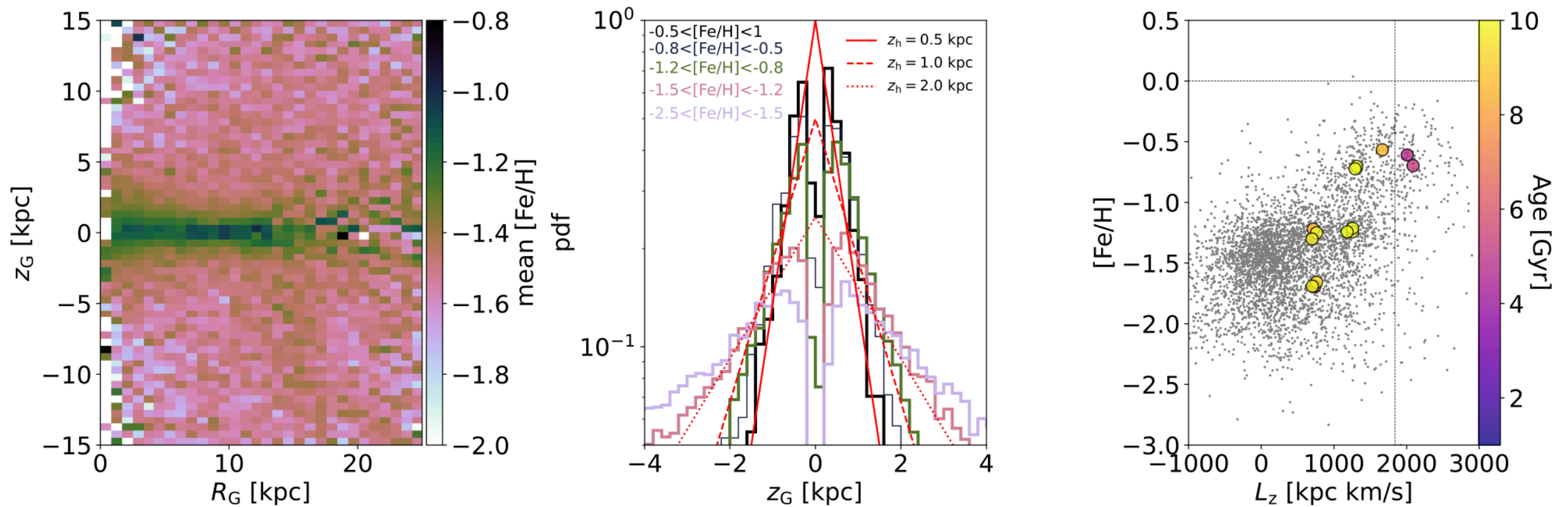
Верхушка айсберга

- Моделирование населения RR Лир по всему небу в данных Гайя DR2 выявило дисковую составляющую (Iorio & Belokurov 2020)



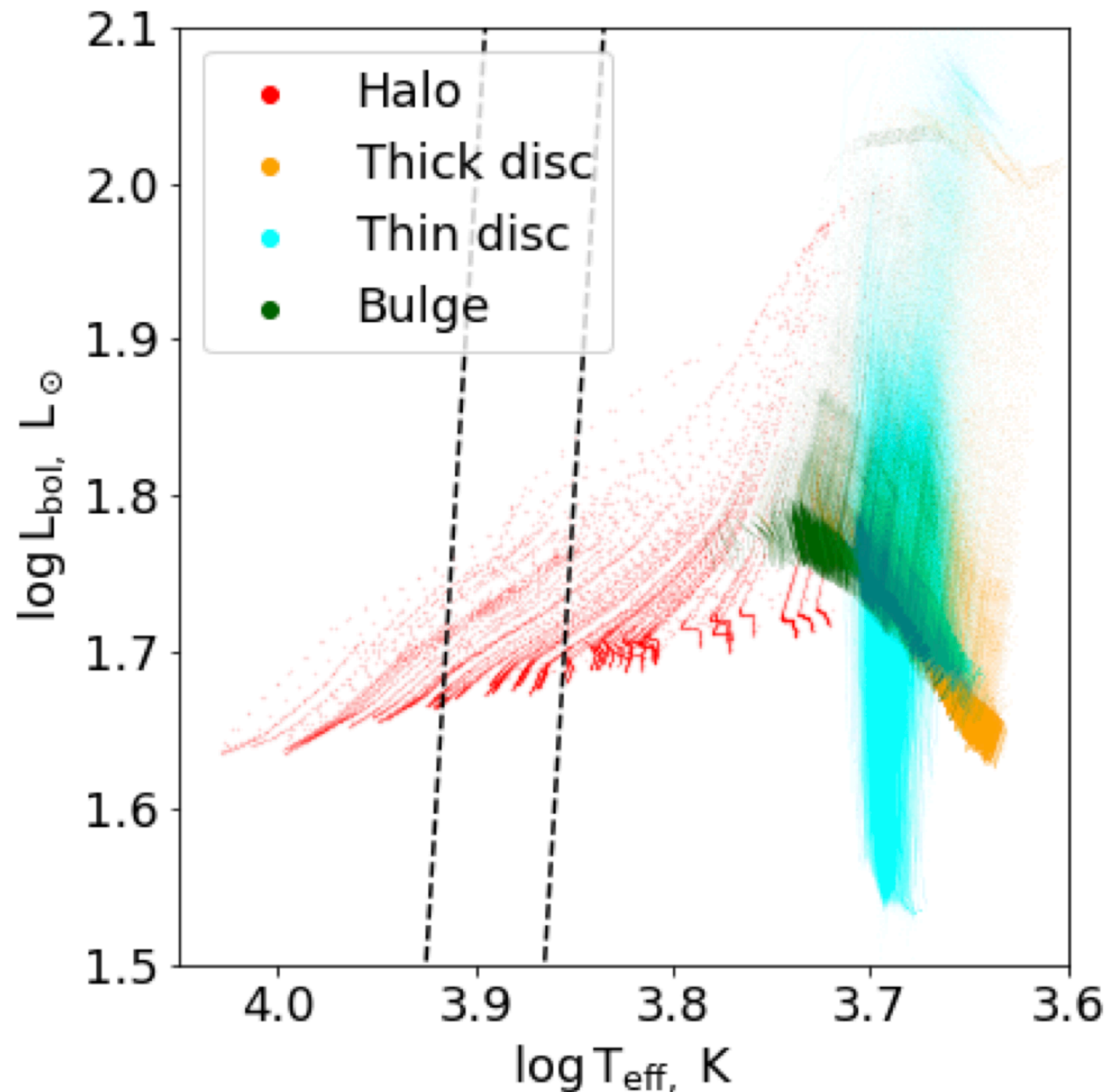
Фурор в Gaia DR3

- Новые данные Гайи дали возможность разглядеть РР Лиры в диске во всей красе а также более точно оценить их металличность ([Bobrick et al 2022](#))



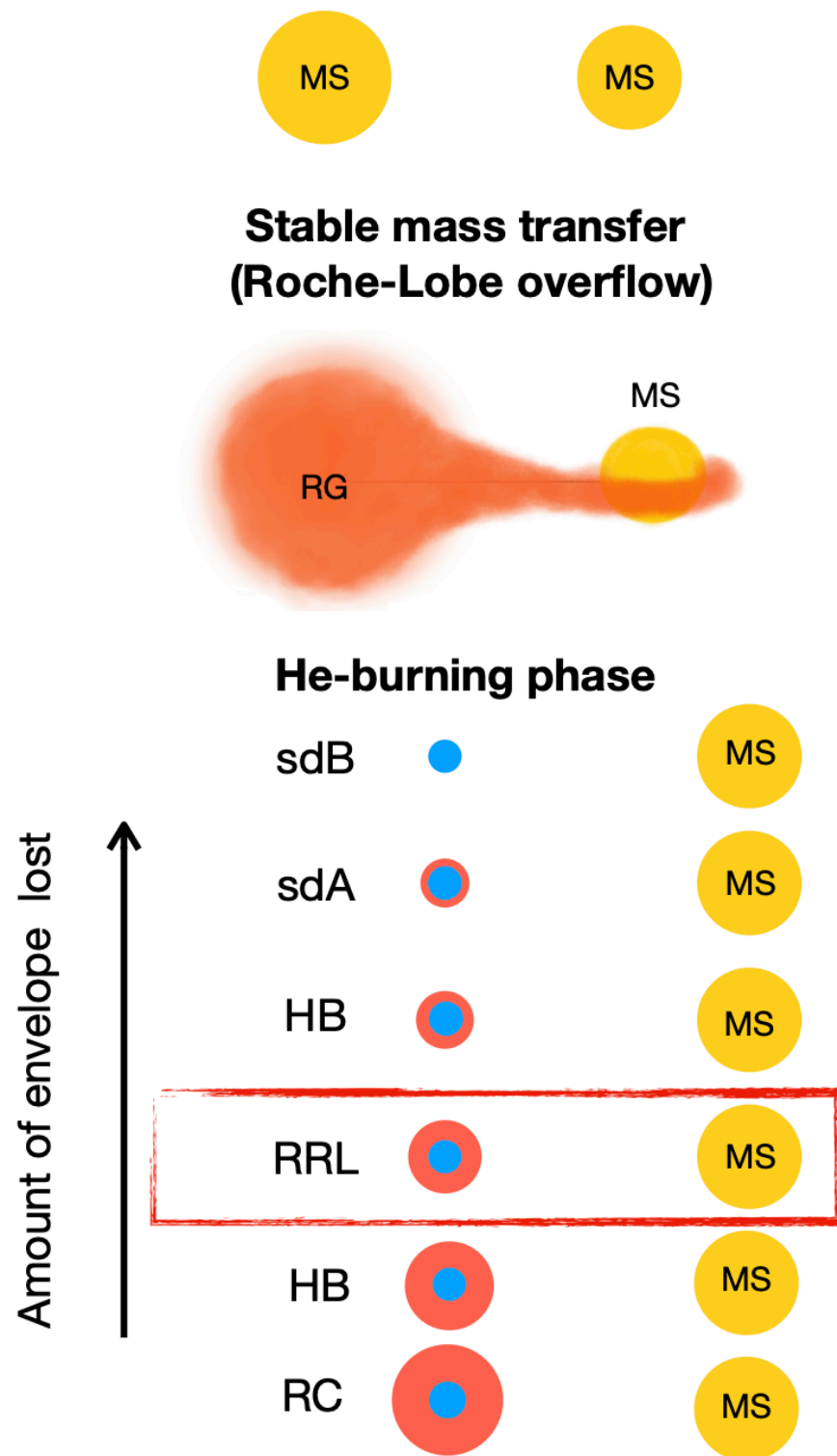
**Модели РР Лир как
результат эволюции
в двойной системе**

Популяционный синтез



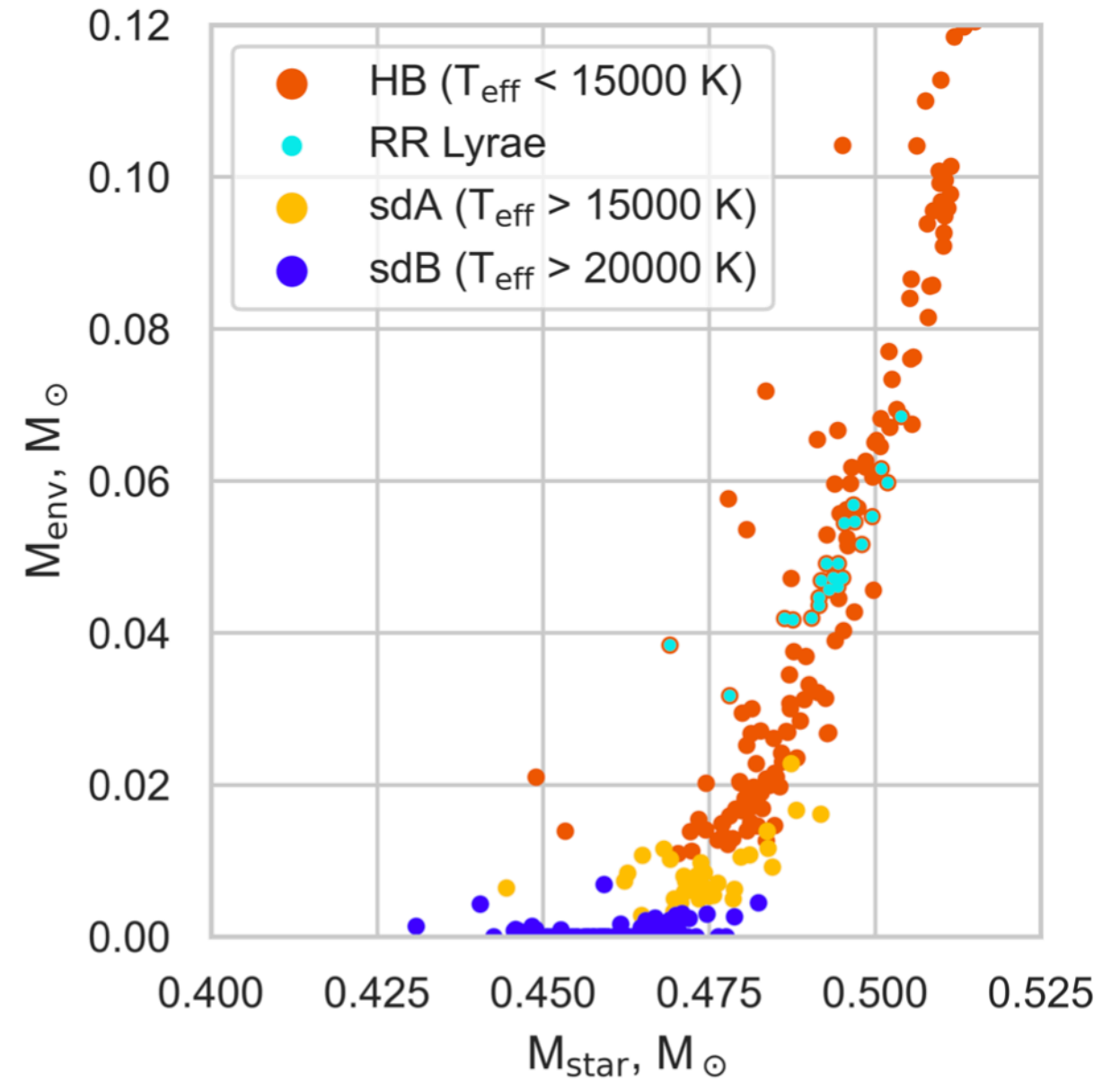
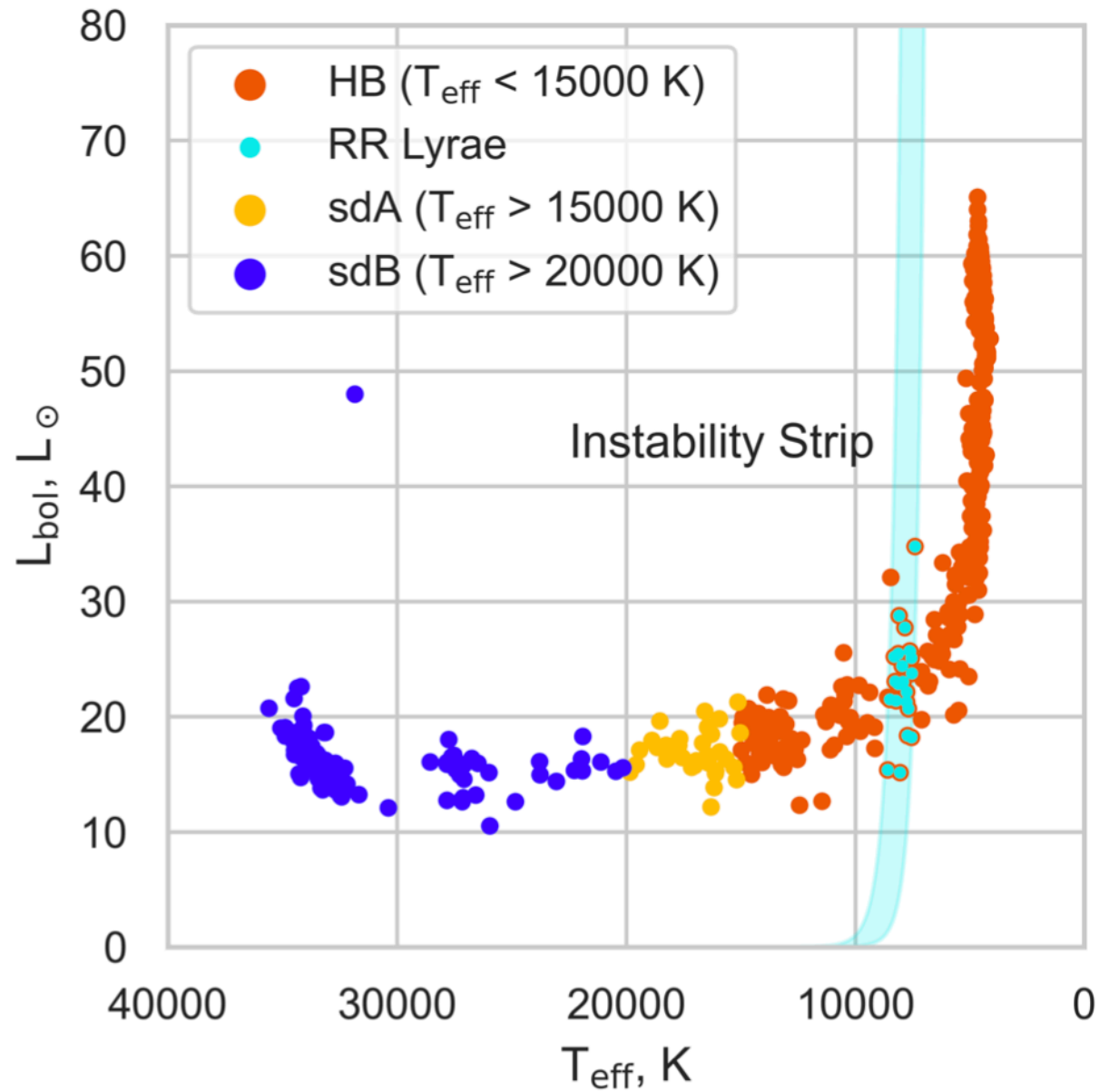
- Здесь только одиночные звезды с массами $0.7 < M(M_{\odot}) < 2.1$
- Показана только фаза горения гелия в ядре
- Только старые и маломассивные звезды гало 14 Gyr, $M \approx 0.73M_{\odot}$, $[Fe/H] = -1.5$ способны добить до полосы неустойчивости
- Все остальные Галактические населения жгут гелий находясь в Red Clump

Сценарий с двойными



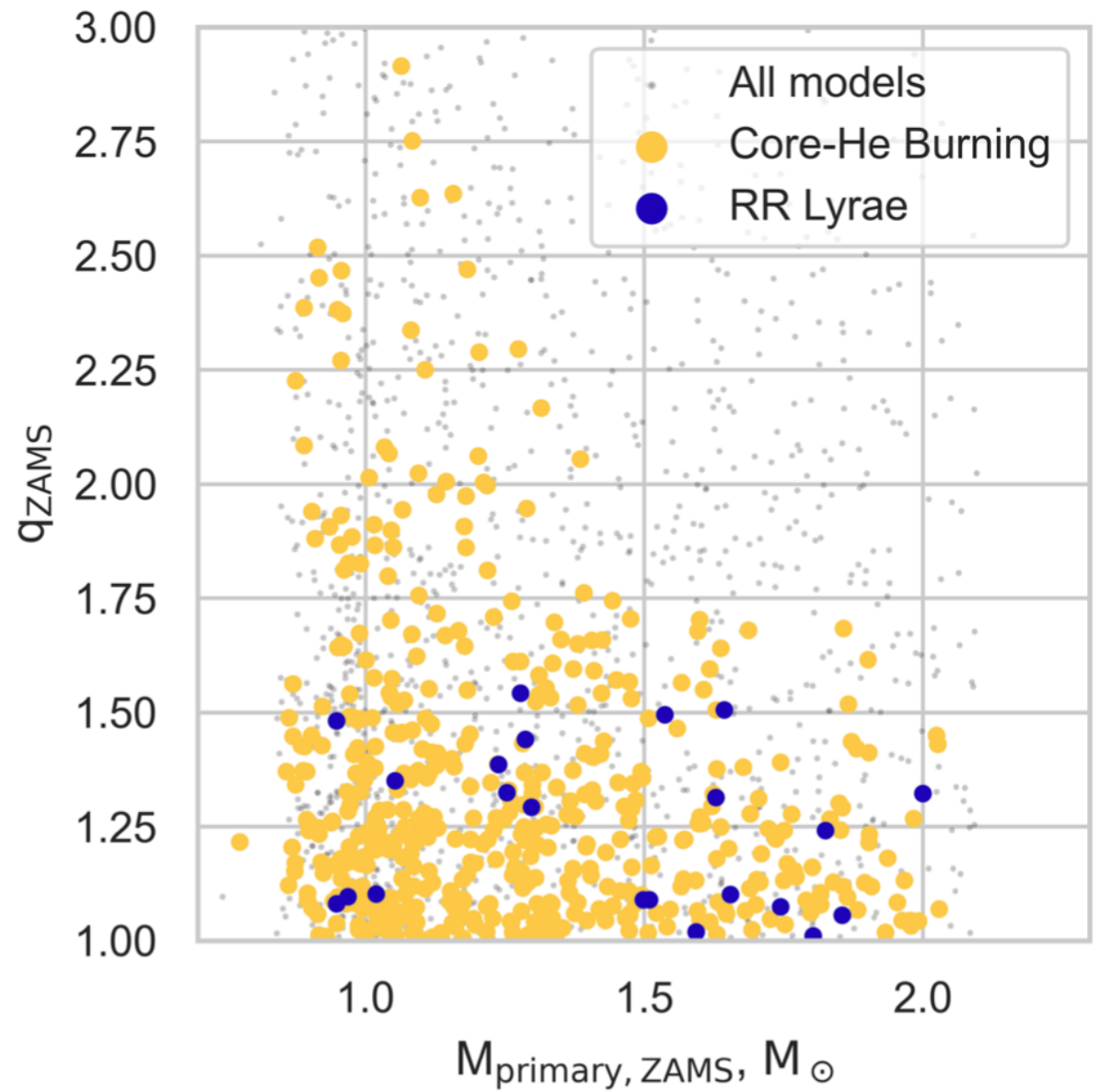
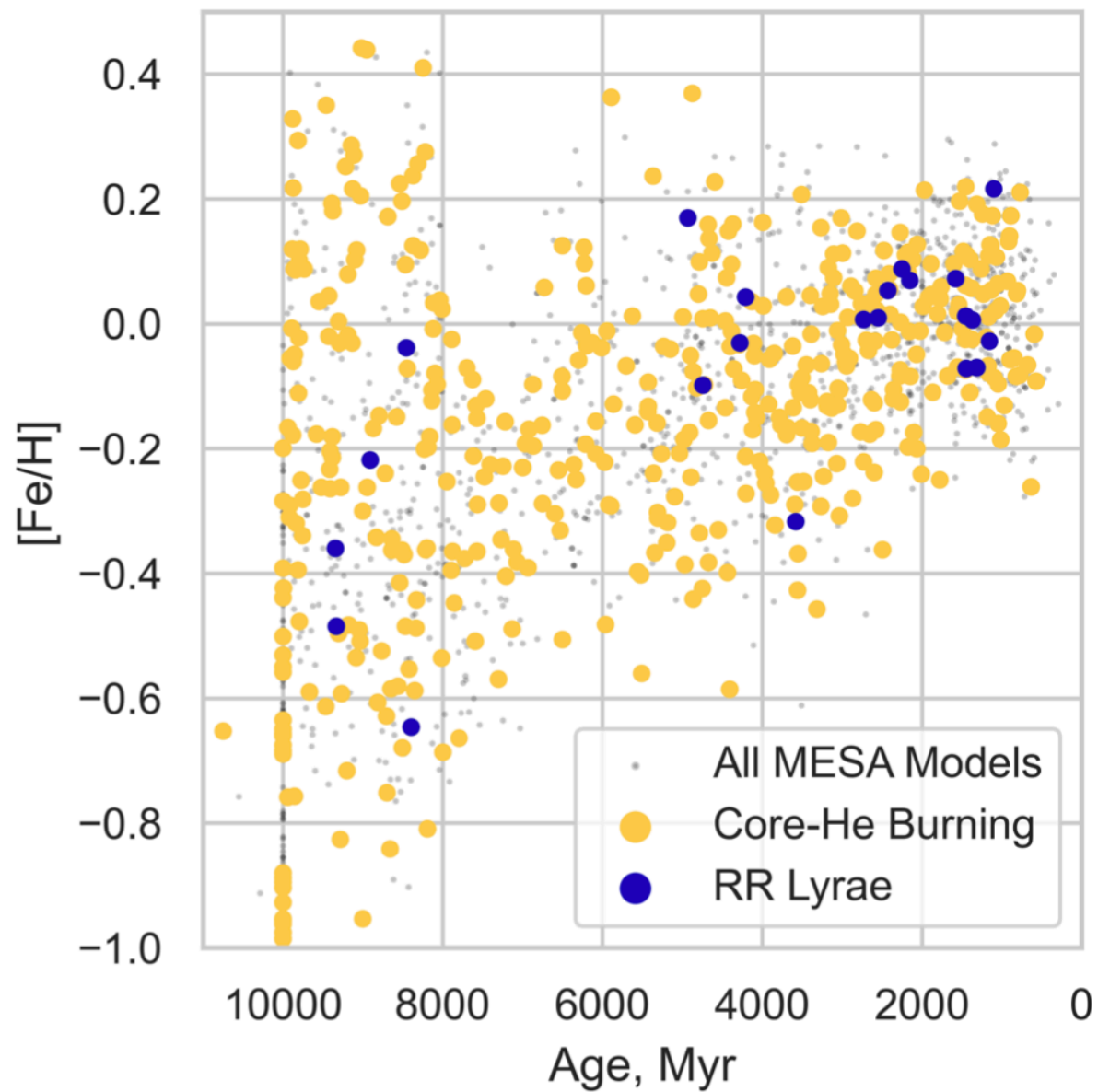
- Положение на диаграмме Герцшпрунга-Рассела зависит от того сколько оболочки украла звезда компаньон
- Размеры оставшейся оболочки диктуются начальными условиями (масса и размер орбиты) двойной системы на ГП

Разнообразие звезд Горизонтальной Ветви получившихся в результате эволюции двойной

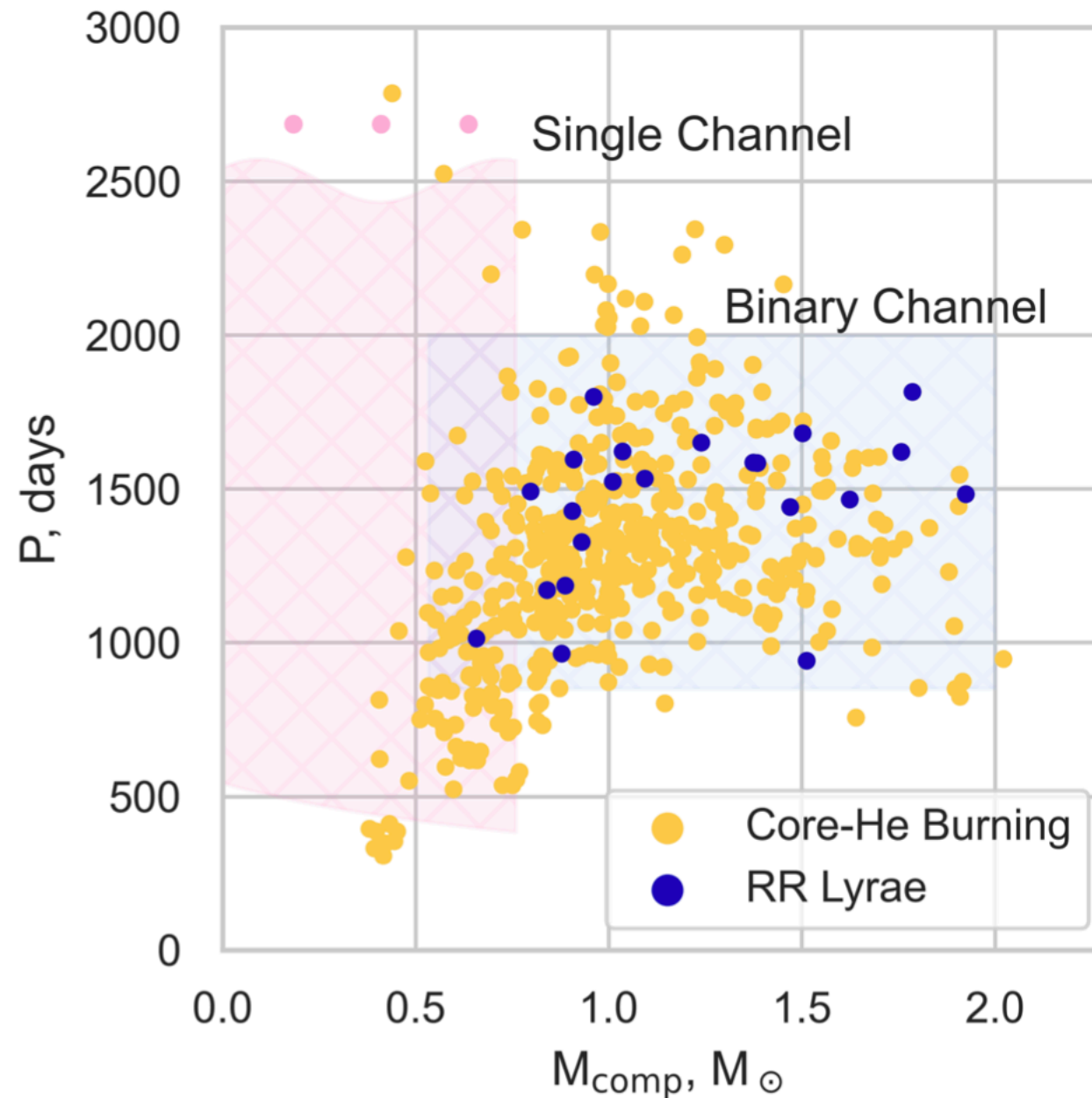


- Показаны только модели зажегшие гелий в ядре и отдавшие часть массы компаньону

Теперь RR Лирой может стать звезда любой металличности и любого возраста (>1 Млрд лет)



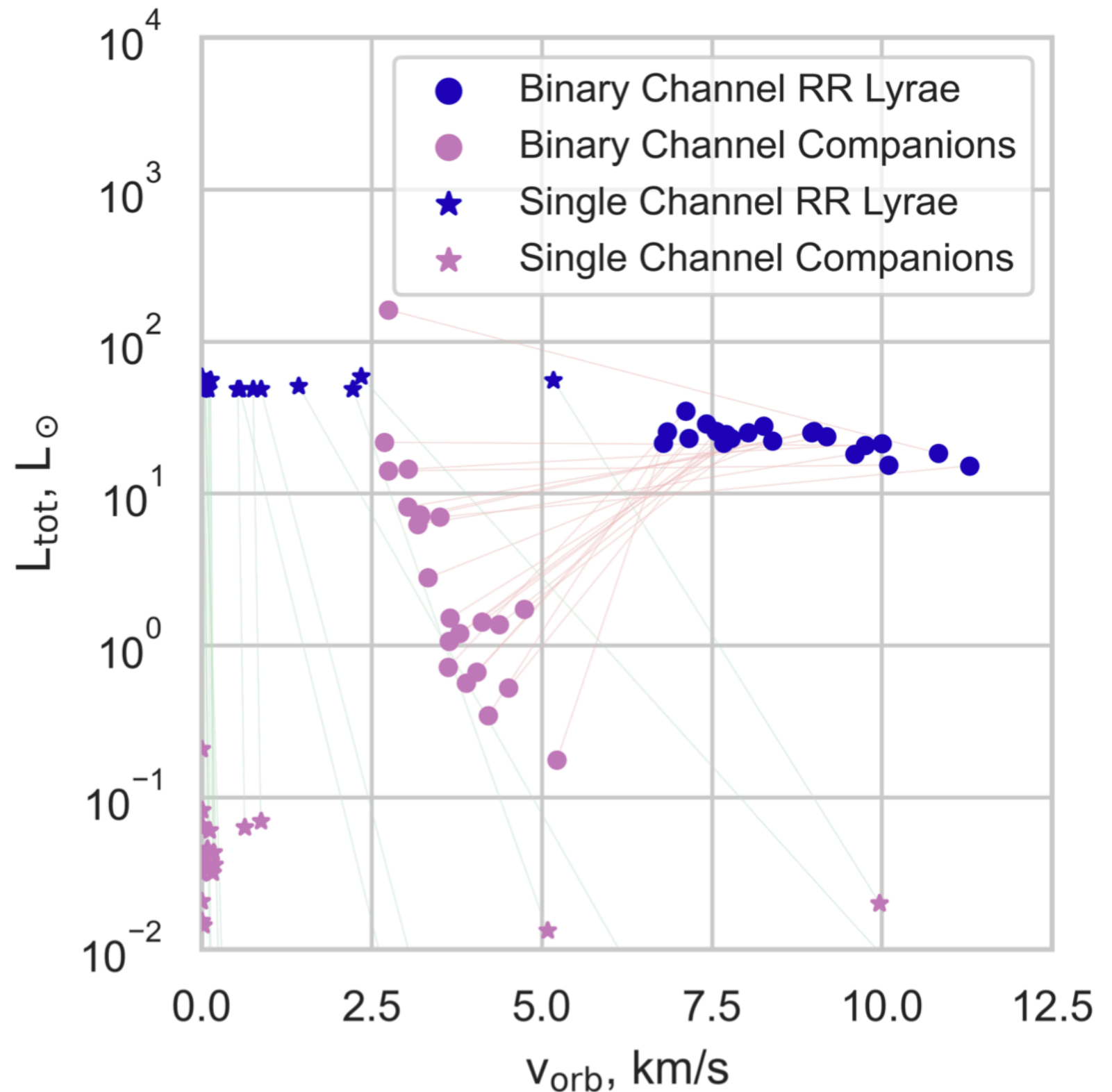
Периоды двойных увеличились в результате трансфера массы



- Начальные период были в диапазоне 100-500 дней
- Конечно существуют RR Лир с компаньонами которые развивались в изоляции (компаньон был слишком далеко или слишком маломассивен чтобы инициировать трансфер массы)

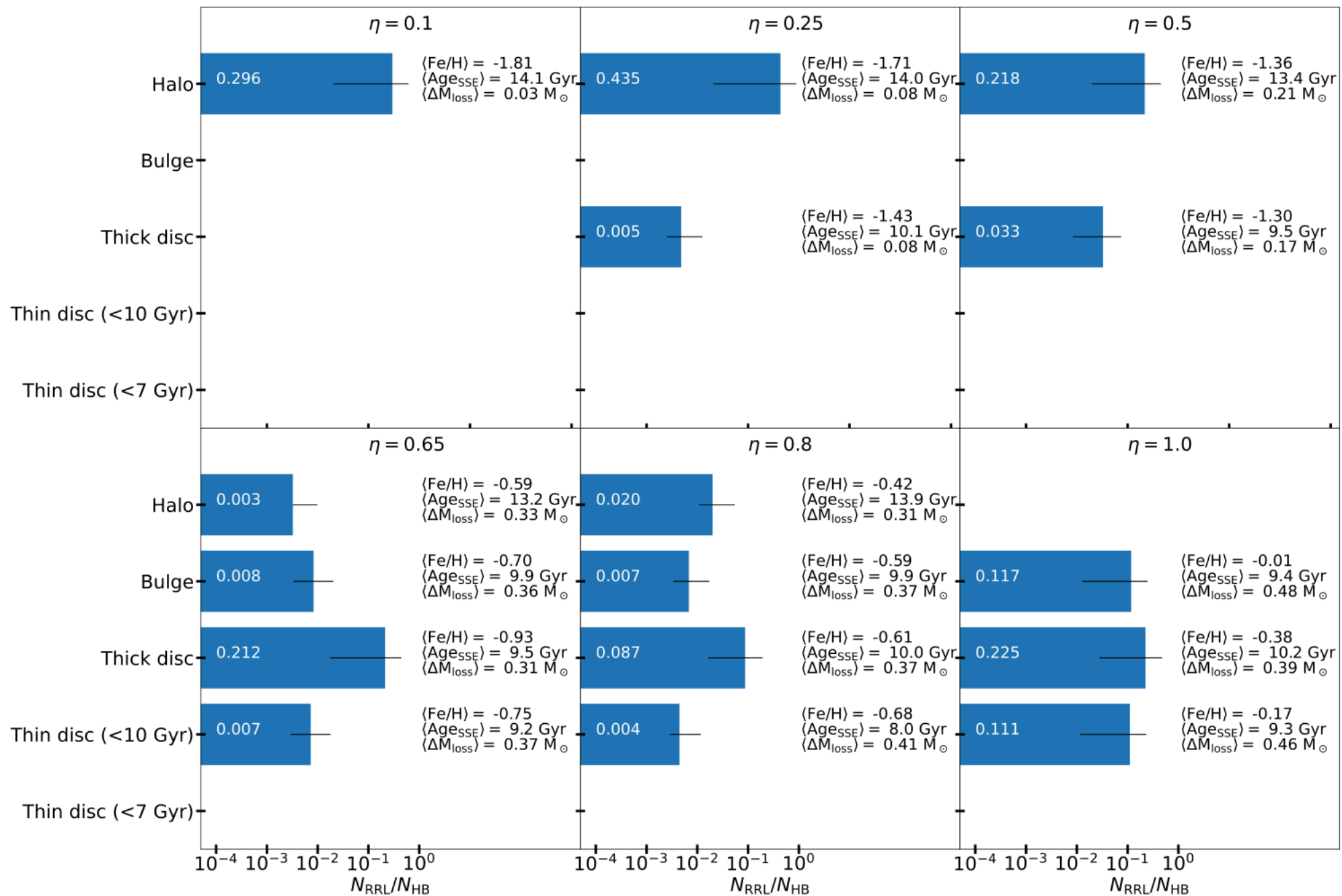
RR Лиры “живущие рядом” с компаньонами против RR Лир получившихся в результате взаимодействия

- RR Лиры получившиеся в результате взаимодействия слегка тусклее обычных RR Лир
- Компаньоны “живущие рядом” с RR Лирами на порядок или два слабее компаньонов сделавших из своих соседок RR Лир
- Их сложнее найти



А что если подкрутить ветер? Ломается гало!

$$\dot{M}_{\text{RGB}} = \eta \times 4 \times 10^{-13} \times \left(\frac{L}{L_{\odot}}\right) \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^{-1} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$



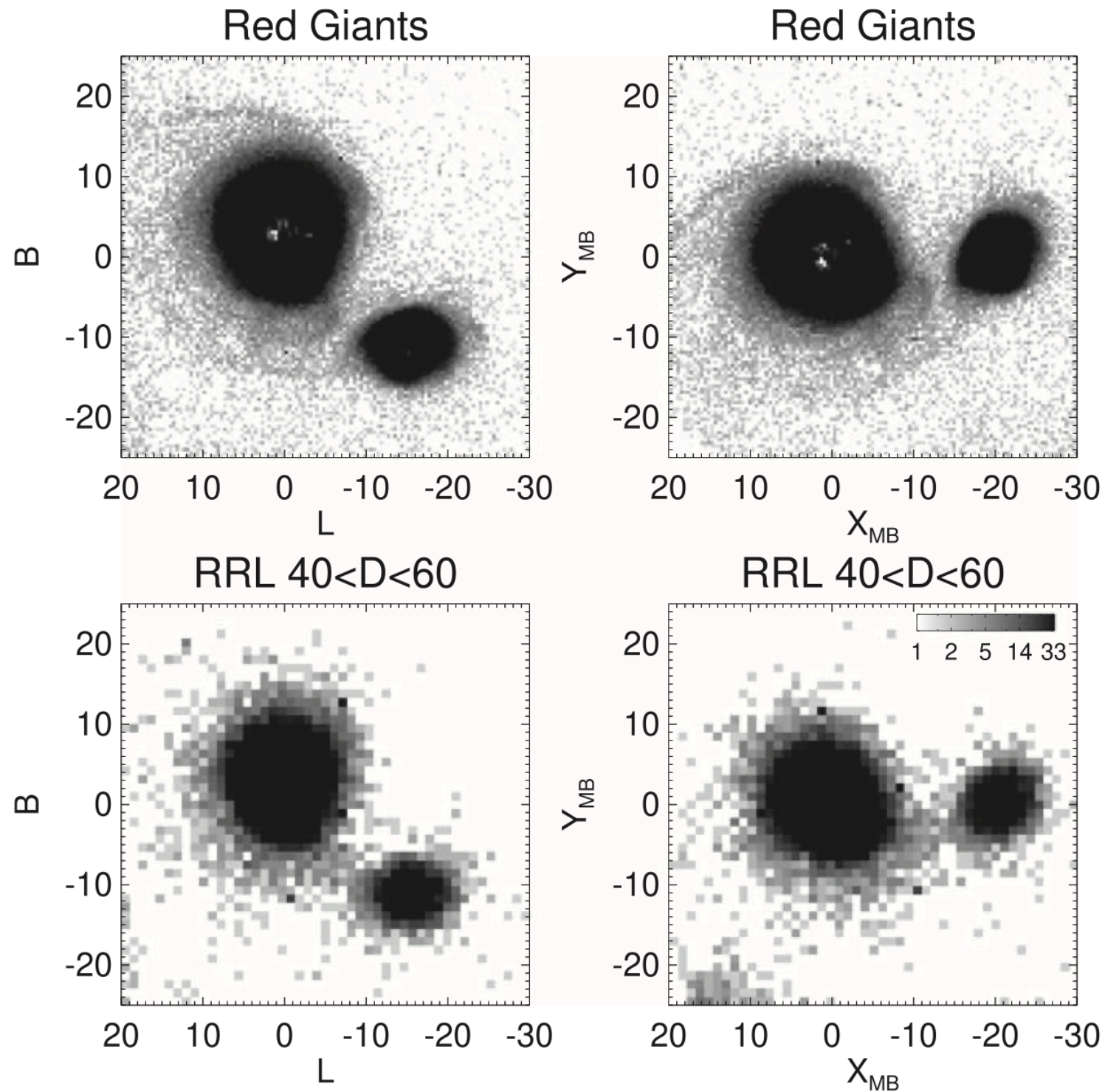
Итого

- Механизм создания RR Лиры в результате трансфера массы на звезду компаньон - очень неэффективен
- Но! Зато звезд прародителей в диске очень много
- В результате мы предсказываем 10% всех RR Лир в Галактике это RR Лиры получившиеся в результате эволюции двойных систем
- Все металличные RR Лиры найденные на сегодняшний момент в окрестностях Солнца это “двойные” RR Лиры

Значения существования RR Лир получившихся в результате взаимодействия двойных систем

- Так как оболочки были потеряны разными способами (звездный ветер против трансфера массы) то детали пульсаций и кривых блеска могут отличаться
- “Двойные” RR Лиры имеют очень похожую но не идентичную светимость (систематически неправильные расстояния в выборках с неизвестной металличностью)
- “Динамические” двойные RR Лиры могут образовываться в шаровых скоплениях

Металлические RR Лиры в дисках других галактик?



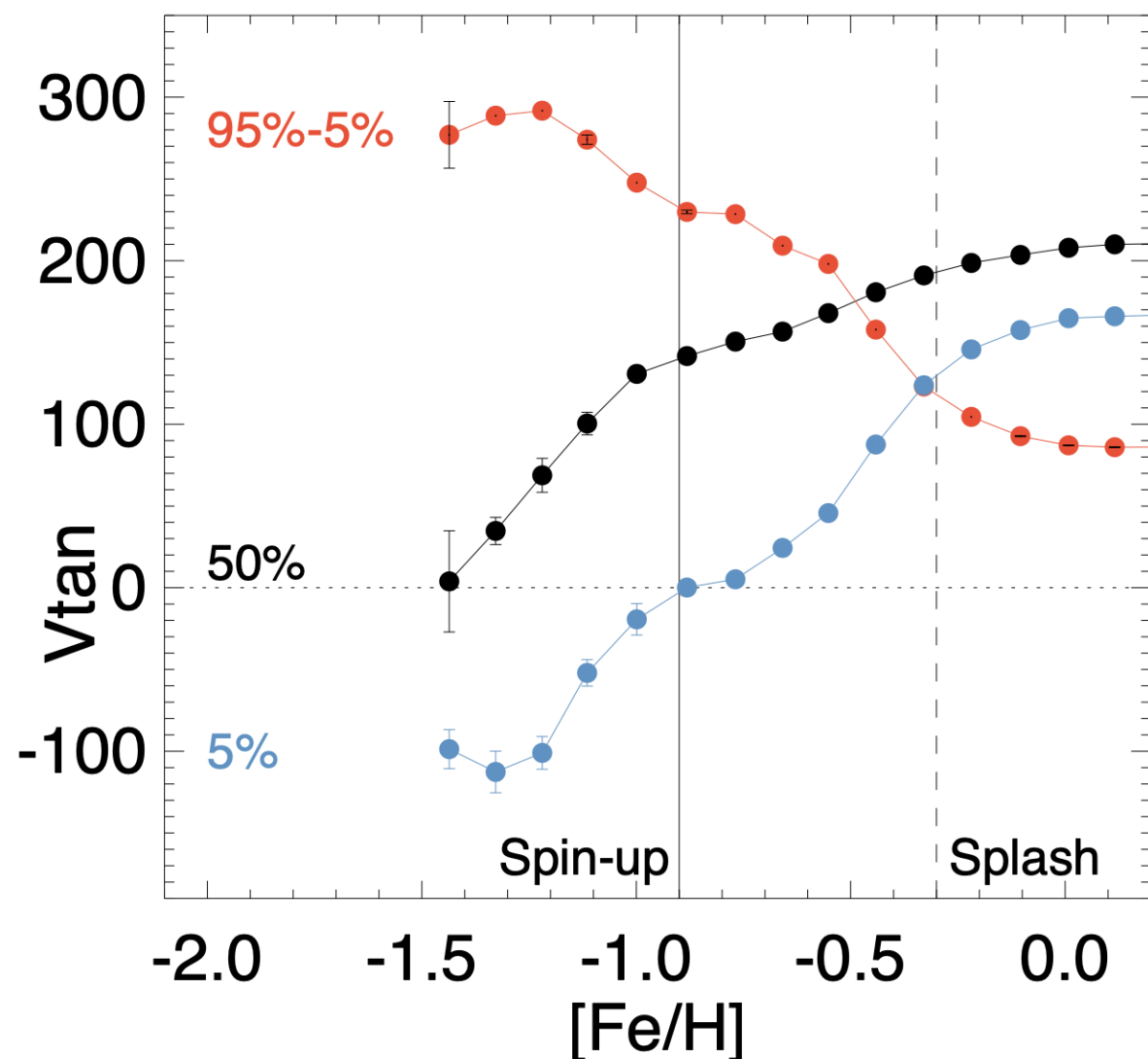
Магеллановы Облака

Grady et al 2019

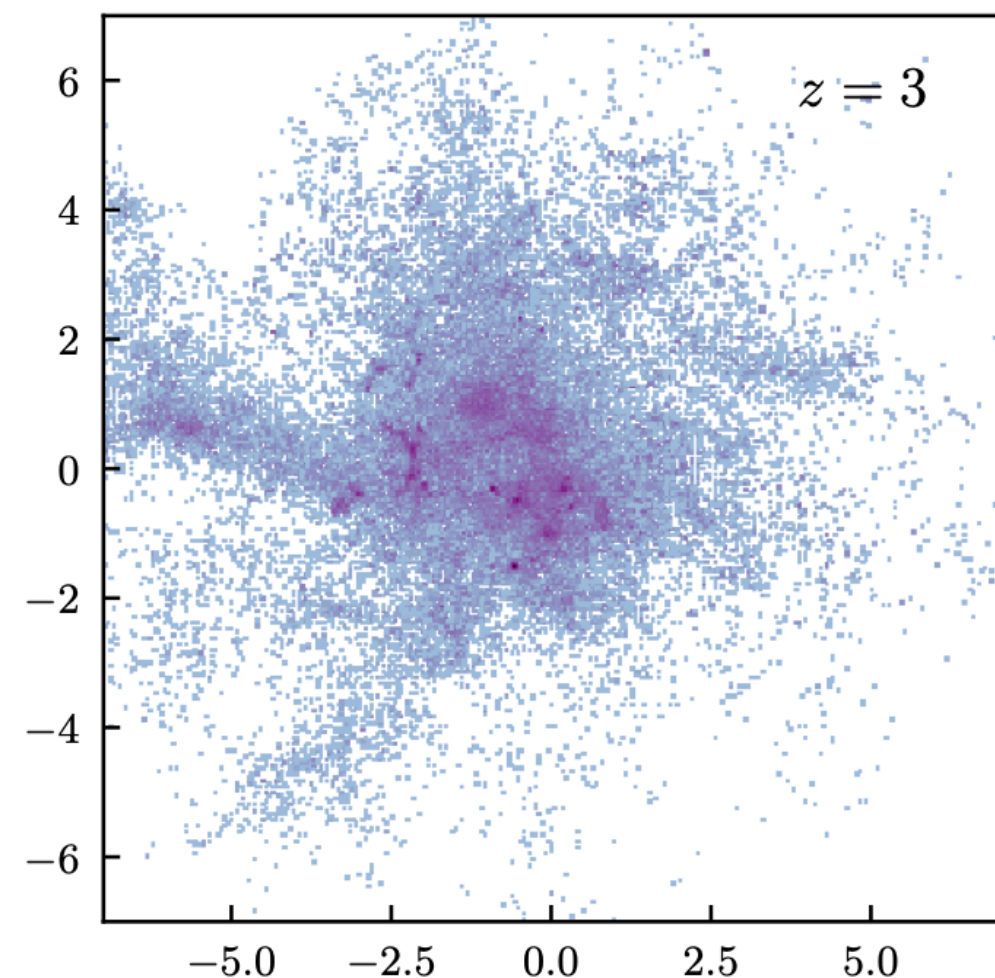
А может быть Млечный Путь был диском на больших красных смещениях? Нет!

Мало-металлические звезды в МП были рождены в хаотичном и турбулентном состоянии

In-situ stars



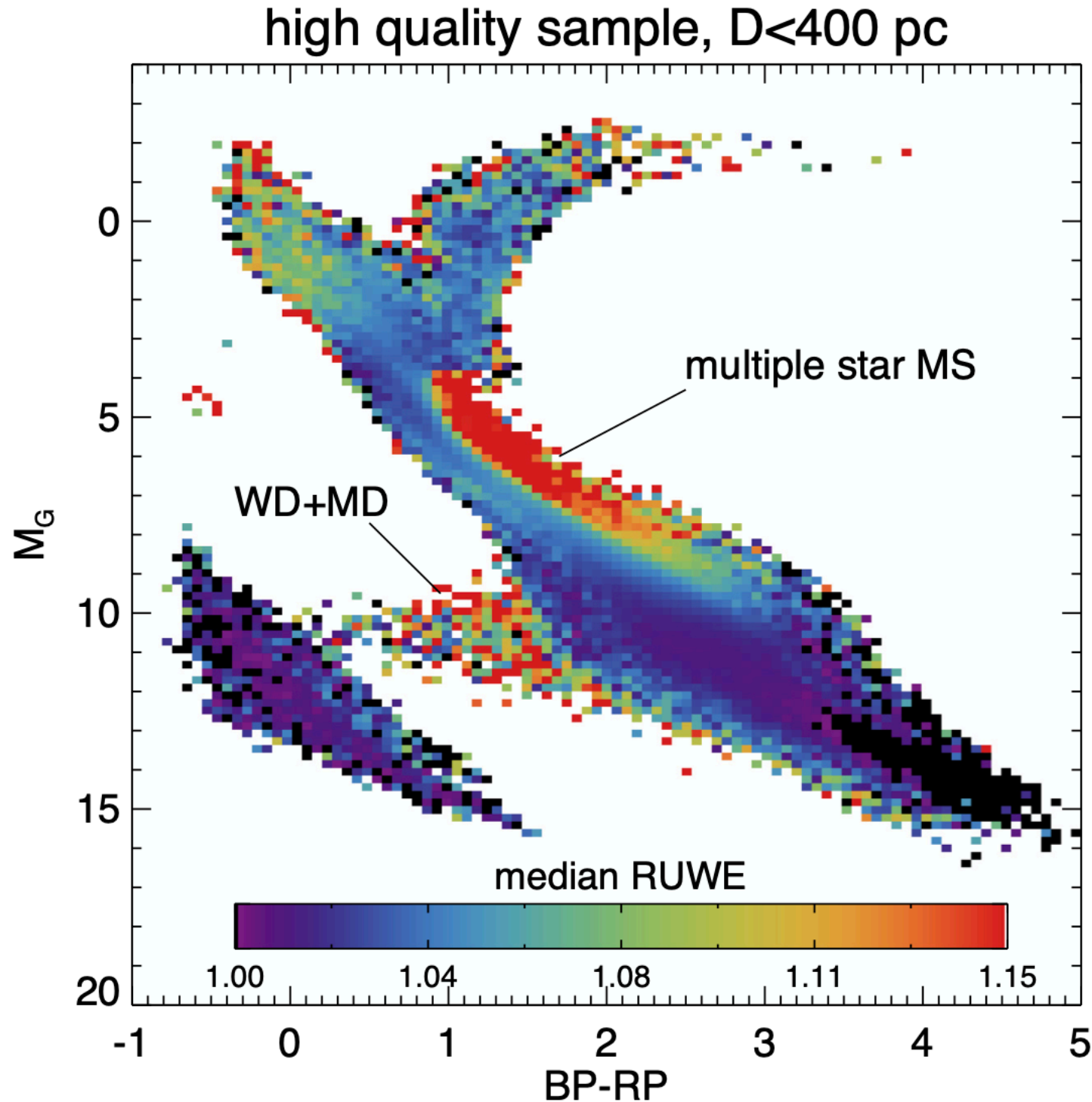
Распределение плотности в МП на $z=3$ в моделях FIRE



Belokurov & Kravtsov 2022

Что еще интересного можно узнать про звезды с компаньонами в данных Гайя?

Что еще интересного можно узнать про звезды с компаньонами в данных Гайя?



- По астрометрическому “шуму” можно оценить распространённость двойных/тройных/... в любом галактическом населении (Belokurov et al 2020)

Monthly Notices

ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS 496, 1922–1940 (2020)

Advance Access publication 2020 June 1

doi:10.1093/mnras/staa1522

Unresolved stellar companions with *Gaia* DR2 astrometry

Vasily Belokurov^{1,*}, Zephyr Penoyre¹, Semyeong Oh¹, Giuliano Iorio^{1,2},
Simon Hodgkin¹, N. Wyn Evans¹, Andrew Everall¹, Sergey E. Koposov^{1,3,4},
Christopher A. Tout¹, Robert Izzard⁵, Cathie J. Clarke¹ and Anthony G. A. Brown⁶

¹Institute of Astronomy, Madingley Road, Cambridge CB3 0HA, UK

²Dipartimento di Fisica e Astronomia ‘G. Galilei’, Università di Padova, vicolo dell’Osservatorio 3, I-35122 Padova PD, Italy

³McWilliams Center for Cosmology, Carnegie Mellon University, 5000 Forbes Ave, Pittsburgh, PA 15213, USA

⁴Kavli Institute for Cosmology, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge CB3 0HA, UK

⁵Astrophysics Research Group, University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 7XH, UK

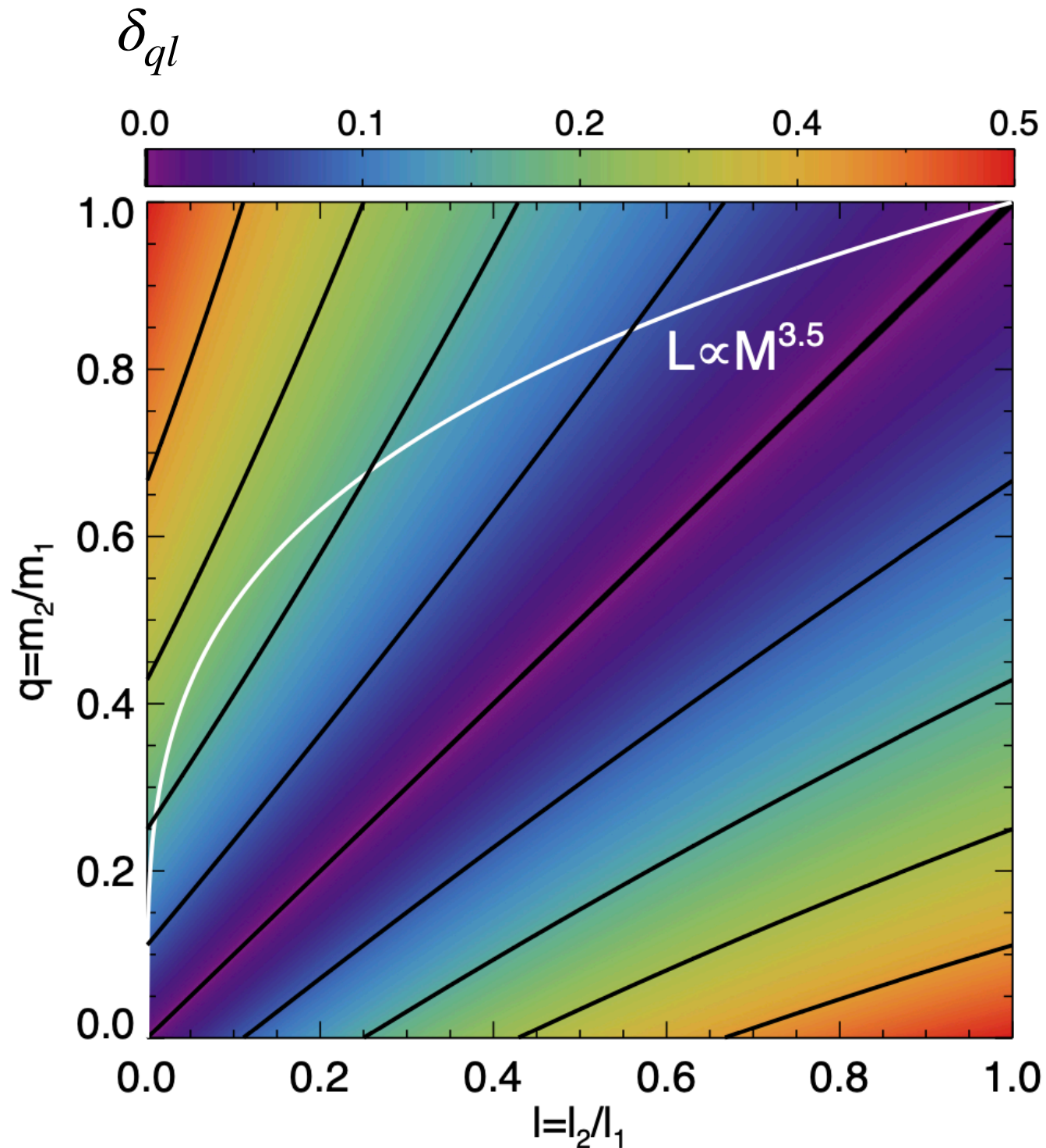
⁶Leiden Observatory, Leiden University, Niels Bohrweg 2, NL-2333 CA Leiden, the Netherlands

Accepted 2020 May 17. Received 2020 May 11; in original form 2020 March 11

ABSTRACT

For stars with unresolved companions, motions of the centre of light and that of mass decouple, causing a single-source astrometric model to perform poorly. We show that such stars can be easily detected with the reduced χ^2 statistic, or renormalized unit weight error (RUWE), provided as part of *Gaia* DR2. We convert RUWE into the amplitude of the image centroid wobble, which, if scaled by the source distance, is proportional to the physical separation between companions (for periods up to several years). We test this idea on a sample of known spectroscopic binaries and demonstrate that the amplitude of the centroid perturbation scales with the binary period and the mass ratio as expected. We apply this technique to the *Gaia* DR2 data and show how the binary fraction evolves across the Hertzsprung–Russell diagram. The observed incidence of unresolved companions is high for massive young stars and drops steadily with stellar mass, reaching its lowest levels for white dwarfs. We highlight the elevated binary fraction for the nearby blue stragglers and blue horizontal branch stars. We also illustrate how unresolved hierarchical triples inflate the relative velocity signal in wide binaries. Finally, we point out a hint of evidence for the existence of additional companions to the hosts of extrasolar hot Jupiters.

Нюанс астрометрического детектирования смещения фотоцентра двойной



- Смещение фотоцентра неразрешенной двойной системы пропорционально размеру орбиты.
- Коэффициент пропорциональности δ_{ql} зависит от отношения масс и отношения светимостей

$$\delta a \propto \frac{a|q - l|}{(q + 1)(l + 1)} \equiv a\delta_{ql}$$

Можно откалибровать физику в стадии “общей оболочки” по двойным белым карликам

- Амплитуда отклонения астрометрического хи квадрат пропорциональна размеру орбиты двойной
- Можно измерить распределение размеров орбит двойных белых карликов ([Korol et al 2020](#))

