

Gaia DR3における ブラックホール連星探査

谷川衝（東京大学）

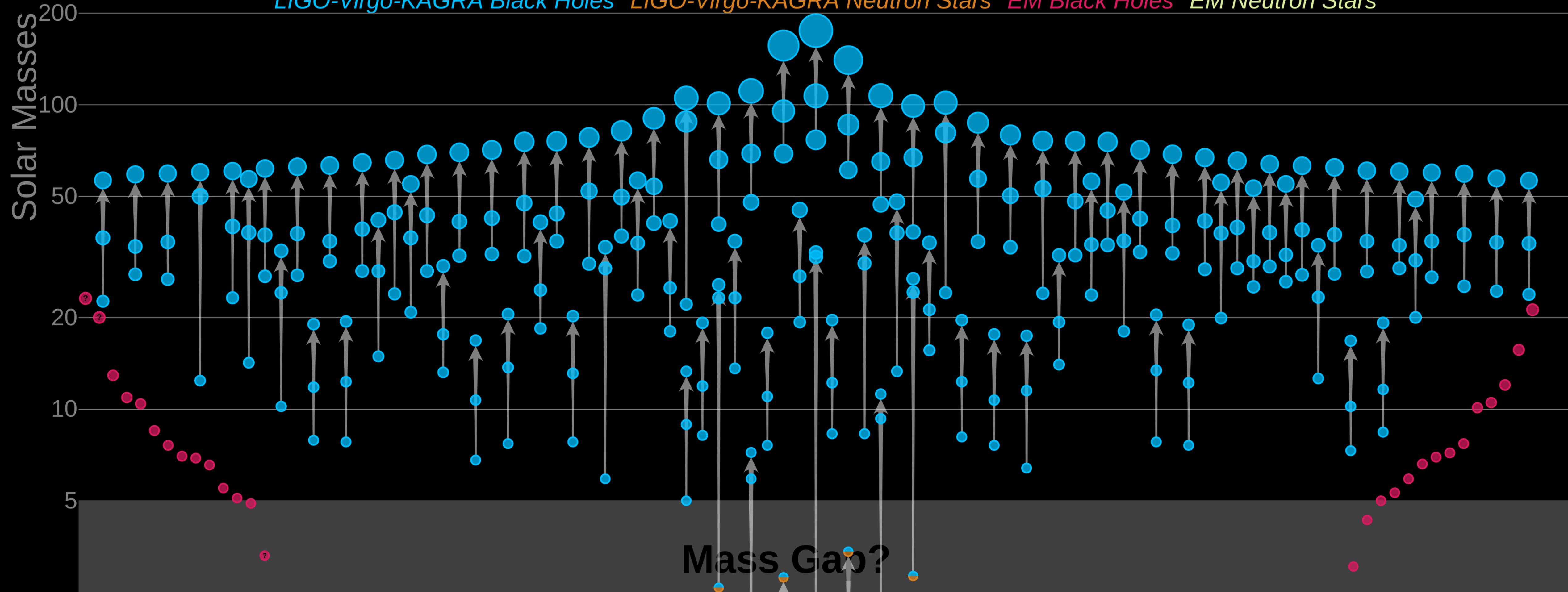
連星系・変光星研究会 2022 @岡山理科大学

服部公平, 川中宣太, 衣川智弥, 鹿内みのり, 津名大地

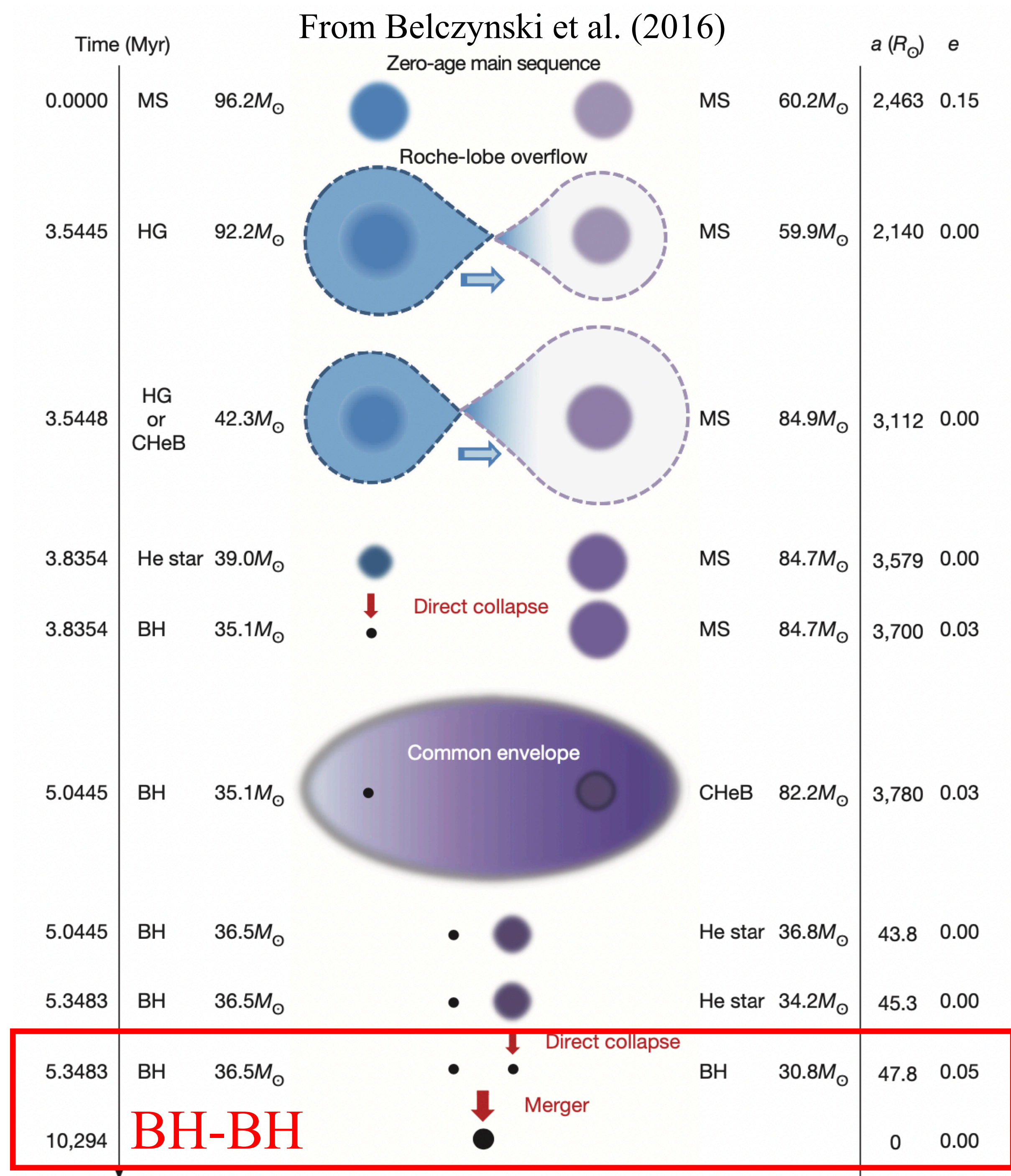
Tanikawa et al. (2022, arXiv:2209.05632)

Masses in the Stellar Graveyard

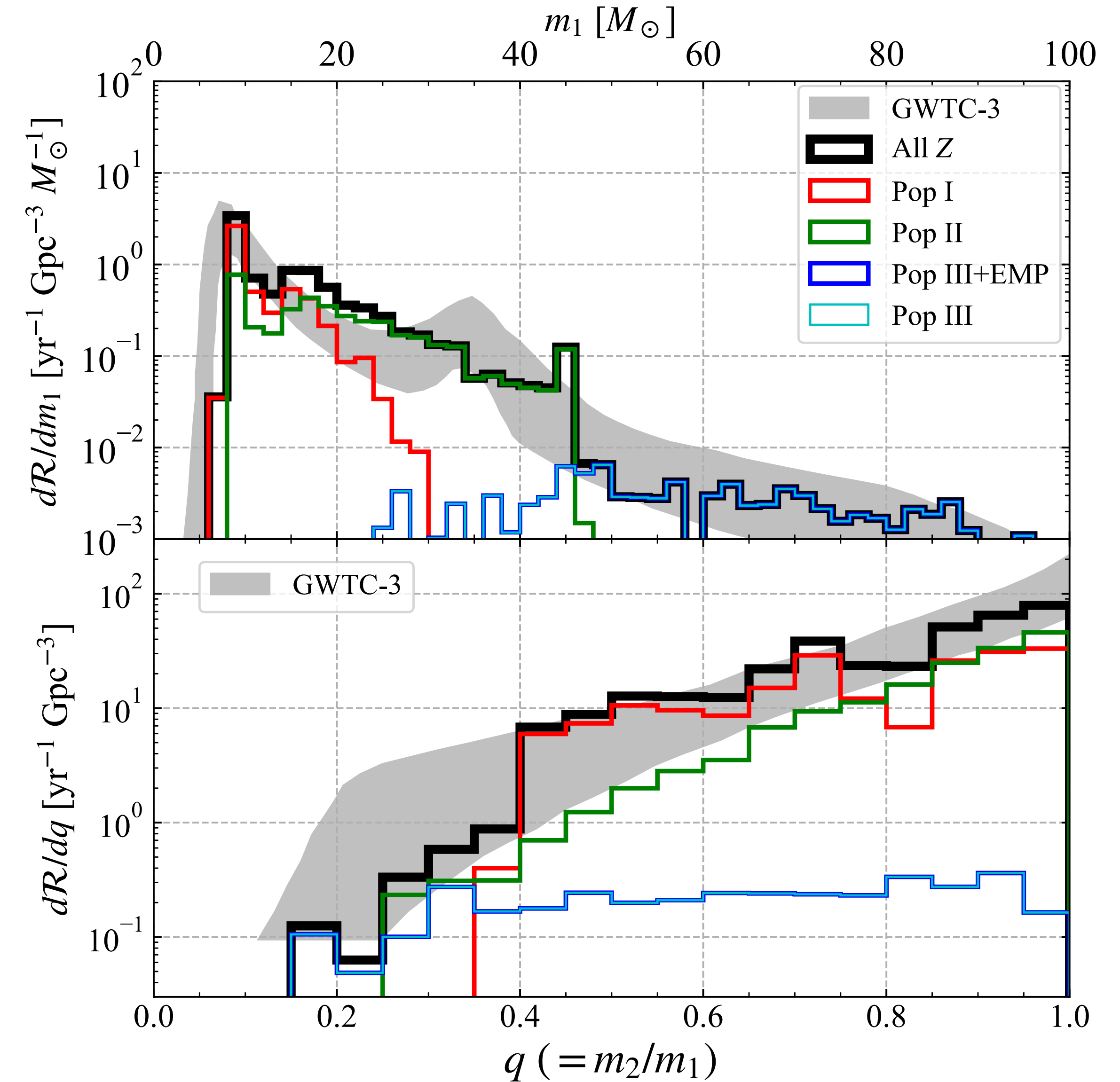
LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes *LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars* *EM Black Holes* *EM Neutron Stars*



- 2014年: 0 $\Rightarrow$ 2019年: 90 $\Rightarrow$ 202X年: 数100
- ダブルブラックホール(BH-BH)の起源 $\Leftrightarrow$ 恒星物理

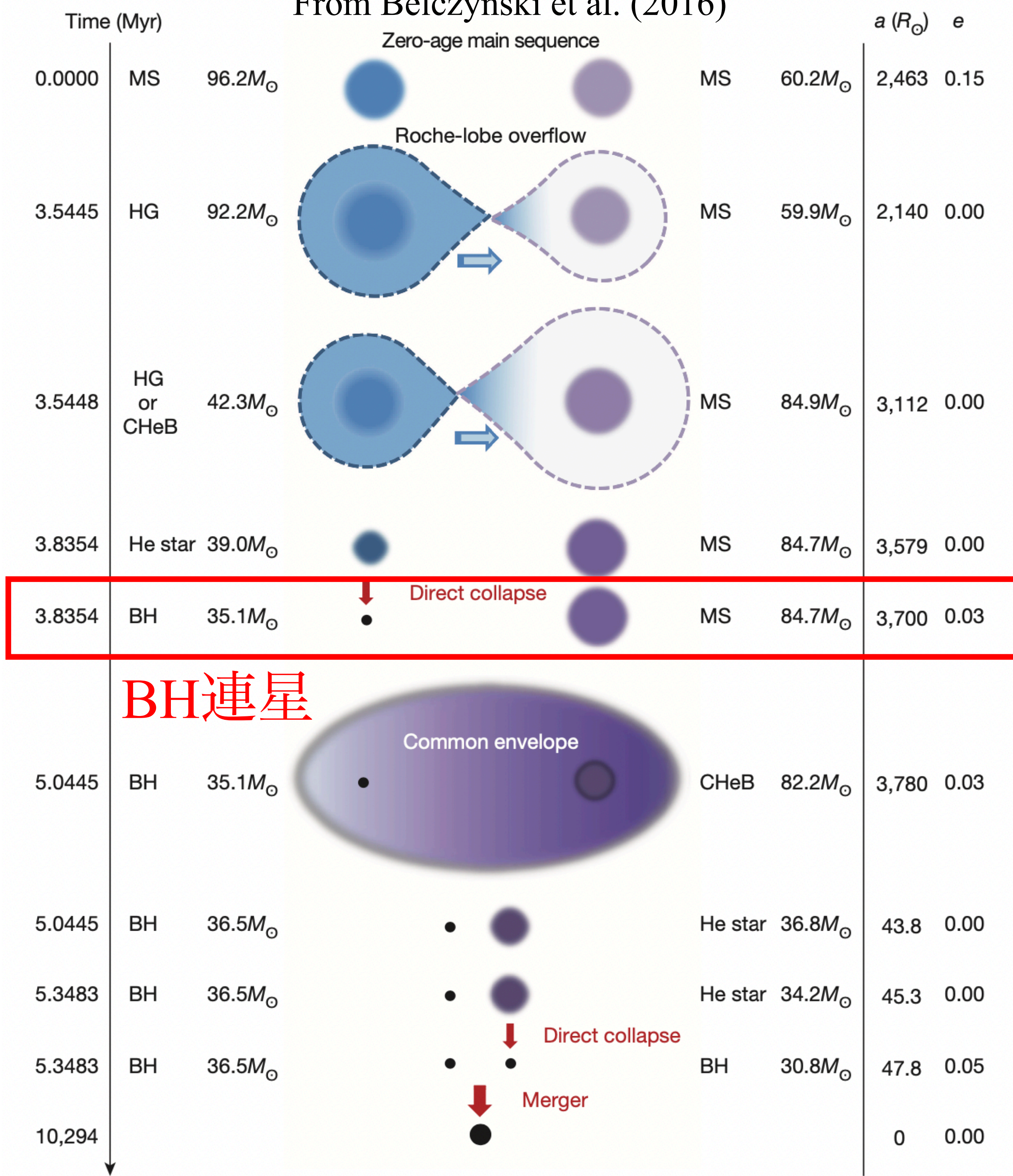


孤立連星から形成されるBH-BH



Tanikawa et al. (2022, ApJ, 926, 83)

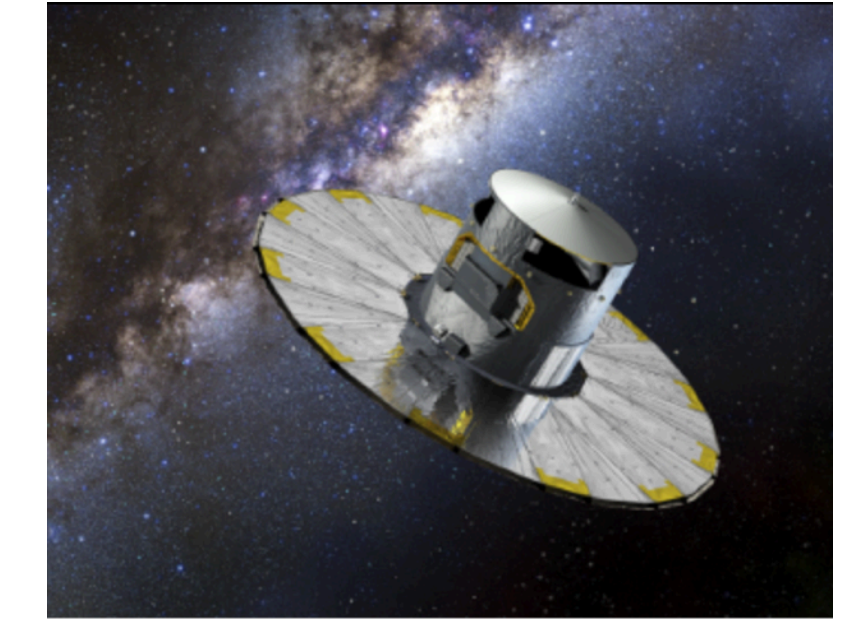
From Belczynski et al. (2016)



位置天文連星 (周期 $10^2 - 10^3$ 日)

明るい恒星

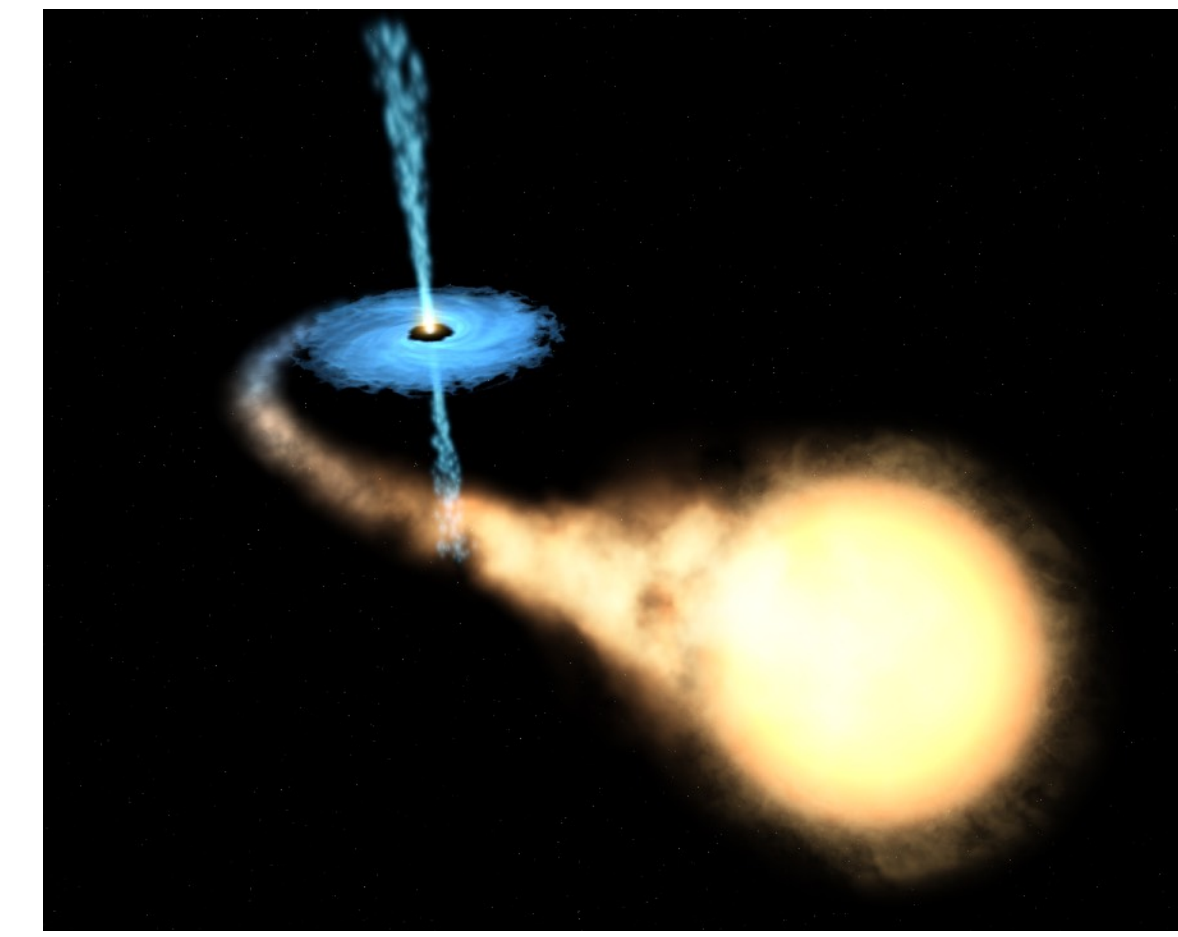
位置天文衛星Gaia



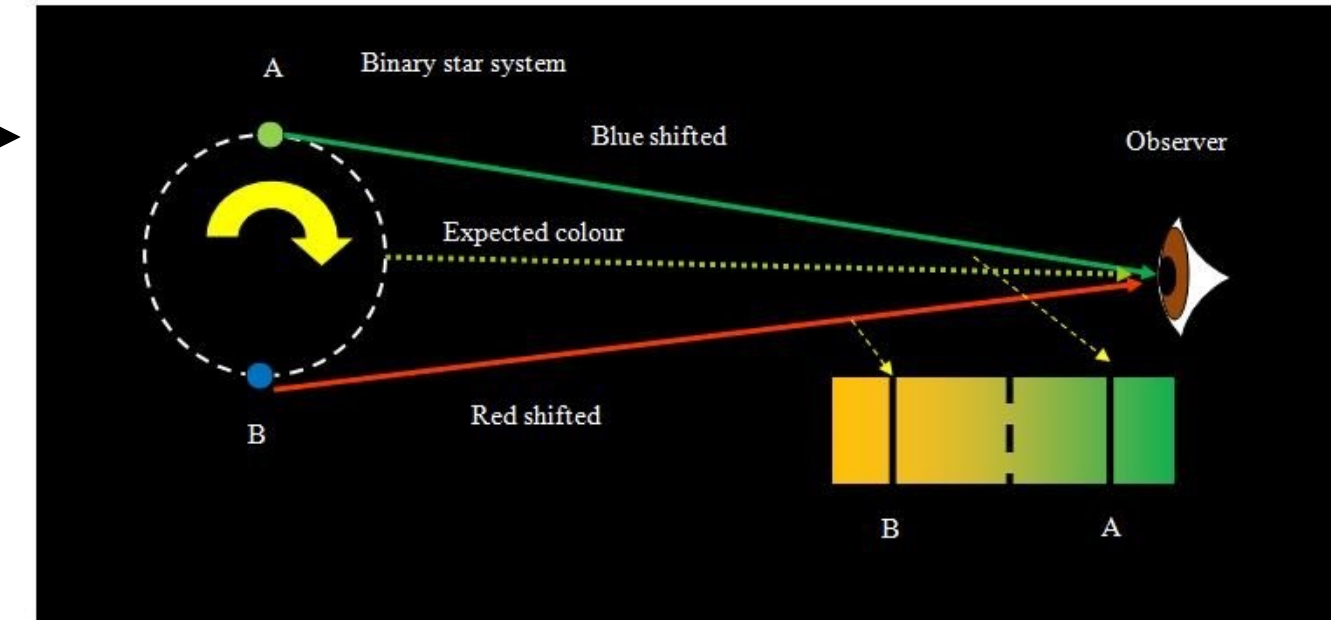
Shikauchi et al. (2020; 2022)

見えない天体 (e.g. BH)

BH連星



X線連星 (周期 $< 10^1$ 日)



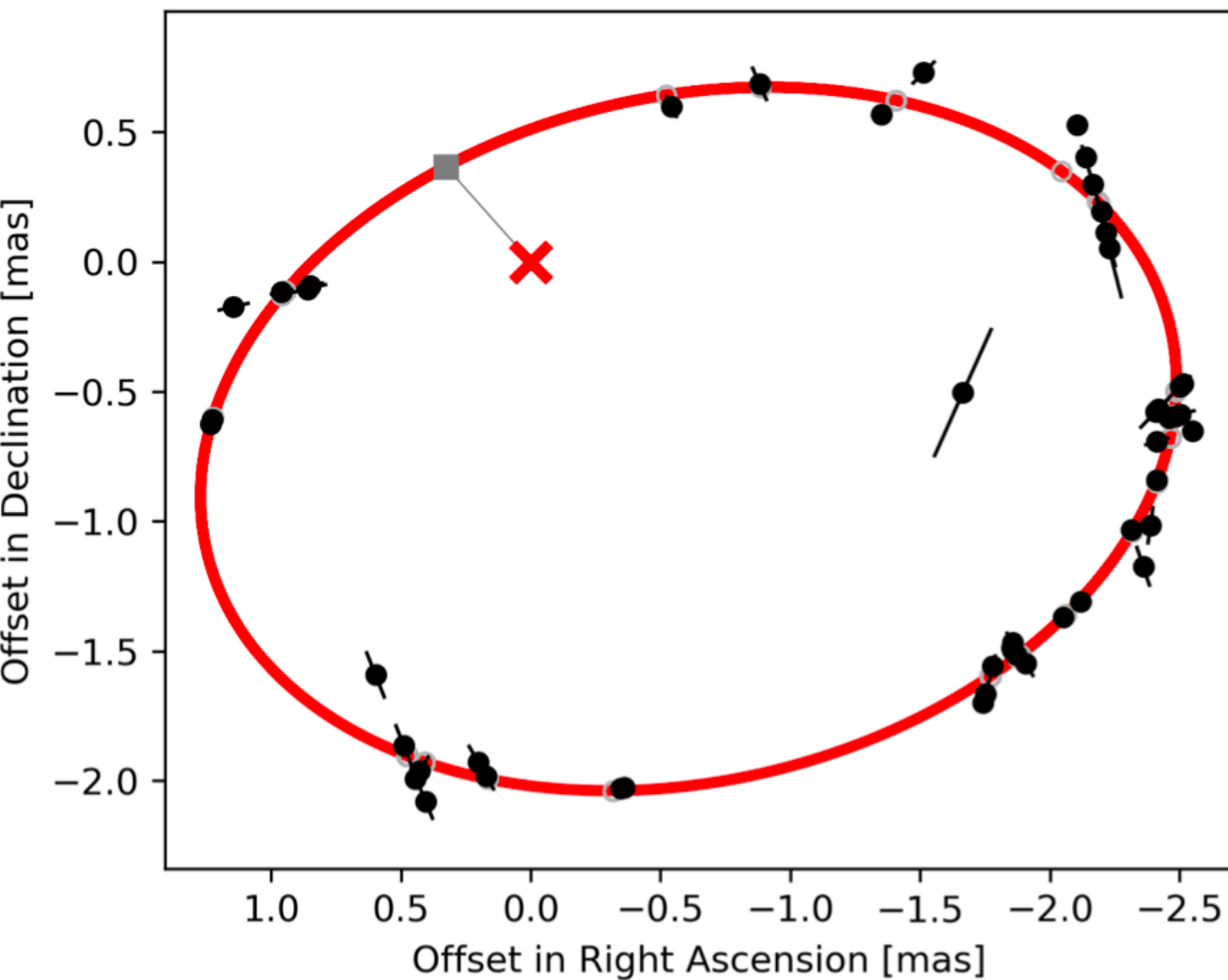
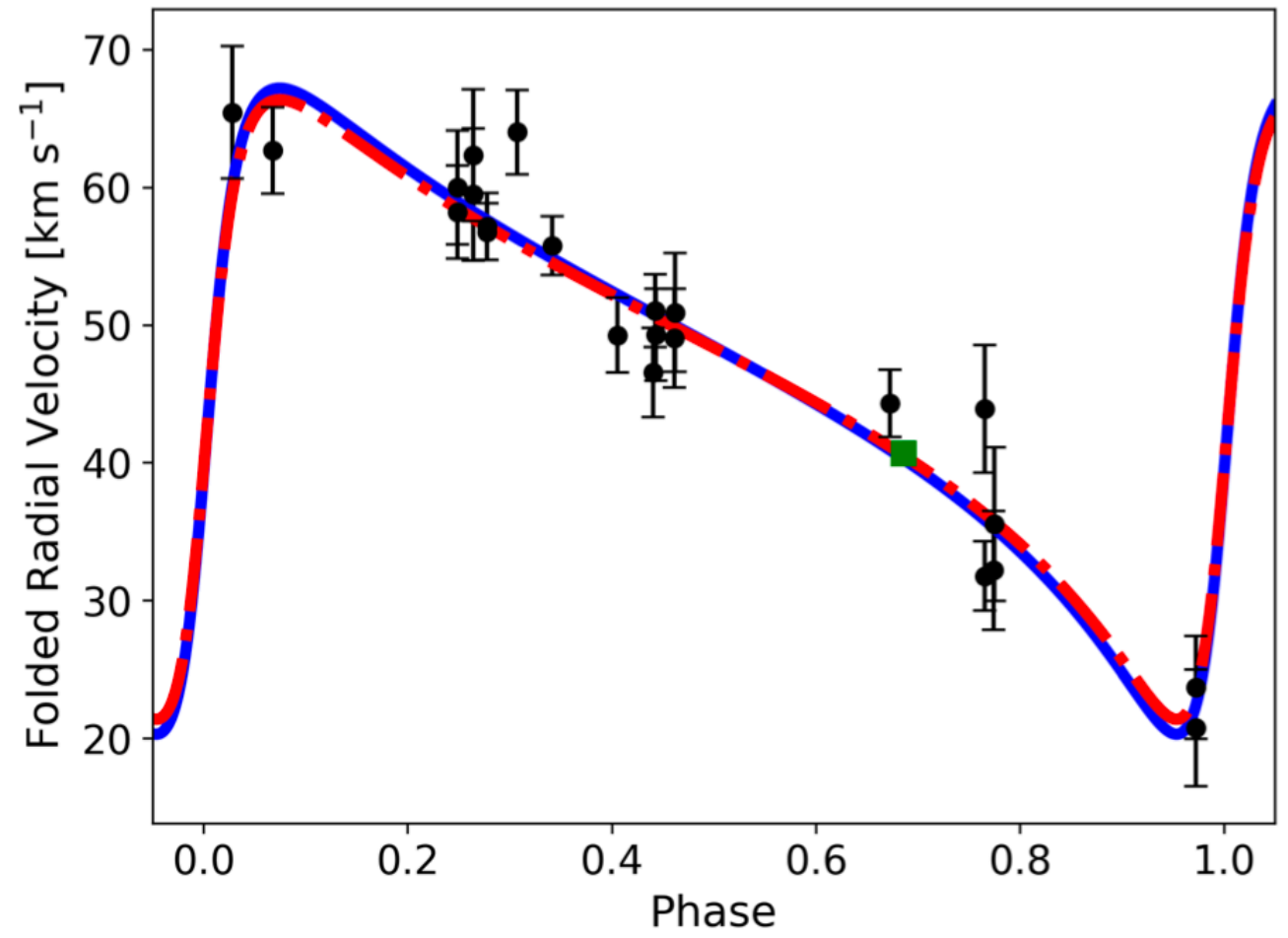
分光連星 (周期 $10^1 - 10^2$ 日)

Gaia DR3の連星軌道解

Gaia collaboration (2022, arXiv:2206.05575)

Table	nss_solution_type	Solutions
nss_acceleration_astro	Acceleration7	246 947
	Acceleration9	91 268
nss_two_body_orbit 位置天文情報のみ	Orbital	134 598
	OrbitalAlternative*	629
	OrbitalTargetedSearch*	533
位置天文・分光情報	AstroSpectroSB1	33 467
	SB1 or SB2	186 905
	EclipsingSpectro	155
nss_non_linear_spectro	EclipsingBinary	86 918
	FirstDegreeTrendSB1	24 083
	SecondDegreeTrendSB1	32 725
nss_vim_fl	VIMF	870

中性子星連星候補



膨大な連星軌道解 ⇒ BH連星に期待

他グループのBH/NS連星候補リスト

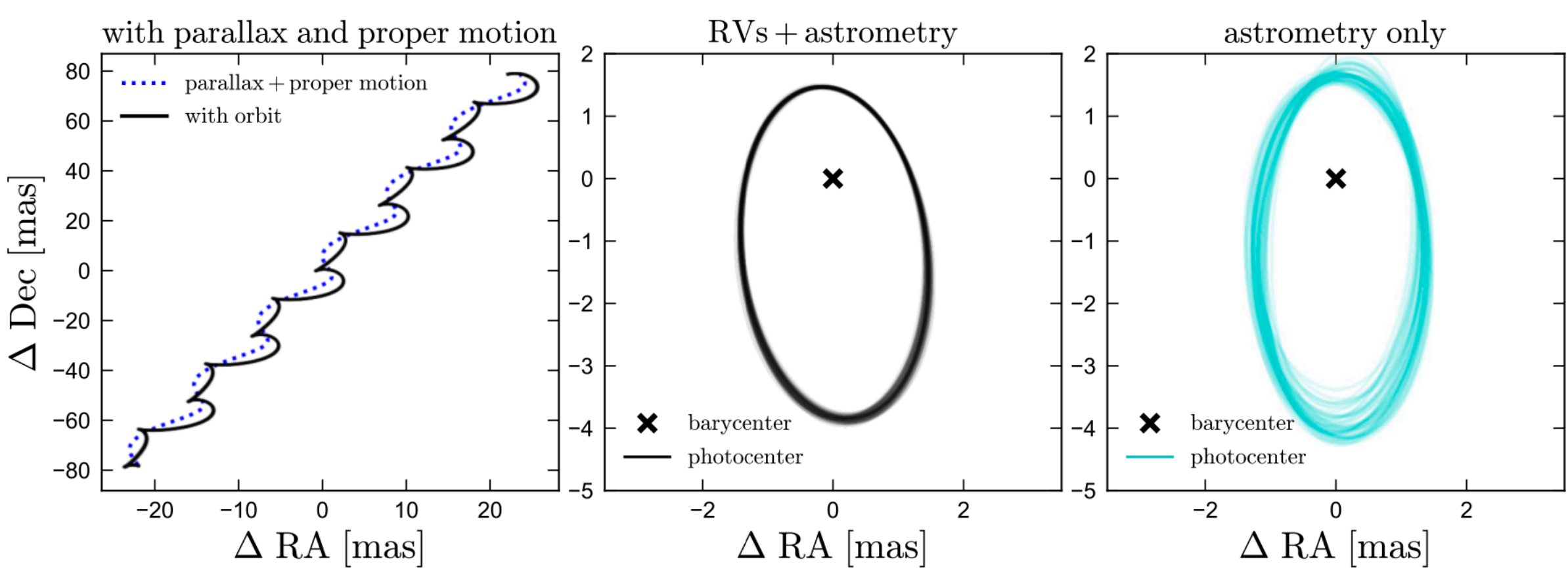
Andrews et al. (2022)

Gaia DR3 Source ID	ϖ (mas)	Gaia G (mag)	P_{orb} (days)	e	m_f ($M_{\odot}$)	M_1^{b} ($M_{\odot}$)	M_2 ($M_{\odot}$)
5681911574178198400	2.18±0.10	15.64	944±62	0.60±0.04	0.57 ^{+0.09} _{-0.07}	0.73±0.2	1.35 ^{+0.19} _{-0.18}
3649963989549165440	1.37±0.10	14.30	893±120	0.36±0.28	0.79 ^{+0.50} _{-0.23}	0.47±0.2	1.41 ^{+0.62} _{-0.34}
747174436620510976	2.58±0.06	13.99	999±53	0.71±0.04	0.56 ^{+0.05} _{-0.04}	0.85±0.2	1.43 ^{+0.15} _{-0.16}
1581117310088807552	4.57±0.04	14.51	927±11	0.52±0.01	0.64 ^{+0.03} _{-0.03}	0.70±0.2	1.43 ^{+0.16} _{-0.17}
1525829295599805184	4.04±0.11	16.18	328±2	0.37±0.04	0.69 ^{+0.07} _{-0.07}	0.64±0.2	1.44 ^{+0.19} _{-0.20}
4271998639836225920	5.53±0.09	15.62	545±2	0.44±0.05	0.59 ^{+0.07} _{-0.06}	0.63 – 1.00	1.44 ^{+0.17} _{-0.17}
1695294922548180224	1.34±0.03	13.12	601±6	0.57±0.04	0.51 ^{+0.04} _{-0.04}	1.13±0.2	1.54 ^{+0.14} _{-0.14}
1854241667792418304	4.41±0.04	14.87	1430±66	0.59±0.02	0.75 ^{+0.03} _{-0.03}	0.70±0.2	1.57 ^{+0.17} _{-0.18}
1058875159778407808	0.90±0.06	14.52	836±59	0.42±0.08	0.69 ^{+0.22} _{-0.12}	0.63 – 1.00	1.58 ^{+0.33} _{-0.24}
1947292821452944896	1.81±0.09	15.94	1246±327	0.59±0.07	0.76 ^{+0.26} _{-0.12}	0.73±0.2	1.62 ^{+0.35} _{-0.24}
2397135910639986304	2.04±0.05	13.35	916±38	0.56±0.06	0.58 ^{+0.11} _{-0.09}	1.10±0.2	1.62 ^{+0.21} _{-0.19}
1144019690966028928	2.05±0.02	13.57	1402±123	0.38±0.04	0.59 ^{+0.06} _{-0.05}	1.08±0.2	1.63 ^{+0.16} _{-0.15}
6593763230249162112	1.29±0.06	13.54	680±6	0.61±0.13	0.66 ^{+0.22} _{-0.16}	1.00±0.2	1.68 ^{+0.34} _{-0.28}
5590962927271507712	1.95±0.08	15.88	818±10	0.72±0.07	0.77 ^{+0.34} _{-0.21}	0.63 – 1.00	1.69 ^{+0.48} _{-0.34}
809741149368202752	1.38±0.08	14.91	922±101	0.35±0.07	0.77 ^{+0.17} _{-0.13}	0.91±0.2	1.76 ^{+0.27} _{-0.24}
5847919241396757888	1.46±0.15	16.90	1254±290	0.68±0.11	0.86 ^{+0.88} _{-0.39}	0.63 – 1.00	1.80 ^{+1.05} _{-0.56}
5580526947012630912	1.13±0.02	13.36	654±10	0.76±0.08	0.68 ^{+0.37} _{-0.21}	1.13±0.2	1.80 ^{+0.55} _{-0.35}
1350295047363872512	1.12±0.03	13.52	657±9	0.66±0.07	0.57 ^{+0.11} _{-0.09}	1.44±0.2	1.83 ^{+0.22} _{-0.19}
4744087975990080896	1.99±0.12	17.07	631±11	0.61±0.09	0.87 ^{+0.35} _{-0.25}	0.63 – 1.00	1.83 ^{+0.48} _{-0.39}
6001459821083925120	0.89±0.04	13.60	564±13	0.47±0.10	0.86 ^{+0.45} _{-0.29}	0.63 – 1.00	1.81 ^{+0.58} _{-0.44}
1749013354127453696	0.61±0.05	14.49	932±155	0.51±0.15	0.84 ^{+0.64} _{-0.42}	1.00±0.2	1.93 ^{+0.86} _{-0.63}
4314242838679237120	2.00±0.22	17.02	1146±382	0.70±0.09	1.22 ^{+1.65} _{-0.64}	0.63 – 1.00	2.25 ^{+1.87} _{-0.84}
5593444799901901696	0.60±0.05	14.42	1039±292	0.44±0.14	1.15 ^{+0.66} _{-0.47}	1.27±0.2	2.57 ^{+0.86} _{-0.69}
6328149636482597888	1.23±0.08	13.34	736±23	0.14±0.07	1.29 ^{+1.28} _{-0.23}	1.21±0.2	2.71 ^{+1.50} _{-0.36}

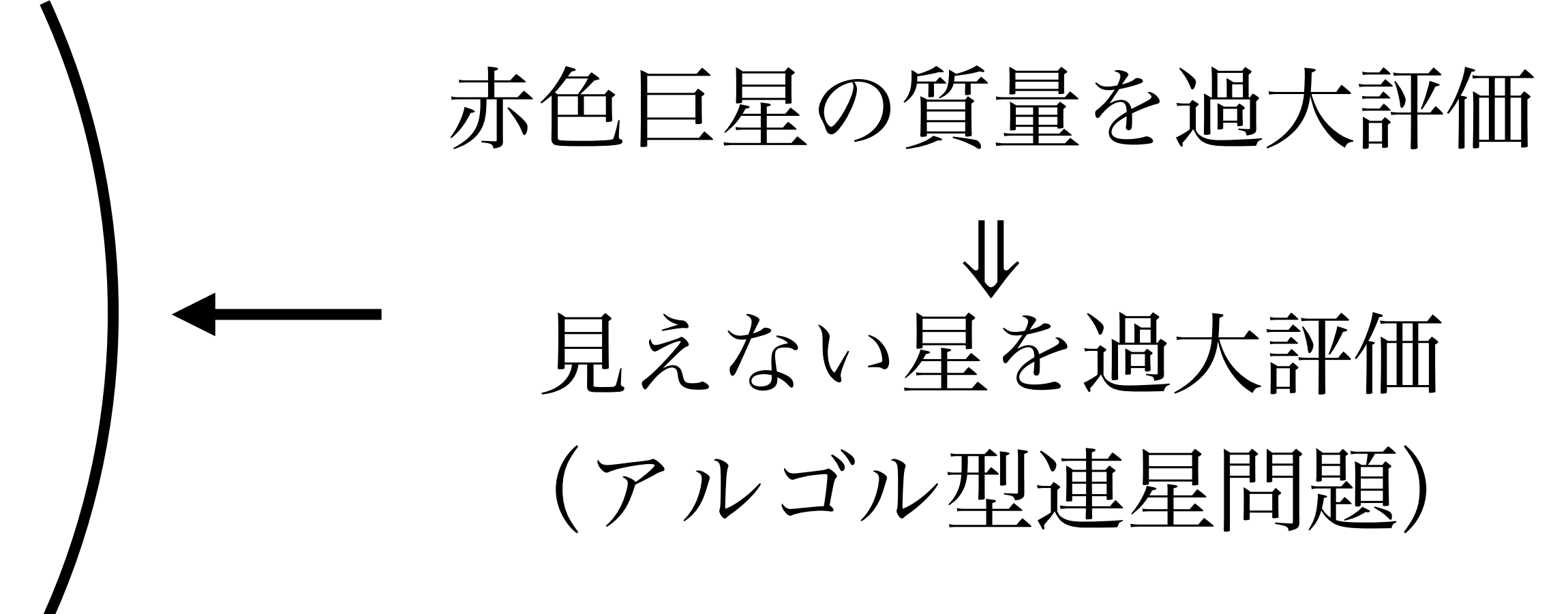
Shahaf et al. (2022)

Source ID	M_2 ($M_{\odot}$)	M_1 ($M_{\odot}$)	Period (day)	Eccentricity	s	σ_{TI}
4373465352415301632	12.8(2.6)	1.0	185.77(31)	0.489(74)	13.6	1.2
6281177228434199296	11.9(1.5)	1.0	153.95(36)	0.180(42)	24.3	0.6
3509370326763016704	3.69(24)	0.7	109.392(65)	0.237(16)	76.1	0.2
6802561484797464832	3.08(84)	1.2	574.8(6.2)	0.830(71)	6.8	0.3
3263804373319076480	2.75(50)	1.0	510.7(4.7)	0.278(23)	18.1	2.1
6601396177408279040	2.57(50)	1.0	533.5(2.0)	0.791(43)	10.8	1.1
6328149636482597888	2.45(20)	1.1	736(12)	0.135(36)	89.9	3.8
6588211521163024640	2.41(40)	1.1	943(45)	0.97(12)	10.4	4.2
4482912934572480384	1.84(19)	0.9	182.39(35)	0.703(39)	19.3	0.7
5580526947012630912	1.83(25)	1.2	654.3(4.9)	0.761(40)	12.9	0.1

El-Badry et al. (2023) ... 確定したBH連星



過去の研究と我々の研究

- 過去の研究：見える星を主系列星に限定
 - Andrews et al. (2022, arXiv:2207.00680)
 - Shahaf et al. (2022, arXiv:2209.00828)
 - El-Badry et al. (2022, arXiv:2209.06833)
 - 我々の研究 (Tanikawa et al. 2022, arXiv:2209.05632)：主系列星に限定しない
 - 見える星の質量に関係なく、見えない星が $3M_{\odot}$ 以上の質量を持つケースを探索
 - 位置天文情報だけでなく分光情報を持つ連星に限定
- 赤色巨星の質量を過大評価
↓
見えない星を過大評価
(アルゴル型連星問題)
- 

我々のサンプル

Gaia AQL query

```
select nss.*, gs.*  
from gaiadr3.nss_two_body_orbit as nss,  
gaiadr3.gaia_source as gs  
where nss.source_id = gs.source_id
```

位置天文・分光データを利用して
得た軌道解を持つ連星 (33467)

```
and (nss.nss_solution_type = 'AstroSpectroSB1'  
    or (nss.nss_solution_type = 'Orbital'  
        and gs.rv_amplitude_robust IS NOT NULL)  
    or gs.non_single_star = 3)
```

位置天文データと分光データそれぞれを独立
に利用して得た軌道解を持つ連星 (12)

位置天文データのみを利用し
て得た軌道解を持つ連星だ
が、分光データを持つ (30629)

Astrometric mass function

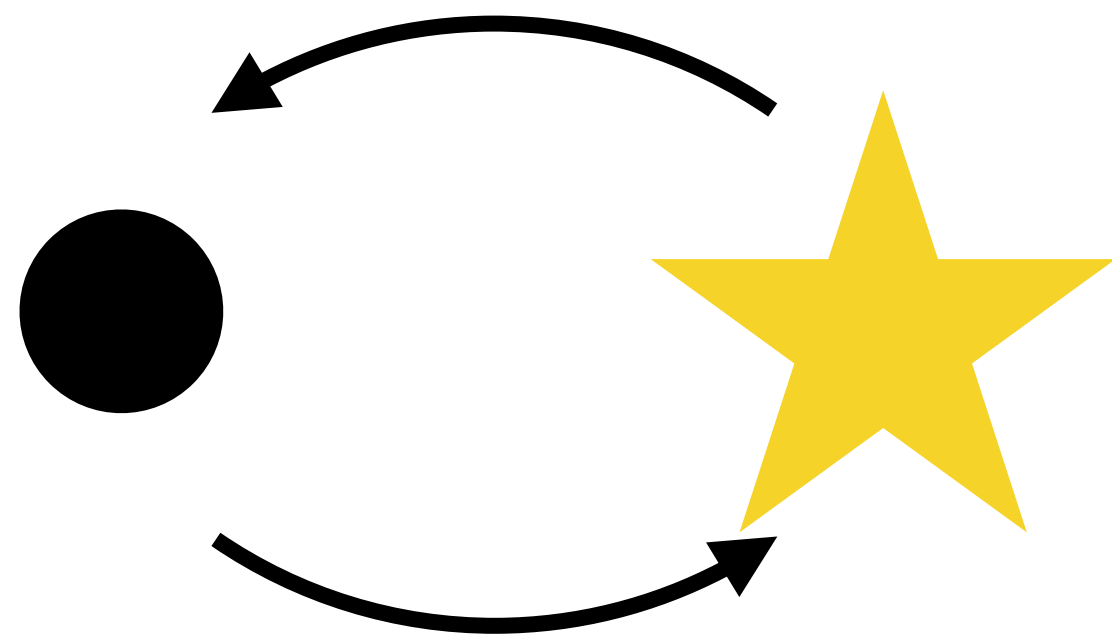
$$f_{\text{m,astro}} = (m_1 + m_2) \left| \frac{m_2}{m_1 + m_2} - \frac{F_2/F_1}{1 + F_2/F_1} \right|^3$$

位置天文
データ

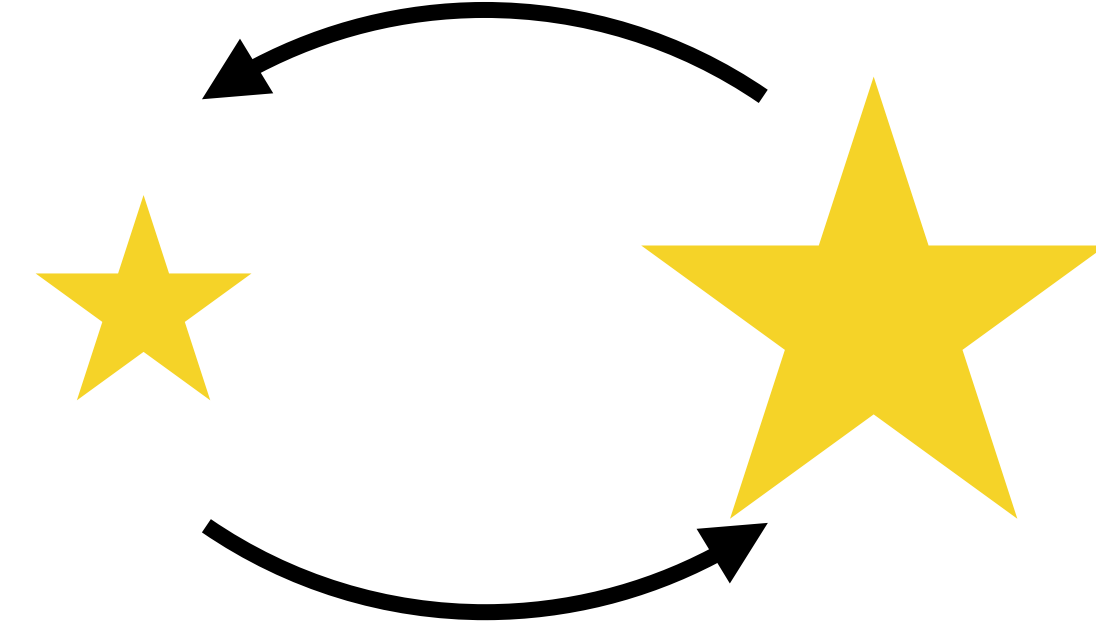
$$= 1 \left(\frac{a_1}{\text{mas}} \right)^3 \left(\frac{\varpi}{\text{mas}} \right)^{-3} \left(\frac{P}{\text{yr}} \right)^{-2} [M_{\odot}]$$

見た目の軌道長半径 年周視差 周期

$P = 2\pi (a^3/GM)^{1/2}$ を変更



見える星の運動がそのまま反映



見える星の運動がぼやける

Spectroscopic mass function

$$f_{\text{m,spectro}} = (m_1 + m_2) \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right)^3 \xrightarrow{P = 2\pi (a^3/GM)^{1/2} \text{ を変更}}$$

位置天文

$$= 3.7931 \times 10^{-5} \left(\frac{K_1}{\text{km s}^{-1}} \right)^3 \left(\frac{P}{\text{yr}} \right) (1 - e^2)^{3/2} \sin^{-3} i [M_{\odot}]$$

分光データ
データ

視線速度の振幅の半分 周期 離心率 軌道傾斜角

BH連星探査の基準

$$f_{\text{m,astro}} = (m_1 + m_2) \left| \frac{m_2}{m_1 + m_2} - \frac{F_2/F_1}{1 + F_2/F_1} \right|^3$$

$$= 1 \left(\frac{a_1}{\text{mas}} \right)^3 \left(\frac{\varpi}{\text{mas}} \right)^{-3} \left(\frac{P}{\text{yr}} \right)^{-2} [M_\odot]$$

$F_2 = 0$ (e.g. BH)なら

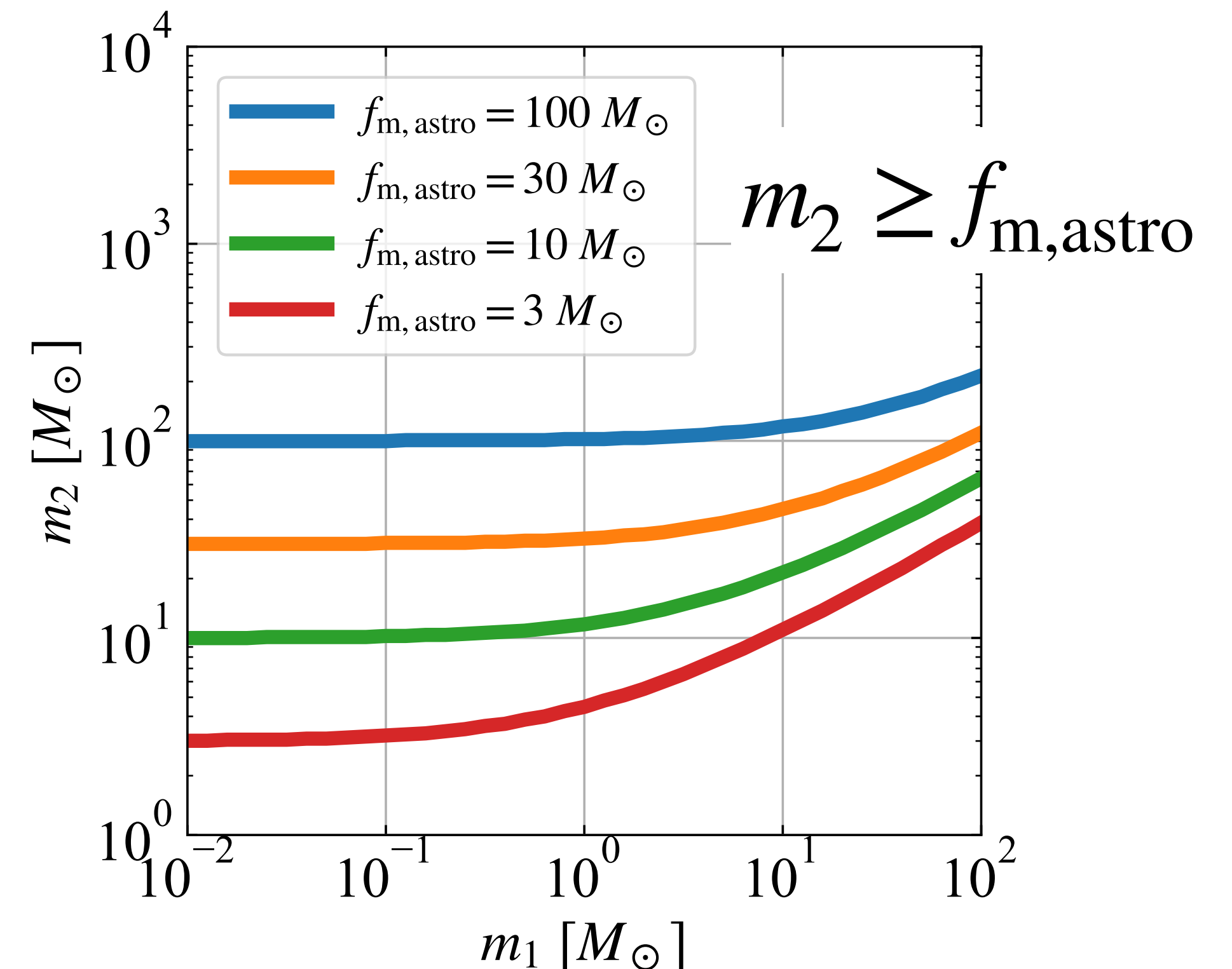
$$f_{\text{m,astro}} = f_{\text{m,spectro}}$$

$$f_{\text{m,spectro}} = (m_1 + m_2) \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right)^3$$

$$= 3.7931 \times 10^{-5} \left(\frac{K_1}{\text{km s}^{-1}} \right)^3 \left(\frac{P}{\text{yr}} \right) (1 - e^2)^{3/2} \sin^{-3} i [M_\odot]$$

$$1. \quad 0.5 \leq f_{\text{m,spectro}}/f_{\text{m,astro}} \leq 2$$

$$2. \quad f_{\text{m,astro}} \geq 3 M_\odot$$



$\log(f_{\text{m, spectro}}/f_{\text{m, astro}})$

1つのBH連星候補



AstroSpectroSB1

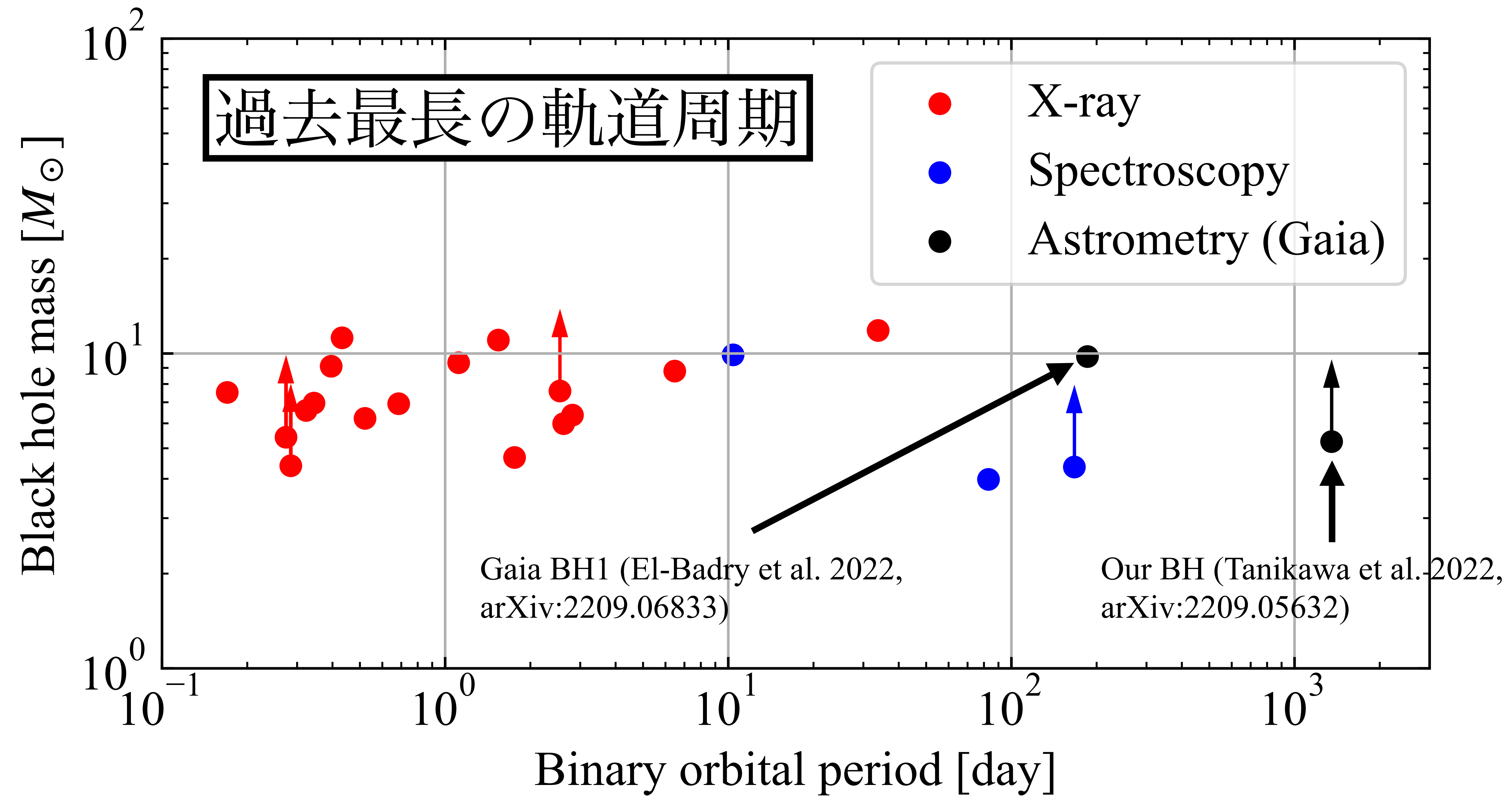
33467

Orbital

30629+12

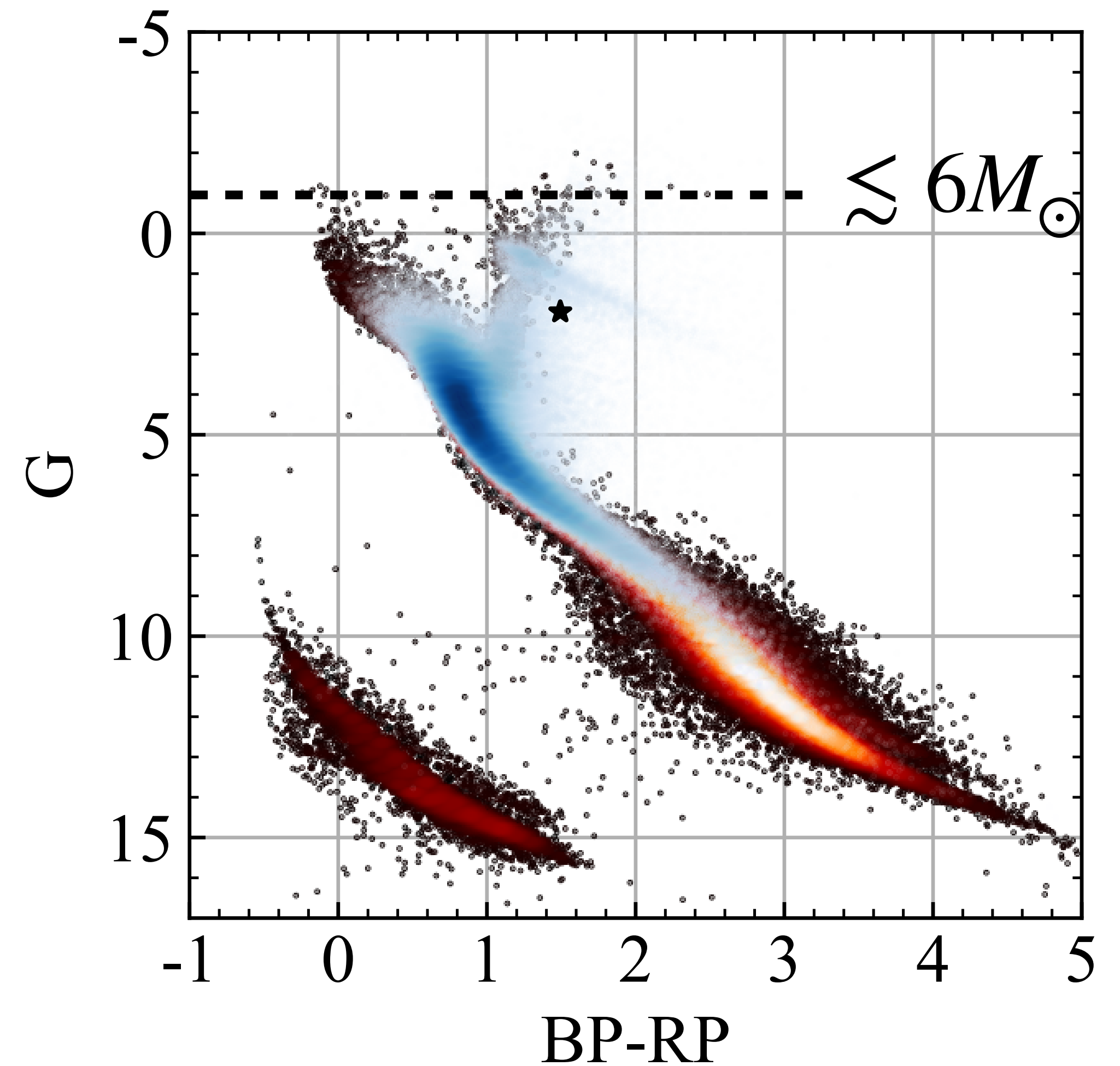
$\log(f_{\text{m, astro}}) [M_{\odot}]$

$\log(f_{\text{m, astro}}) [M_{\odot}]$

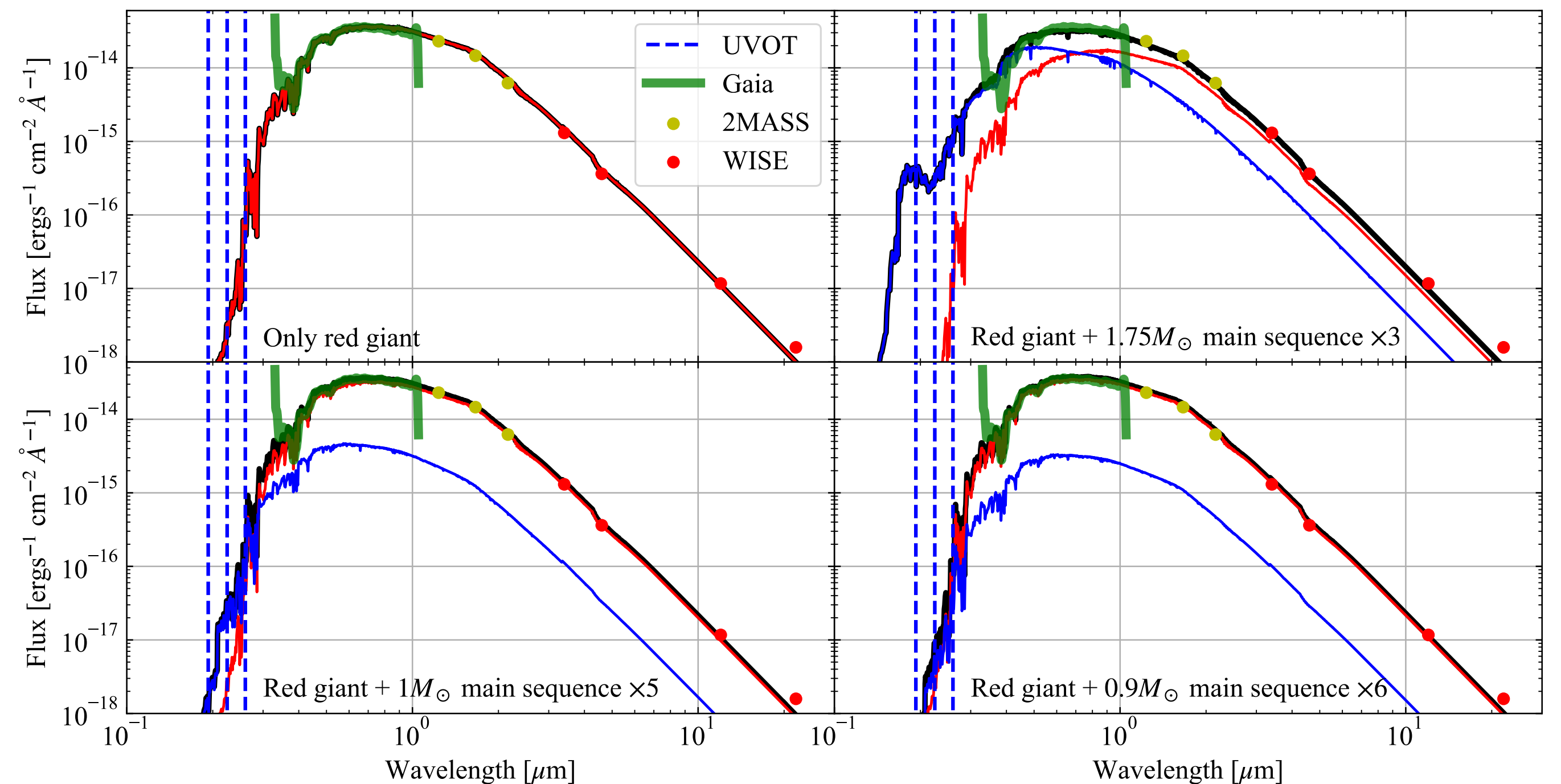
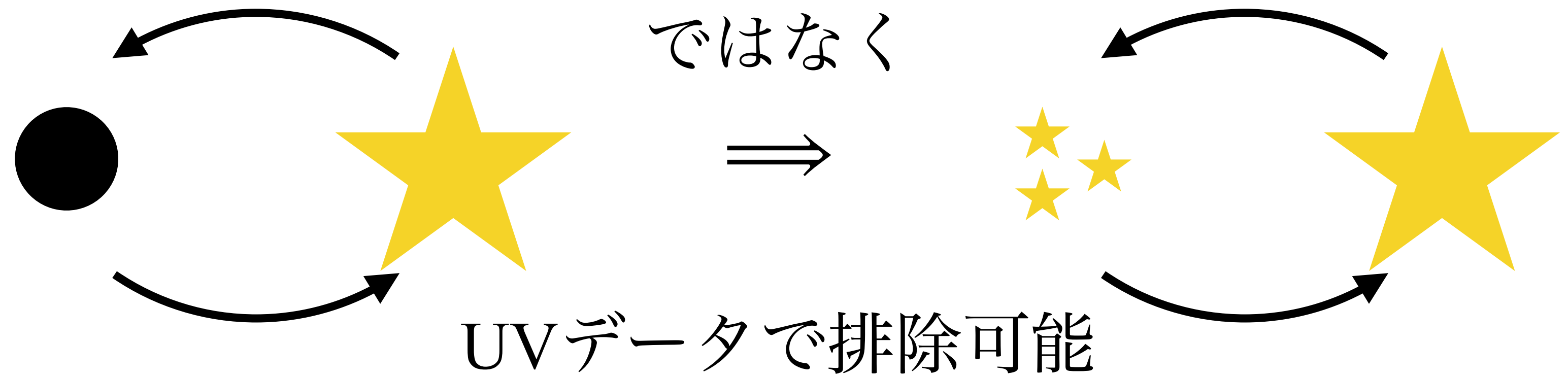
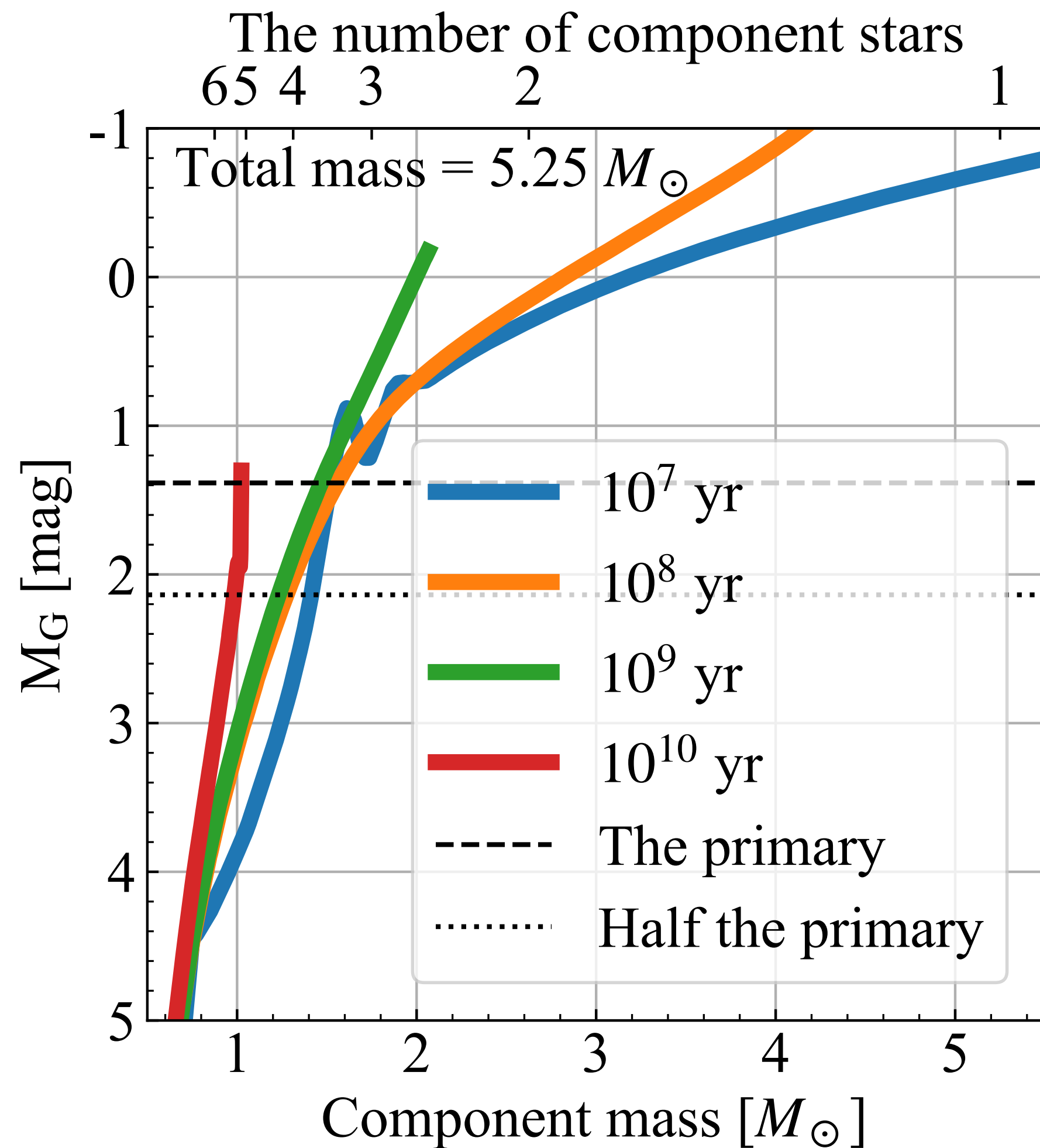


BH-BHの親星ではない

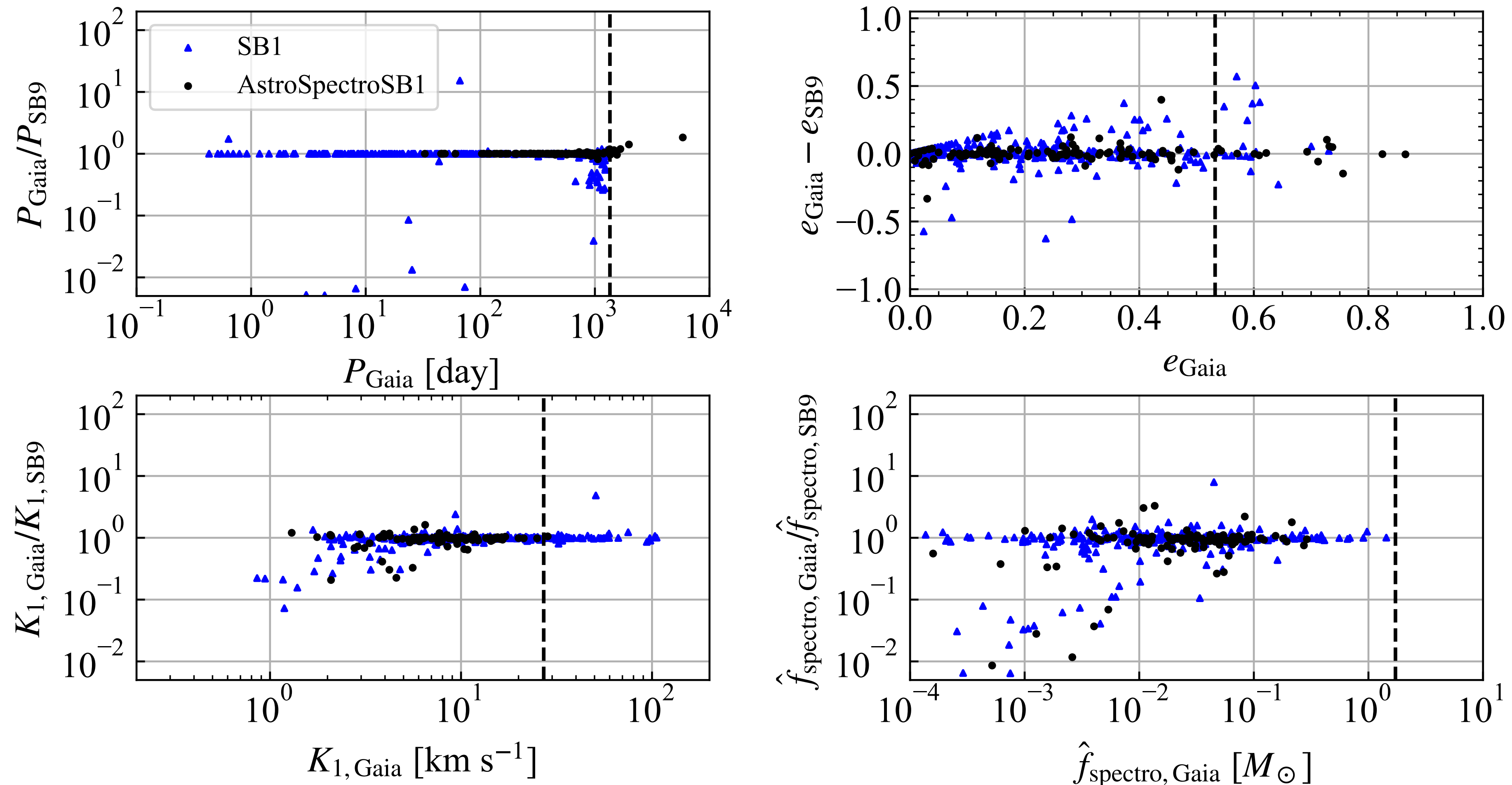
- Gaia DR3からは連星BHの親星は未発見
- 明るい星の質量が小 ($< 8M_{\odot}$)
- Gaia DR3の連星の明るい星は $< 8M_{\odot}$



BH連星でない可能性



Gaiaの分光観測の信頼性



言われるほど悪くない。しかし、Gaia以外での検証は必要。

まとめ

- GaiaによってBH-BHの親星であるBH連星を発見できる可能性あり
- BHと赤色巨星からなると思われるBH連星候補を発見
- BH連星ならば、連星周期1352日は過去最長
- 赤色巨星の質量が小さいためBH-BHの親星ではない（そもそもGaia DR3にはそのようなものはないかもしれない）
- BH連星と確定するには、UVや分光による追観測が必要

