散開星団におけるGaia BH・Gaia NSの力学的捕獲による形成

谷川衝（福井県立大学）

YITP workshop
“Exploring Extreme Transients: Emerging Frontiers and Challenges”

概要

- Gaiaによる「不活性」BH/NS連星の探査の基本
- BH/NS探査のモチベーション
- 不活性BH/NS連星の発見史
- Gaia BH/NSの形成過程の問題

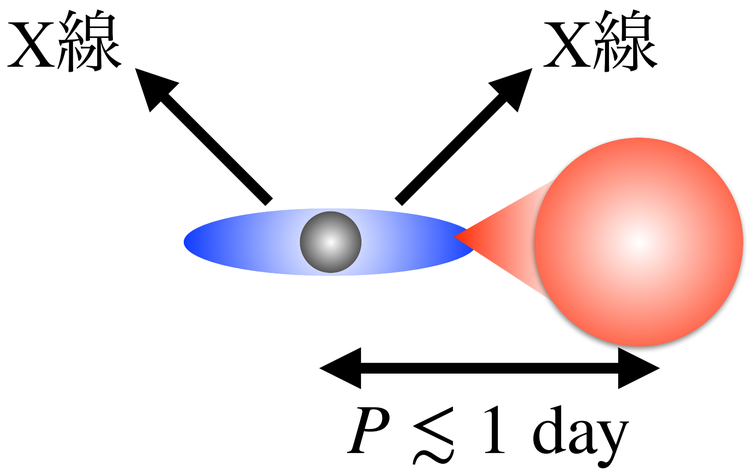
概要

- Gaiaによる「不活性」BH/NS連星の探査の基本
- BH/NS探査のモチベーション
- 不活性BH/NS連星の発見史
- Gaia BH/NSの形成過程の問題

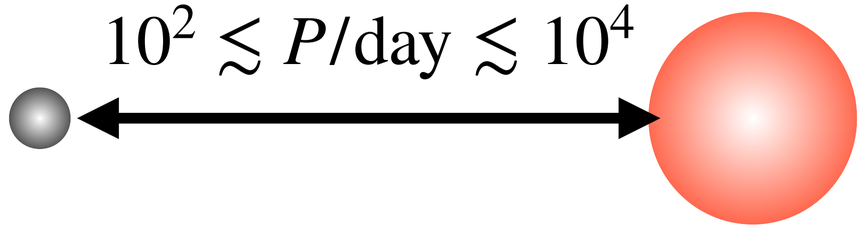
不活性/休眠/非相互作用のBH/NS連星

Inert/dormant/non-interaction BH/NS binary

「活性」



「不活性」



この発表では「不活性」で統一します。

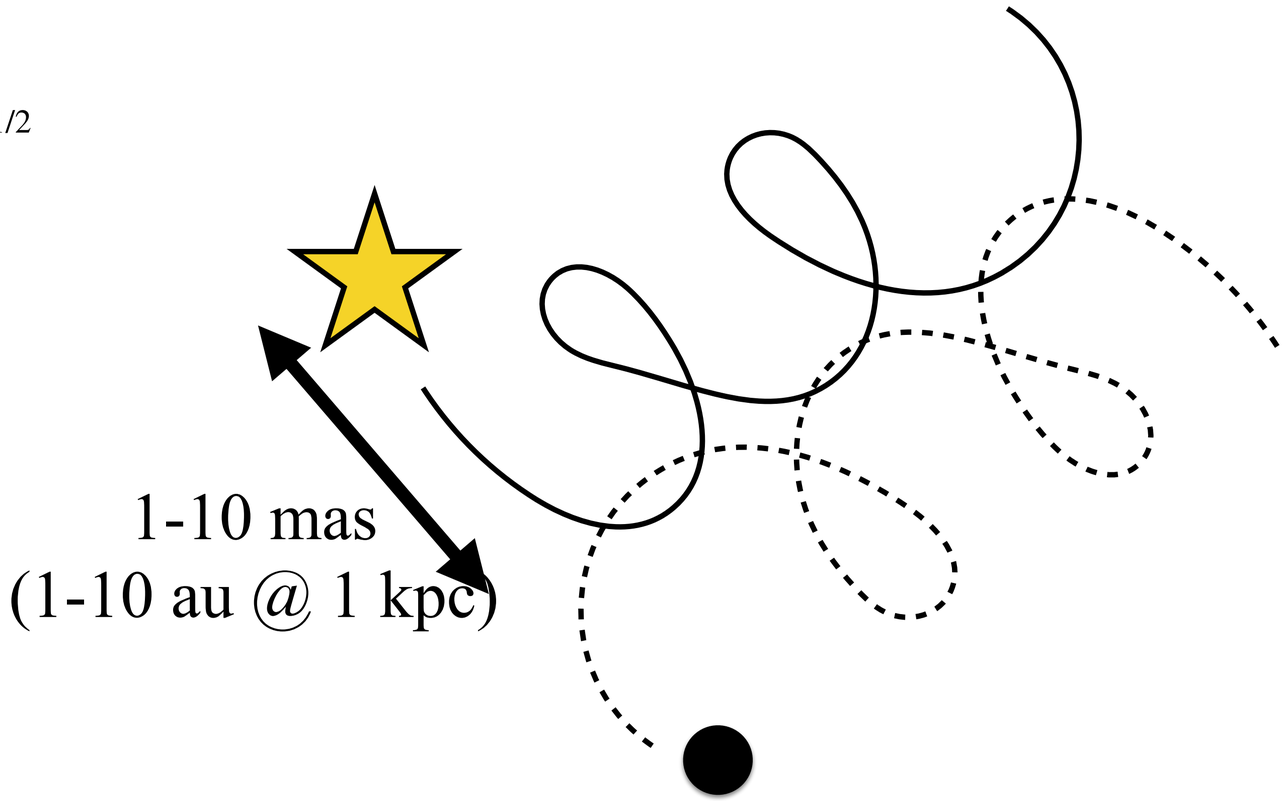
「活性」BH/NS連星との比較以外では単にBH/NS連星と言います。

探査の原理とGaiaのスペック

- 恒星（光学中心）の周期的な揺らぎの観測
- 連星周期

$$P \sim 120\ \mathrm{day} \left(\frac{D}{1\mathrm{kpc}}\right)^{3/2} \left(\frac{a}{1\mathrm{mas}}\right)^{3/2} \left(\frac{m_1+m_2}{10M_\odot}\right)^{-1/2}$$

- Gaiaスペック
  - 空間分解能: ~ 0.01mas
  - ケイデンス: 60日、運用期間: 10年
- $P = 10^2 - 10^4$ day, $D \lesssim 1$ kpcがターゲット
  - 運用期間以下の周期であれば、長周期の方が空間分解能が要らないので見つけやすい



Mass function (伴星質量の下限)

- Astrometric mass function

$$f_{\mathrm{m,astro}} = \frac{m_2^3}{(m_1+m_2)^2} = 1M_\odot \left(\frac{a_1}{\mathrm{mas}}\right)^3 \left(\frac{\varpi}{\mathrm{mas}}\right)^{-3} \left(\frac{P}{\mathrm{yr}}\right)^{-2}$$

  - a_1: 見た目の軌道長半径
  - ϖ: 年周視差
  - P: 連星周期

m_2の測定には

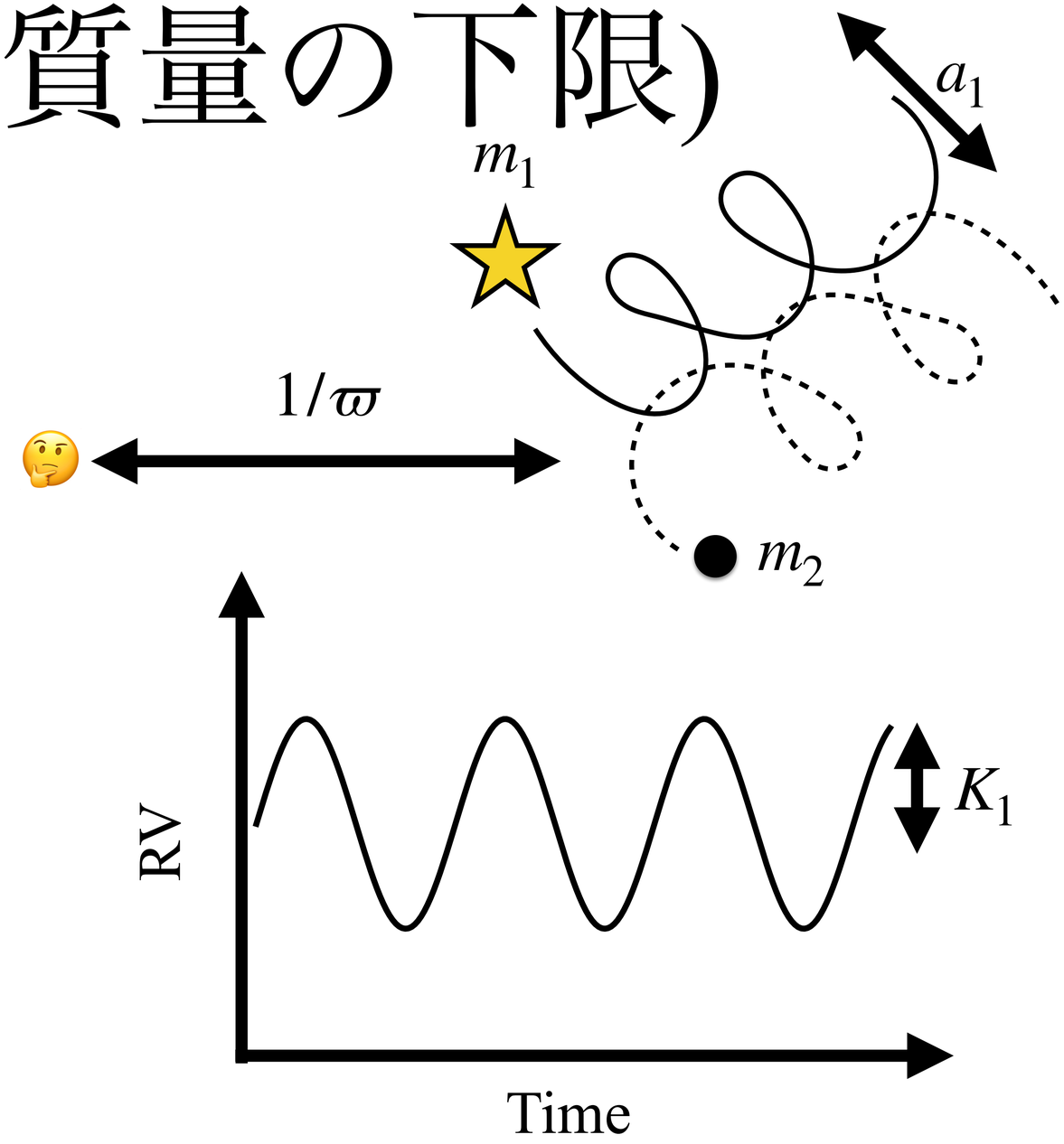
m_1が必要

- Spectroscopic mass function

$$f_{\mathrm{m,spectro}} = \frac{m_2^3}{(m_1+m_2)^2}\sin^3 i = 1M_\odot \left(\frac{K_1}{30\mathrm{km/s}}\right)^3 \left(\frac{P}{\mathrm{yr}}\right)(1-e^2)^{3/2}$$

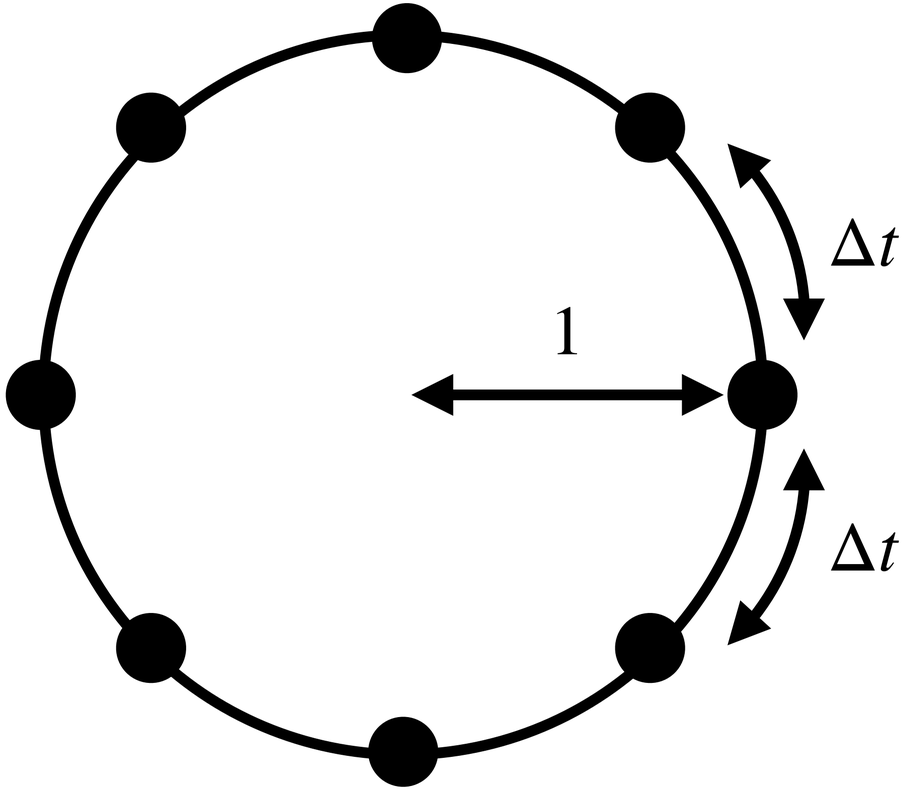
  - K_1: 視線速度の半値幅
  - e: 離心率
  - i: 軌道傾斜角

m_1とiが必要

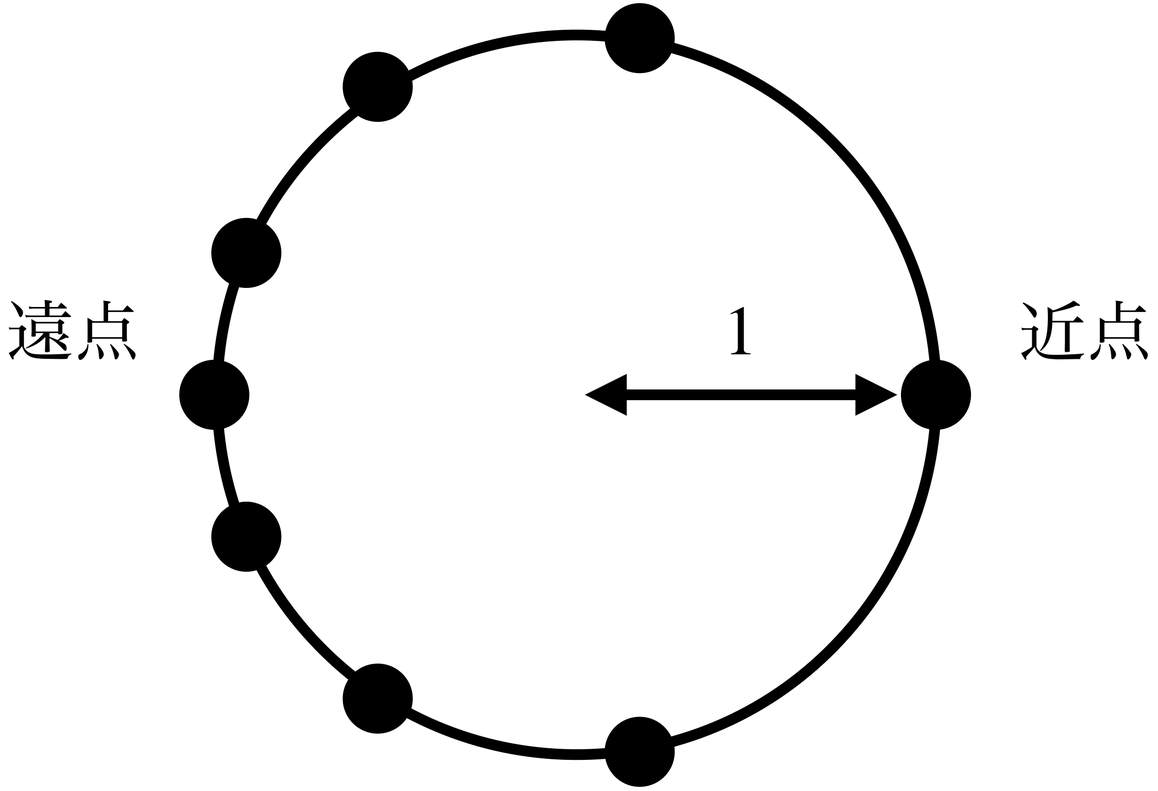


（分光観測と違って）軌道傾斜角の縮退はない

$e = 0, i = 0^\circ \Longrightarrow a_1 = 1$



$e = \sqrt{3}/2, i = 60^\circ \Longrightarrow a_1 = 2$



位置天文観測における縮退

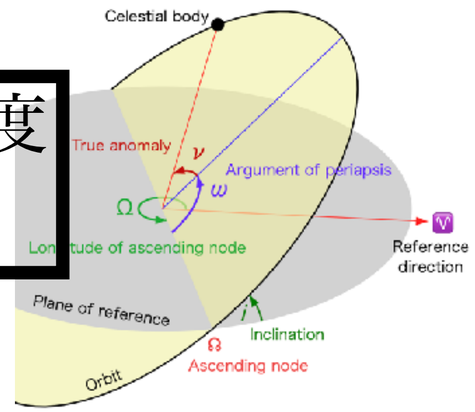
$e = 0, i = 30°$

質量決定に影響なし

Line of sight

昇交点経度に縮退

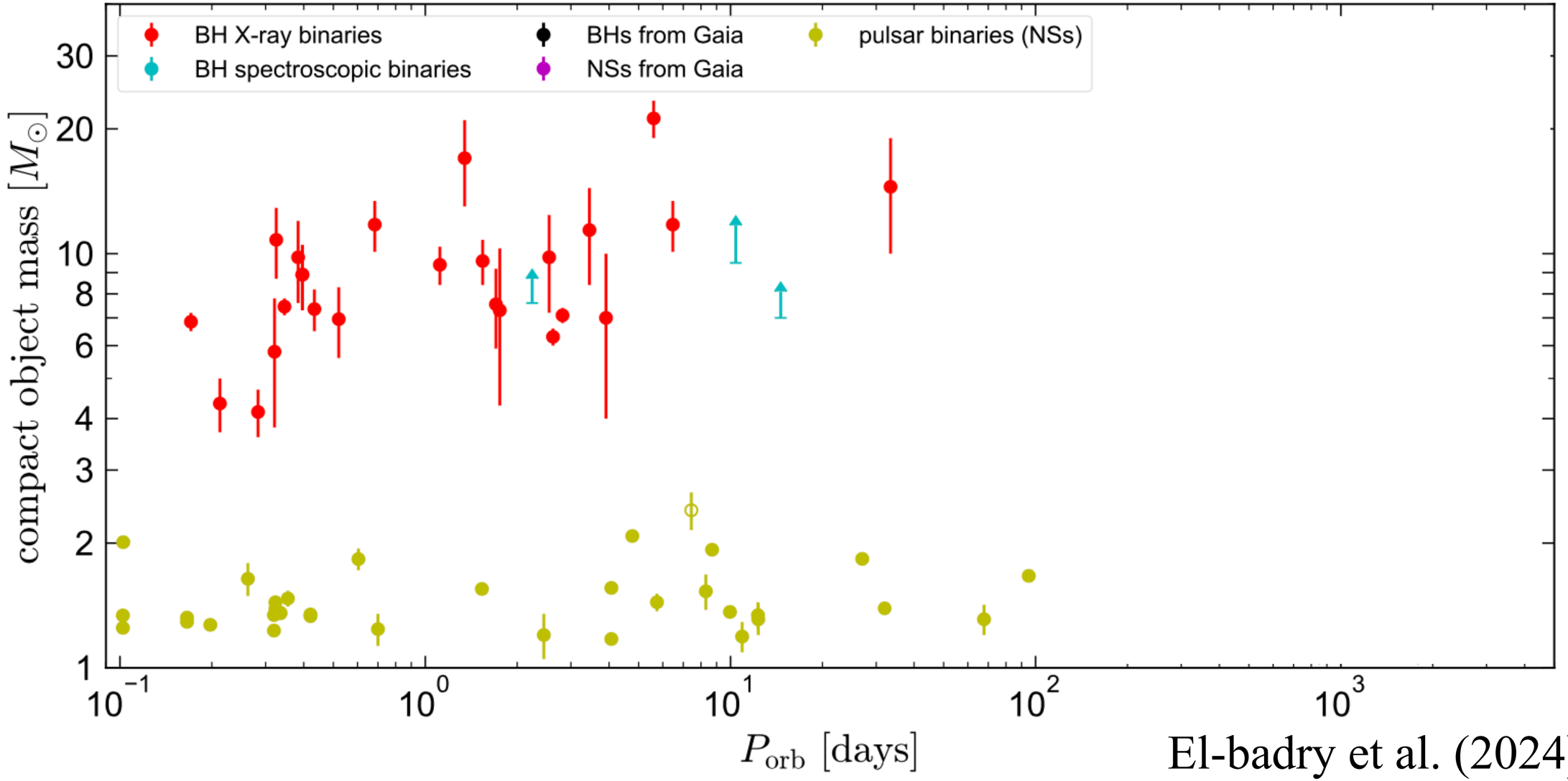
$\Omega = \pm\pi$



概要

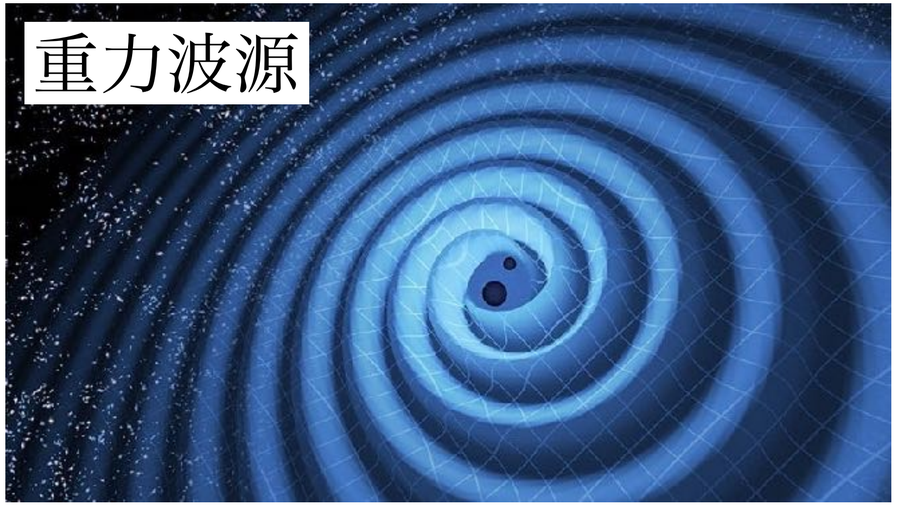
- GaiaによるBH/NS連星の探査の基本
- BH/NS探査のモチベーション
- BH/NS連星の発見史
- Gaia BH/NSの形成過程の問題

多様なBH/NSの発見

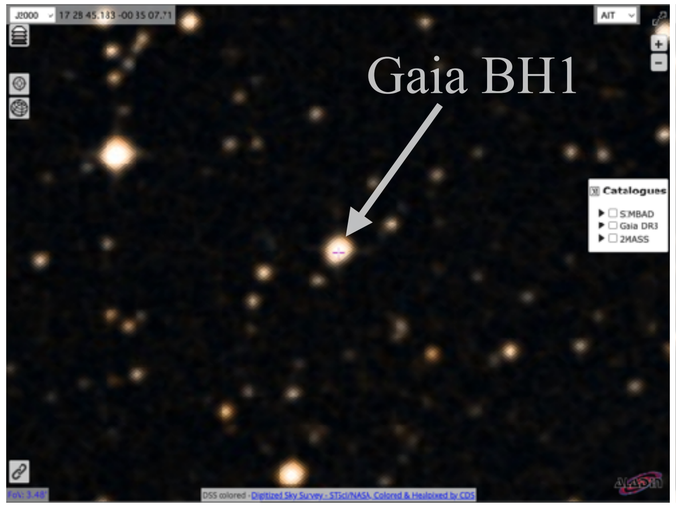


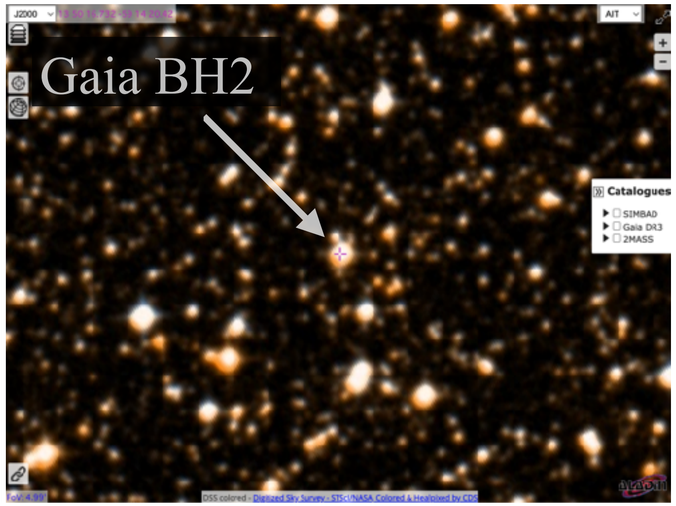
El-badry et al. (2024)

引き出せるBH/NSの情報



- 質量
- スピン
- 位置・速度（電磁波対応天体があれば）



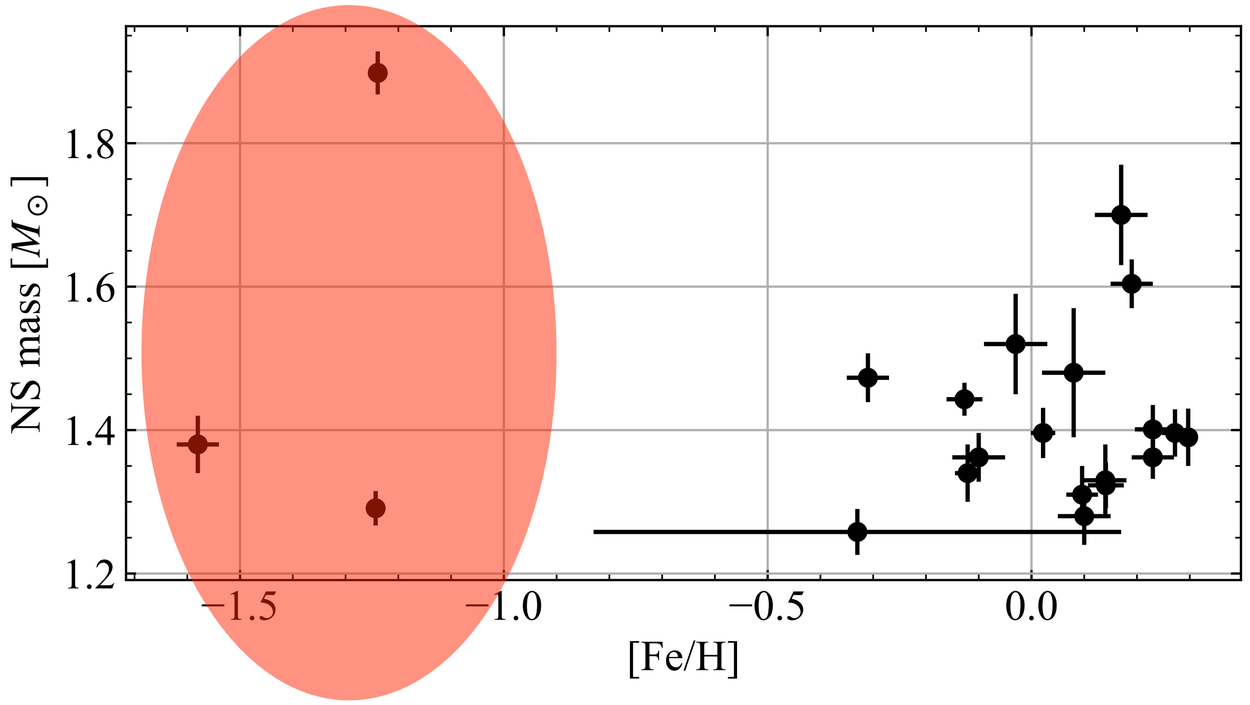


- 質量
- ６次元の位置・速度
  - 銀河ディスク、ハロー、バルジ
  - （近いから）X線連星より正確
- 親星の組成 ([Fe/H], [α/Fe], etc.)
  - X線連星より汚染されてない

古い超新星の記憶を残している

- パルサー・high-mass X-ray binary
  - 若い中性子星
- ミリ秒パルサー・low-mass X-ray binary
  - 古い中性子星かもしれないが、質量降着で超新星時の質量と変わっている
- Gaia NS
  - 低金属量（もある）$\Longrightarrow$ 古い
  - 長周期 $\Longrightarrow$ 質量降着を経験していない

Gaia NSの質量と金属量の関係



概要

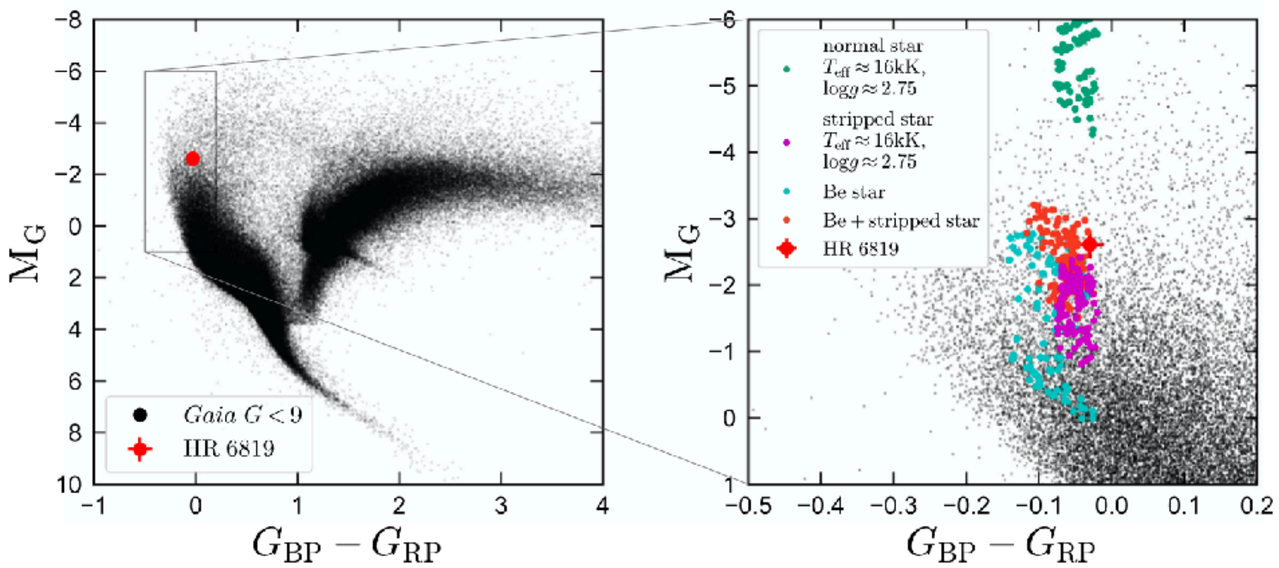
- GaiaによるBH/NS連星の探査の基本
- BH/NS探査のモチベーション
- 「不活性」BH/NS連星の発見史
- Gaia BH/NSの形成過程の問題

Gaia DR3以前のBH/NS連星 (1/3)

- 分光（視線速度）観測
- Liu et al. (2019); Thompson et al. (2019); Rivinius et al. (2020); Jayasinghe et al. (2021; 2022); Lennon et al. (2022); Saracino et al. (2022) $\Longrightarrow$ すべて強い反対意見

導出が単純でない

$$f_{\mathrm{m,spectro}} = \frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2}\sin^3 i = 1M_\odot \left(\frac{K_1}{30\mathrm{km/s}}\right)^3 \left(\frac{P}{\mathrm{yr}}\right)(1-e^2)^{3/2}$$



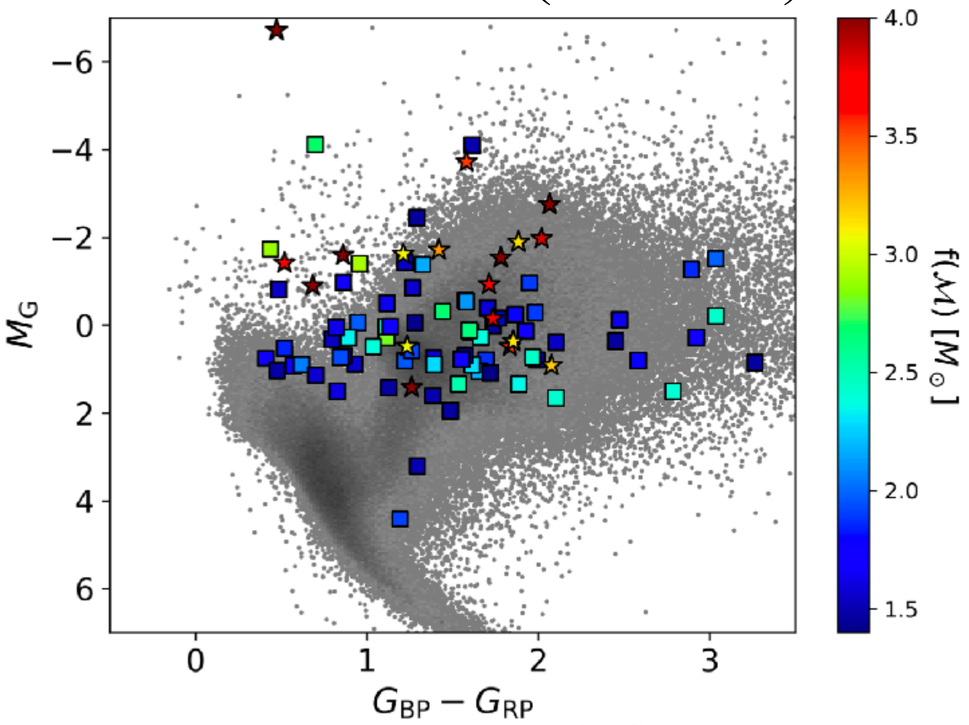
$f_{\mathrm{m,spectro}} = 1.5M_\odot$

- $10M_\odot$ MS $\Longrightarrow m_2 = 7.8M_\odot$ (BH?)
- $0.5M_\odot$ stripped star $\Longrightarrow m_2 = 2.2M_\odot$

(stripped starによってかき消されたMS、確率的にはこっちのほうが遥かに多い)

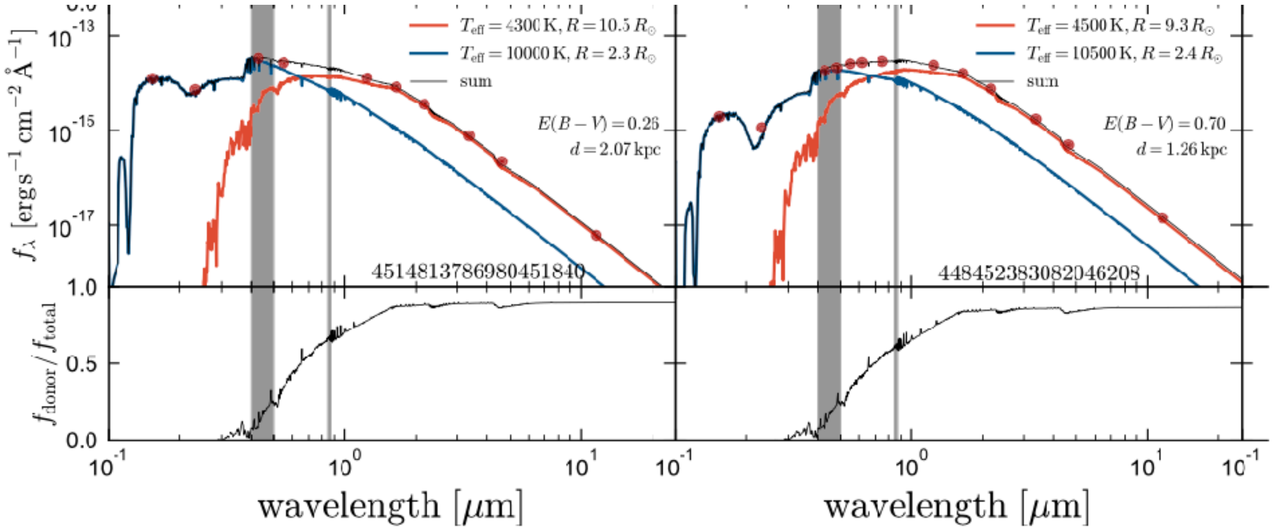
Gaia DR3以前のBH/NS連星 (1/3,続き)

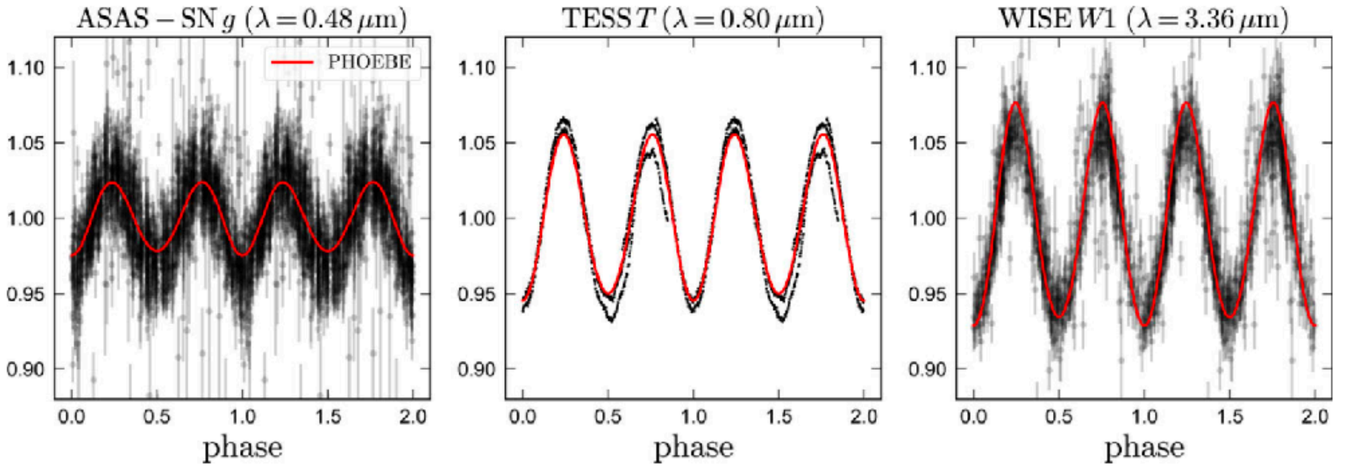
BH/NS候補 (Gaia+23)



~ $2M_\odot$Hot star

~ $0.2M_\odot$ RGB



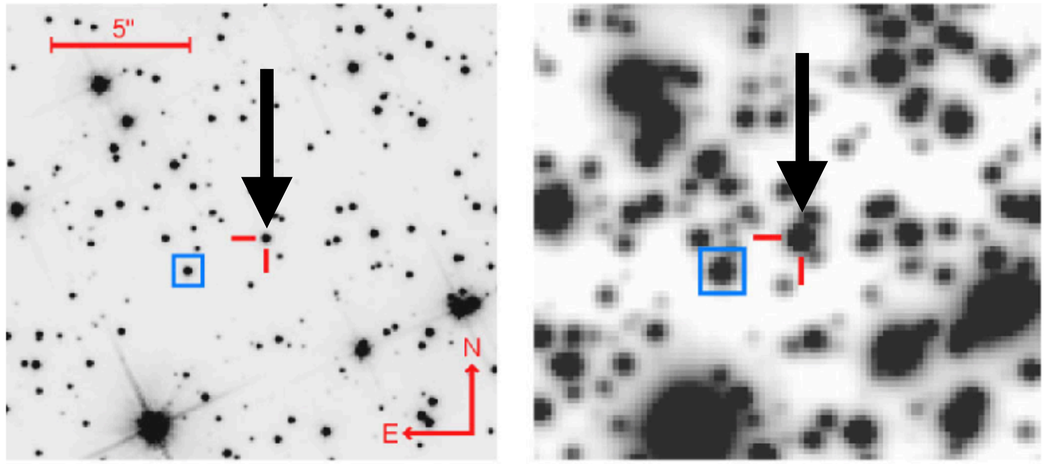


Gaia DR3 以前のBH/NS連星 (2/3)

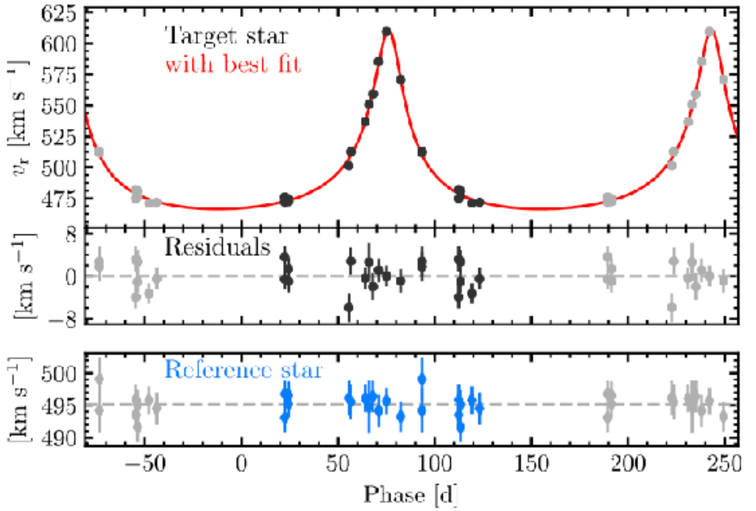
- Giesers et al. (2018; 2019): 3BHs in globular cluster NGC 3201
- MUSEによる視線速度観測
- $$\frac{m_2^3}{(m_1+m_2)^2}\sin^3 i \sim 3.0M_\odot \left(\frac{K_1}{69.4\mathrm{km/s}}\right)^3 \left(\frac{P}{166.88\mathrm{day}}\right)\left[1-\left(\frac{e}{0.595}\right)^2\right]^{3/2}$$

  - m_2の下限を与える($m_1 = 0$, $i = 90°$のときのm_2)
  - 主星は$m_1 \lesssim 0.8M_\odot$で暗く、伴星をかき消せない

  $\Longrightarrow$ BH/NS

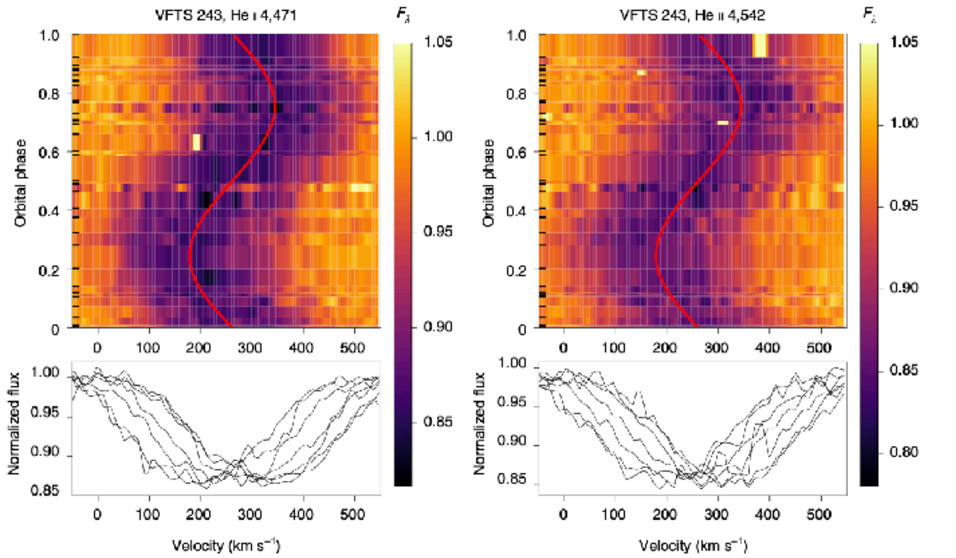


(a) HST (b) MUSE



Gaia DR3以前のBH/NS連星 (3/3)

- Shear et al. (2022): BH in LMC
- VLT FLAMES Tarantula Survey
- $25M_{\odot}$O型星 + $10M_{\odot}$ BH連星
  - 重力波源の親星？（ただ短周期すぎる？）
- O型星の質量推定
  - Spectral-type-mass calibration
  - Evolution model (L, $T_{\rm eff}$)
  - Evolution model ($\log g$, R_1)
- スペクトル解析で $\leq 8.7M_{\odot}$MS (later than and equal to B3V) を否定
  - O型星の質量推定が正しければ、BH確定



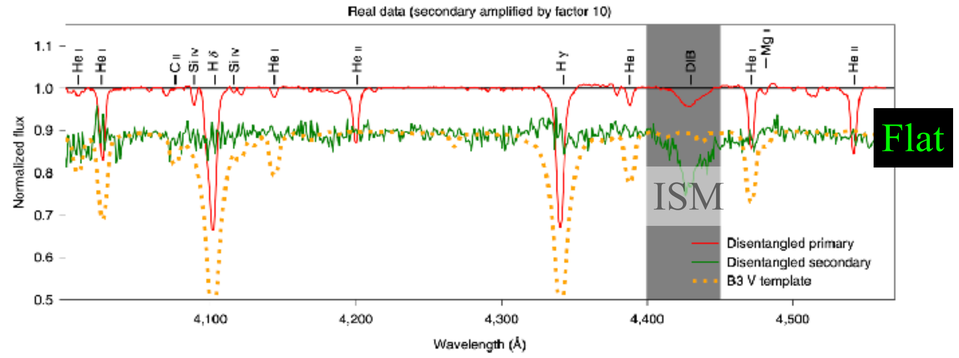
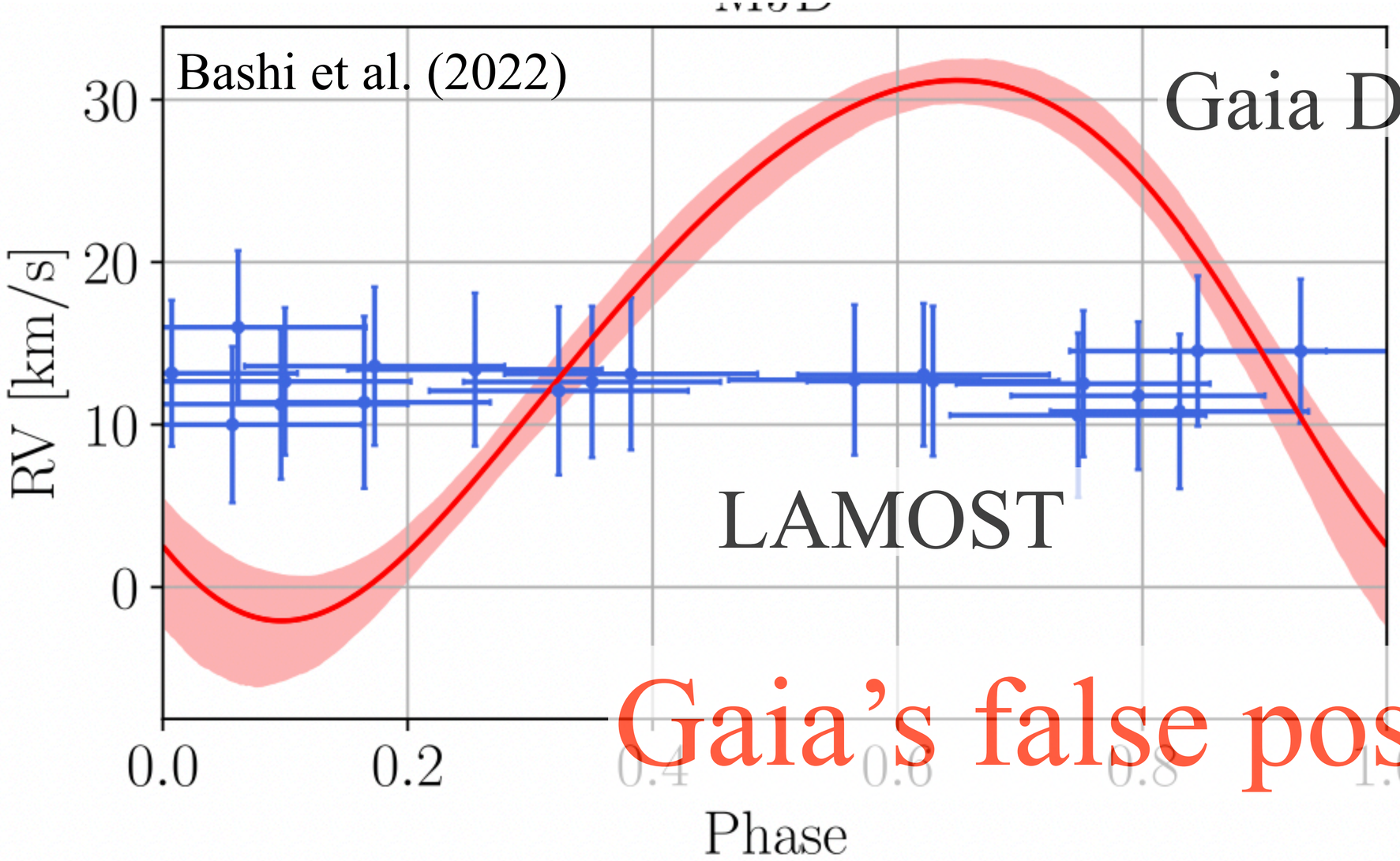


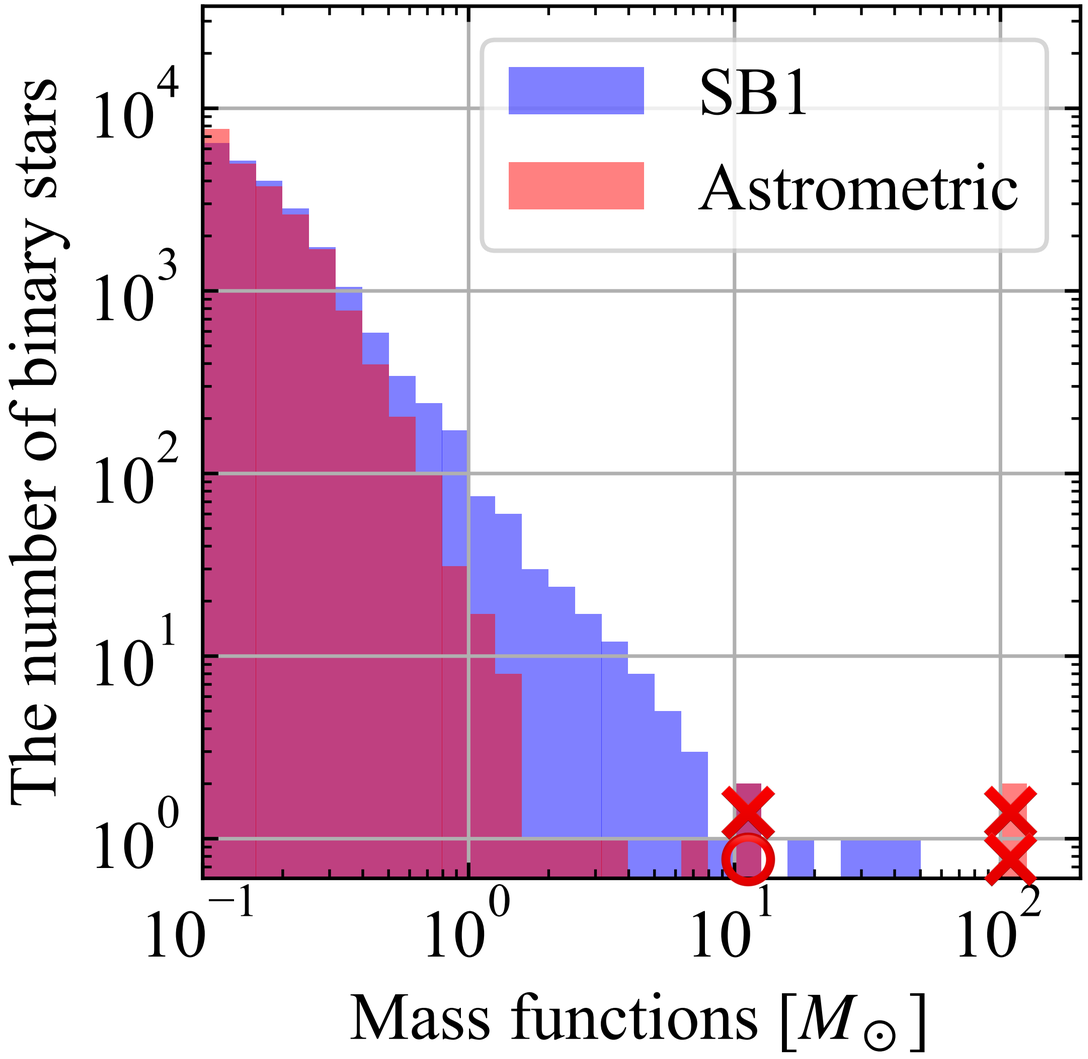
Table 1 | Derived parameters for VFTS 243	
P [d]	10.4031 ± 0.0004
T_0 [JD − 2,400,000]	$54{,}870.7 \pm 1.5$
e	0.017 ± 0.012
ω [°]	66 ± 53
K_1 [km s^{-1}]	81.4 ± 1.3
Γ [km s^{-1}]	260.2 ± 0.9
$f[M_{\odot}]$	0.581 ± 0.028
$T_{\rm eff,1}$ [kK]	36 ± 1
$\log g_1$ [cgs]	3.7 ± 0.1
E_{B-V} [mag]	0.45 ± 0.02
A_V [mag]	1.76 ± 0.08
$\log \dot{M}\sqrt{D}$ [$M_{\odot}$ yr^{-1}]	-6.3 ± 0.3
v_{∞} [km s^{-1}] (adopted)	2,100
$X_{\rm N}$ [%]	0.11 ± 0.05
$X_{\rm N}/X_{\rm N,LMC}$	16 ± 7
A_V [mag]	1.70 ± 0.03
$\log L_1 [L_{\odot}]$	5.20 ± 0.04
$R_1 [R_{\odot}]$	10.3 ± 0.8
$R_1/R_{\rm Roche\,lobe}$	0.33 ± 0.03
$v \sin i_1$ [km s^{-1}]	181 ± 16
$M_{\rm SpT,1} [M_{\odot}]$	25.9 ± 3.1
$M_{\rm ev,1} [M_{\odot}]$	26.2 ± 2.1
$M_{\rm spec,1} [M_{\odot}]$	19.3 ± 5.2
$M_1 [M_{\odot}]$	25.0 ± 2.3
$M_{\rm min,2} [M_{\odot}]$	8.7 ± 0.5
$M_2 [M_{\odot}]$	10.1 ± 2.0
$M_{\rm tot} [M_{\odot}]$	$36.3^{+3.8}_{-5.5}$
i [°]	$\gtrsim 40$
Age [Myr]	7.4

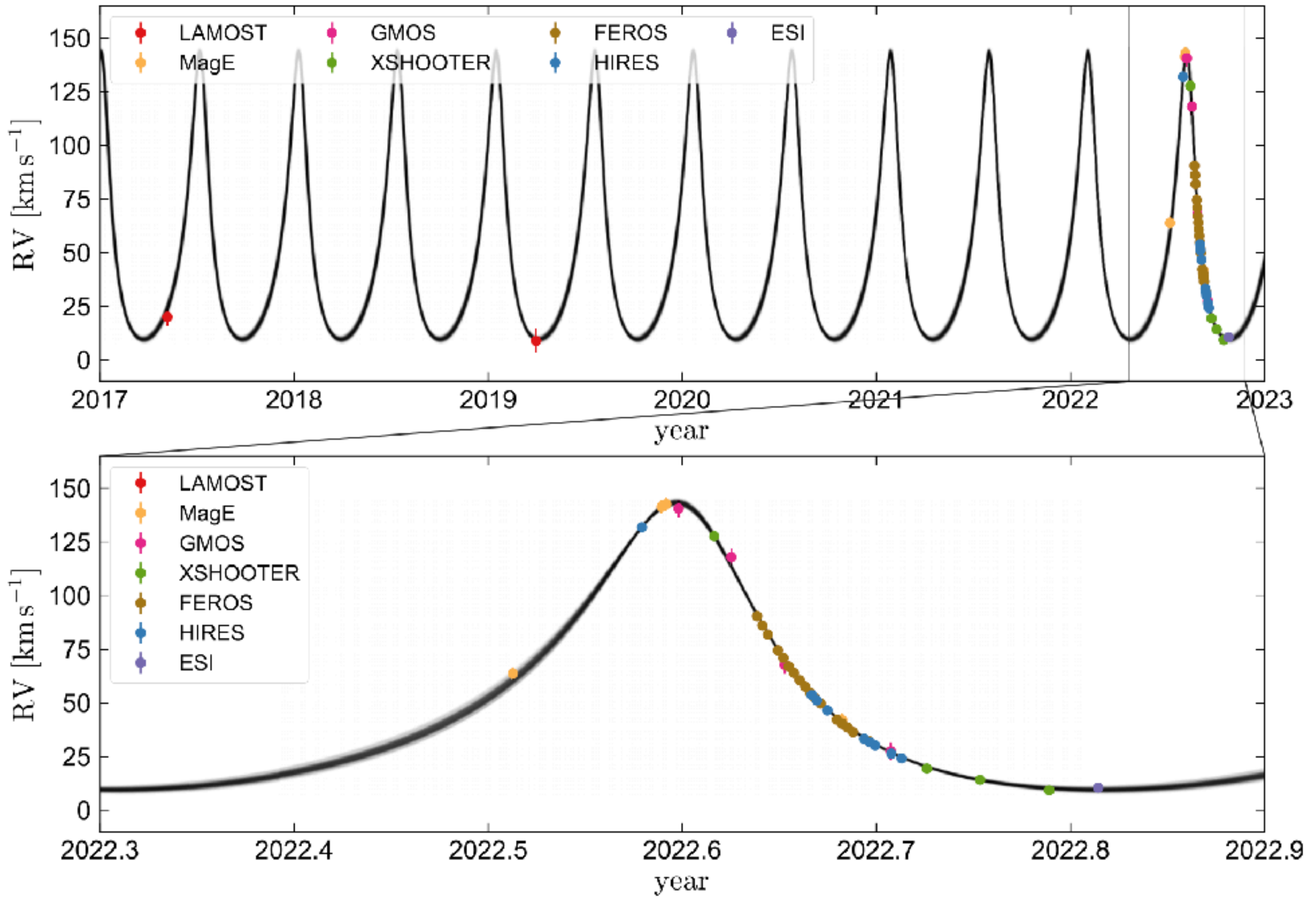
Gaia DR3以後



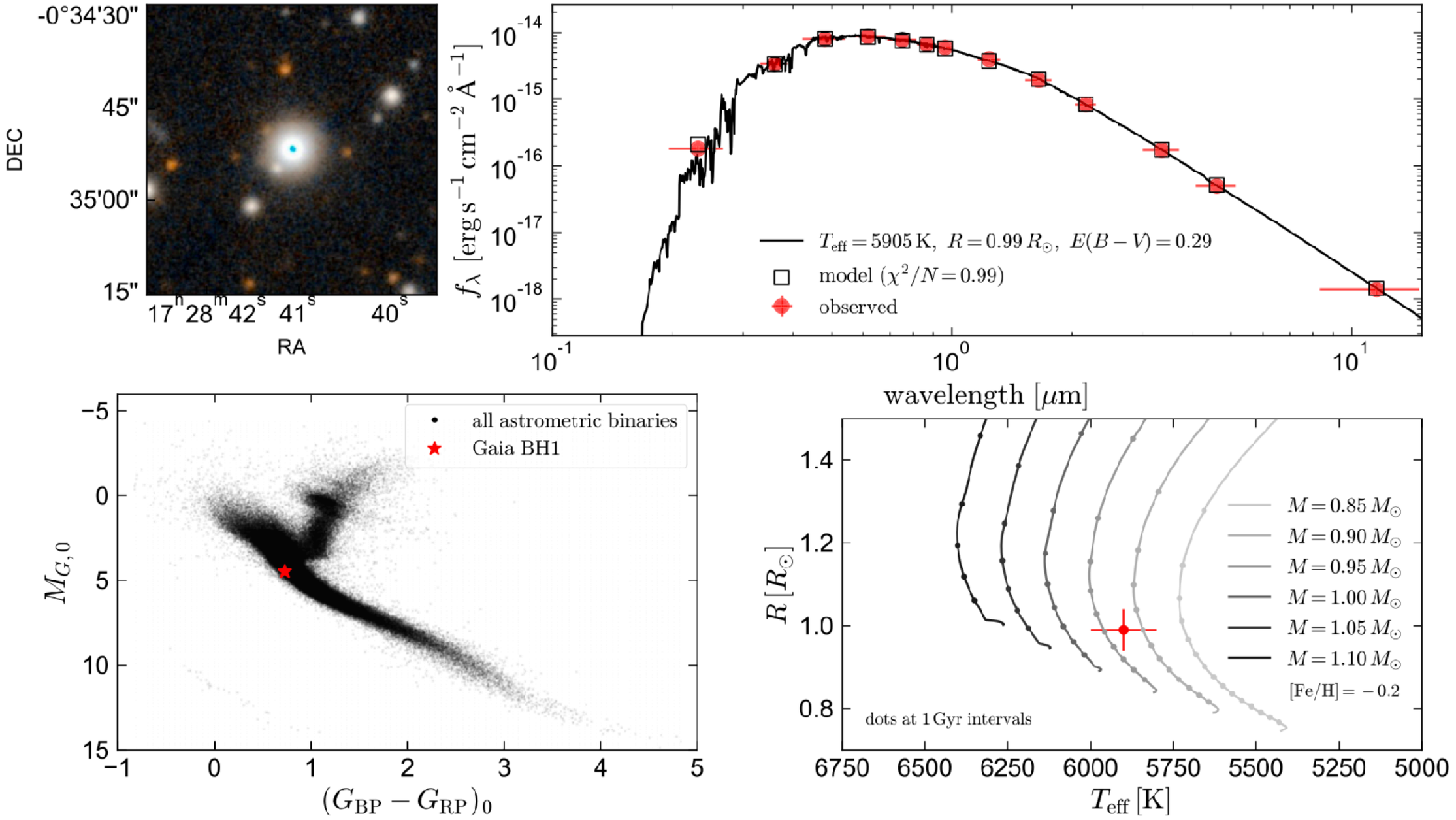
Gaia's false positive

Gaia BH1

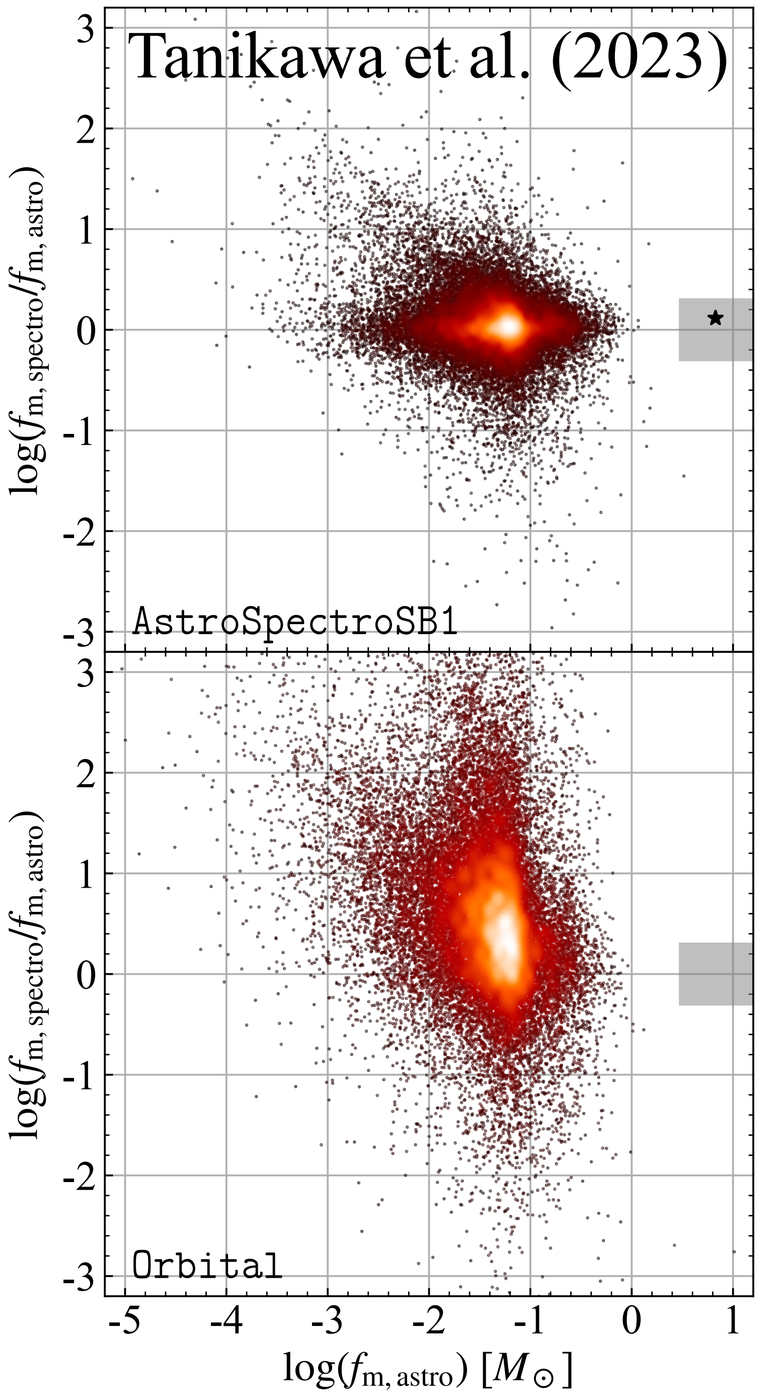




El-Badry et al. (2024)



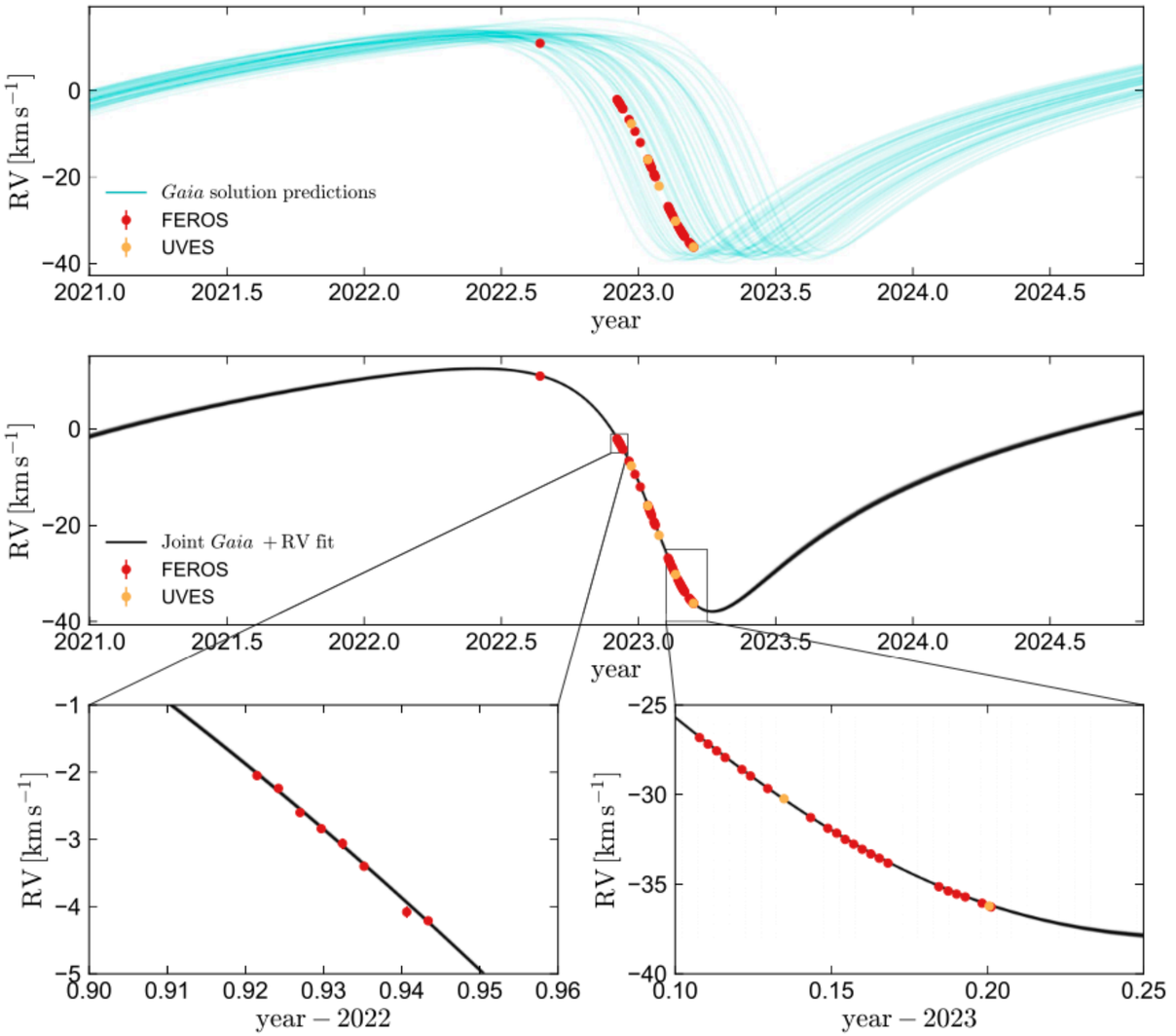
El-Badry et al. (2024)



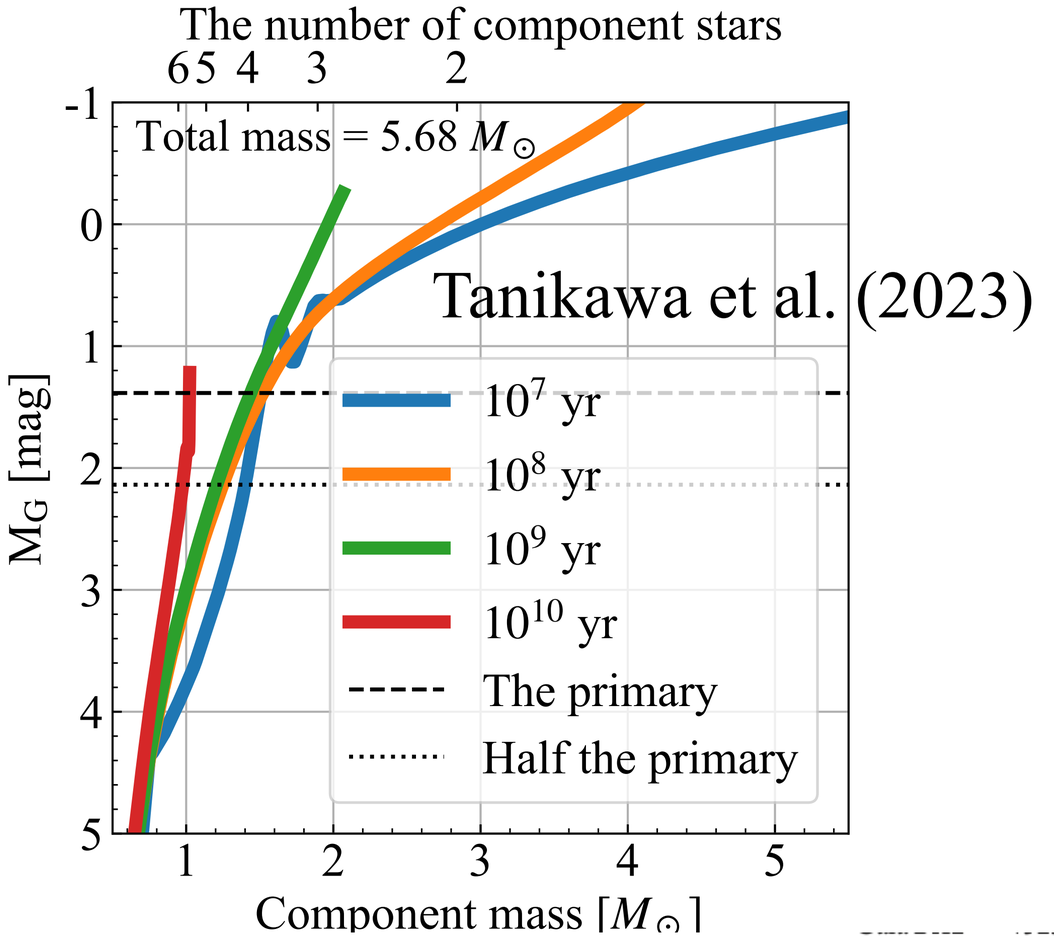
$$f_{\mathrm{m,astro}} \sim f_{\mathrm{m,spectro}}/\sin^3 i$$

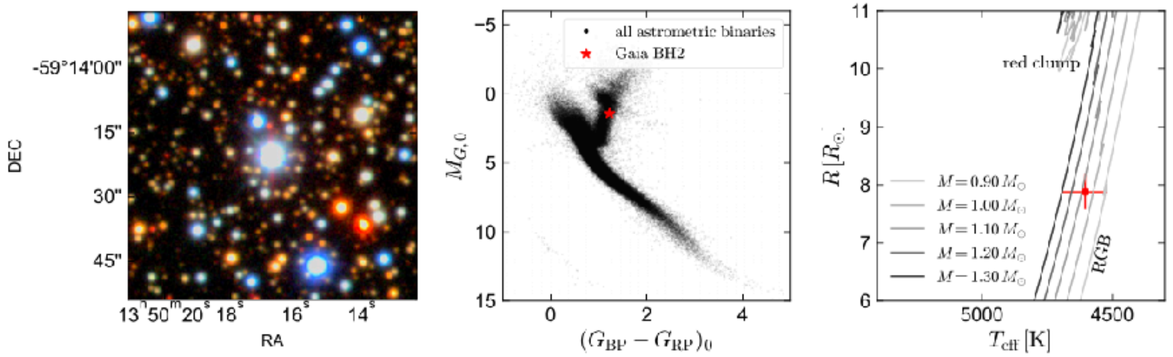
$$f_{\mathrm{m,astro}} \gtrsim 3M_\odot$$

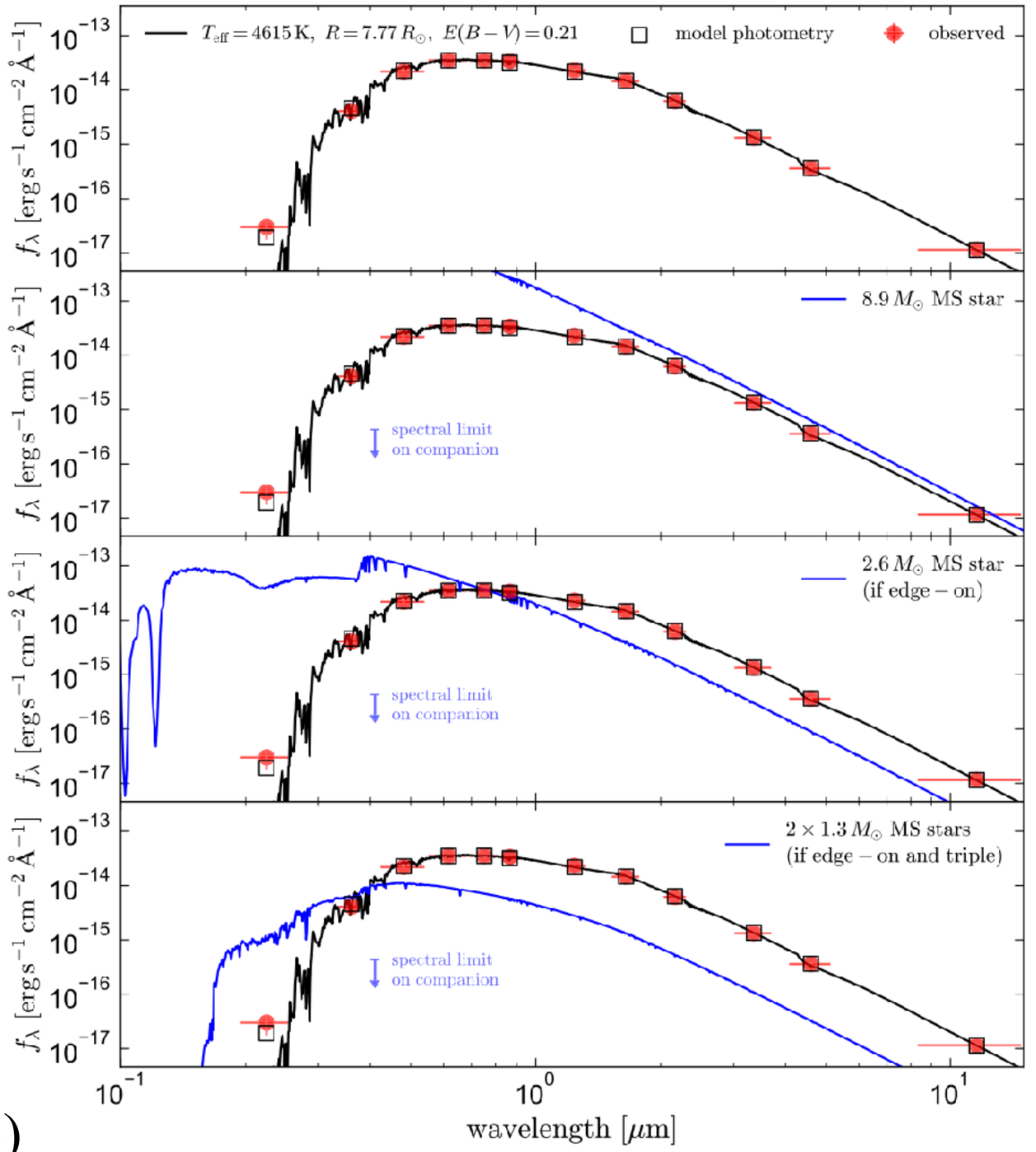
Gaia BH2



El-Badry et al. (2023)

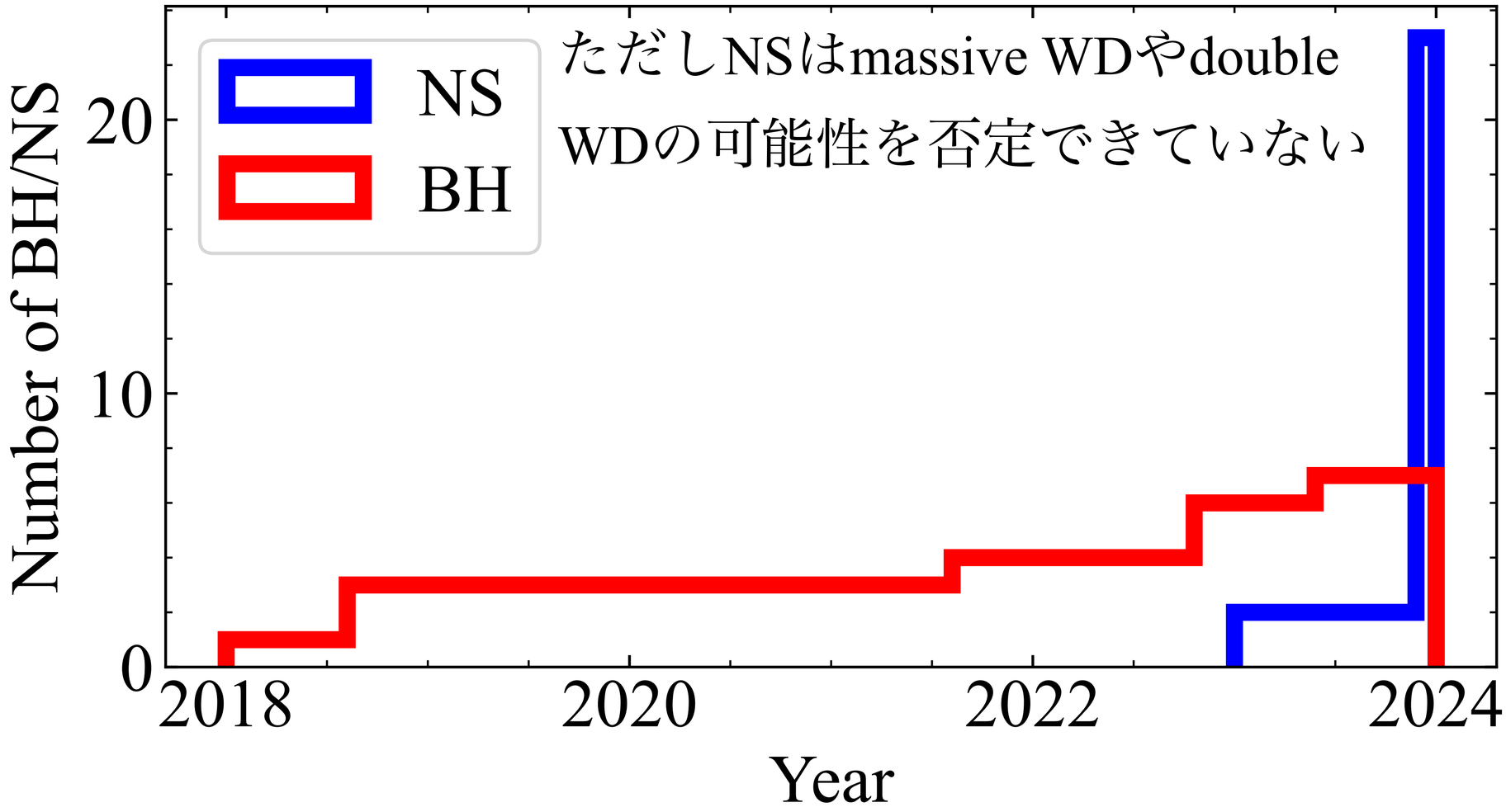






El-Badry et al. (2023)

Gaia DR3以後のBH/NS連星



Gaia DR3が強力な理由 (1/2)

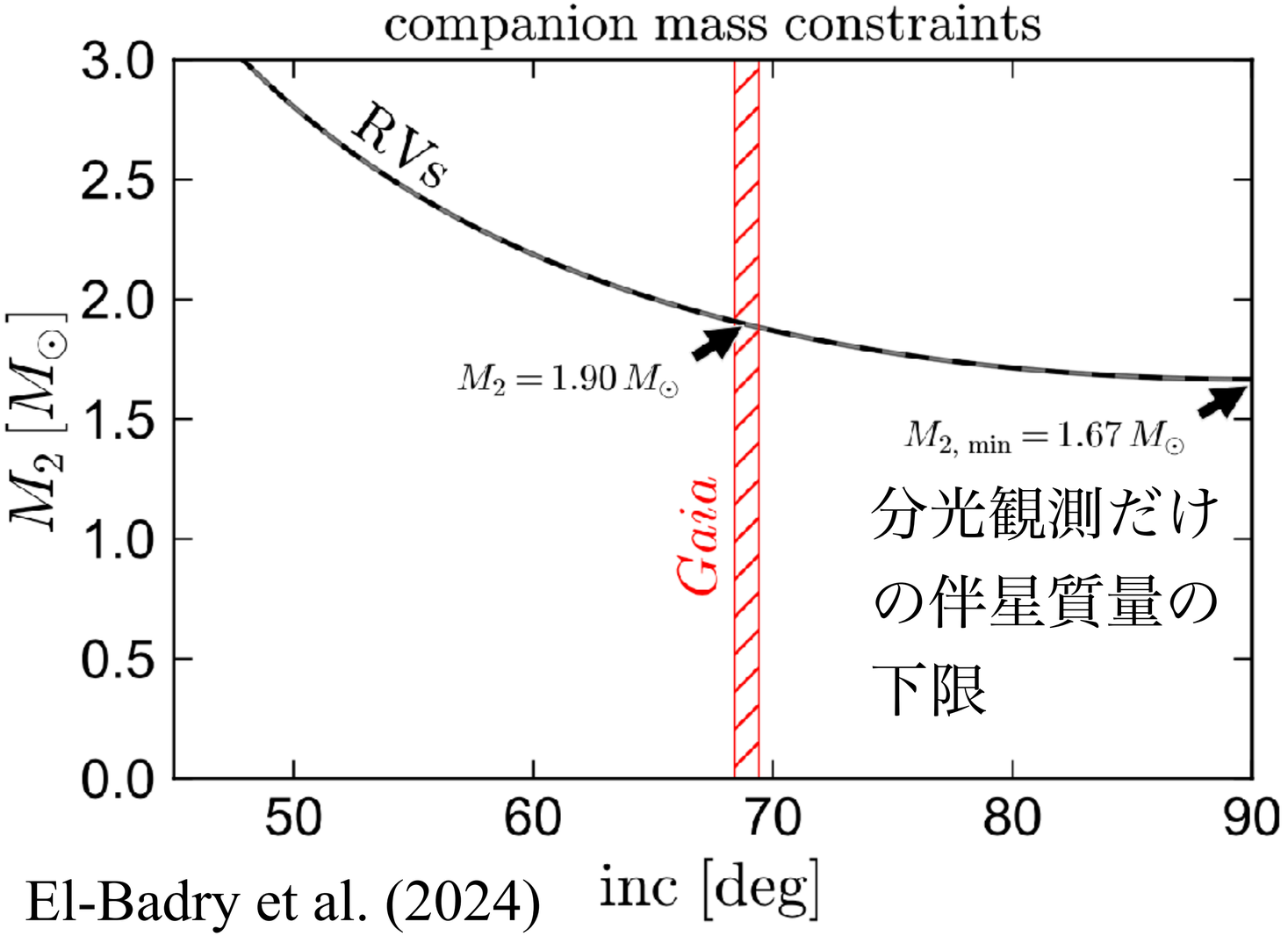
Gaia collaboration (2023)

Table	nss_solution_type	Solutions	Description
nss_acceleration_astro	Acceleration7	246 947	Second derivatives of position (acceleration)
	Acceleration9	91 268	Third derivatives of position (jerk)
nss_two_body_orbit	Orbital	134 598	Orbital astrometric solutions
	OrbitalAlternative*	629	Orbital astrometric, alternative solutions
	OrbitalTargetedSearch*	533	Orbital astrometric, supplementary external input list
	AstroSpectroSB1	33 467	Combined orbital astrometric + spectroscopic solutions
	SB1 or SB2	186 905	Orbital spectroscopic solutions
	EclipsingSpectro	155	Combined orbital spectroscopic + eclipsing solutions
	EclipsingBinary	86 918	Orbits of eclipsing binaries
nss_non_linearspectro	FirstDegreeTrendSB1	24 083	First order derivatives of the radial velocity
	SecondDegreeTrendSB1	32 725	Second order derivatives of the radial velocity
nss_vim_fl	VIMF	870	Variable-induced movers fixed

～ 170,000の
位置天文連星

大量のデータサンプル ⟸ BH/NS連星はレア

Gaia DR3が強力な理由 (2/2)



El-Badry et al. (2024)

軌道傾斜角の縮退がない

↓

伴星質量の下限を厳しく制限できる（BH/NSを取り逃しにくくする）

概要

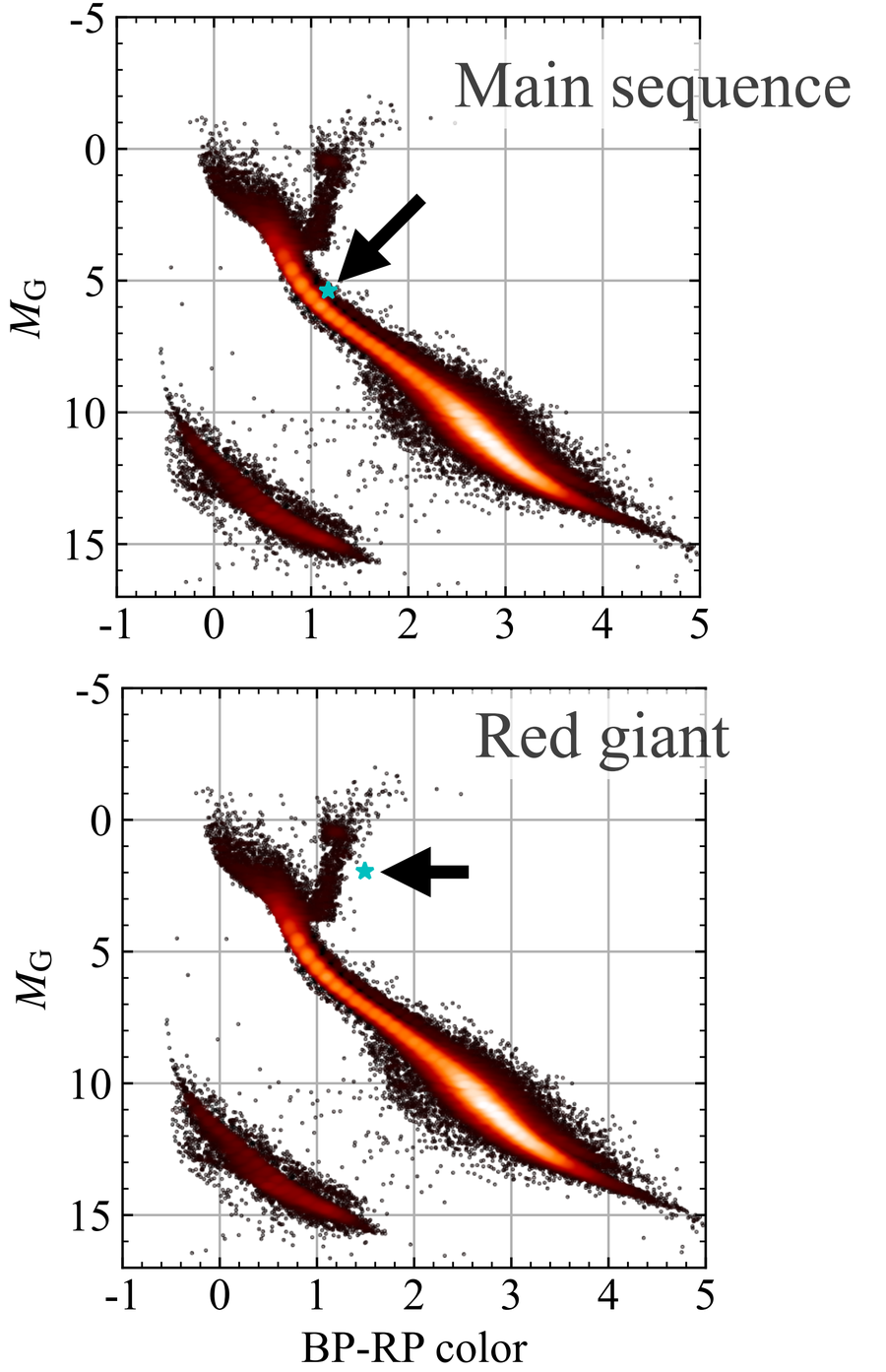
- GaiaによるBH/NS連星の探査の基本
- BH/NS探査のモチベーション
- 「不活性」BH/NS連星の発見史
- Gaia BH/NSの形成過程の問題

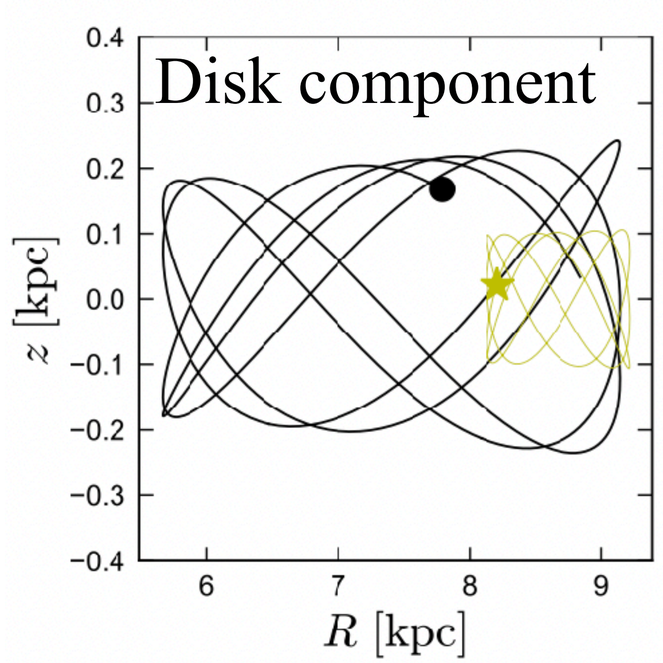
Gaia BH1

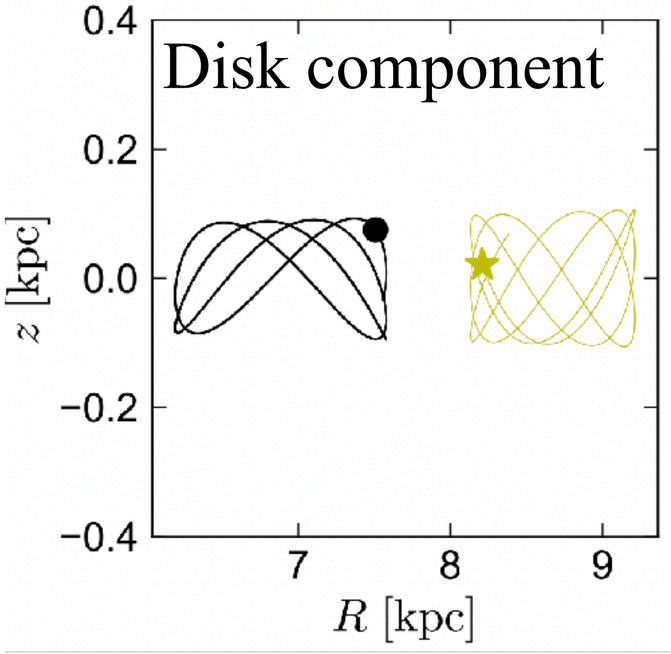
- $M_{\rm BH} = 9.62 M_\odot$
- $M_{\rm comp} = 0.93 M_\odot$
- $P = 185.59$ d
- $a = 1.40$ au
- $e = 0.451$
- [Fe/H] $= -0.2$

Gaia BH2

- $M_{\rm BH} = 8.94 M_\odot$
- $M_{\rm comp} = 1.07 M_\odot$
- $P = 1276.7$ d
- $a = 4.96$ au
- $e = 0.5176$
- [Fe/H] $= -0.22$

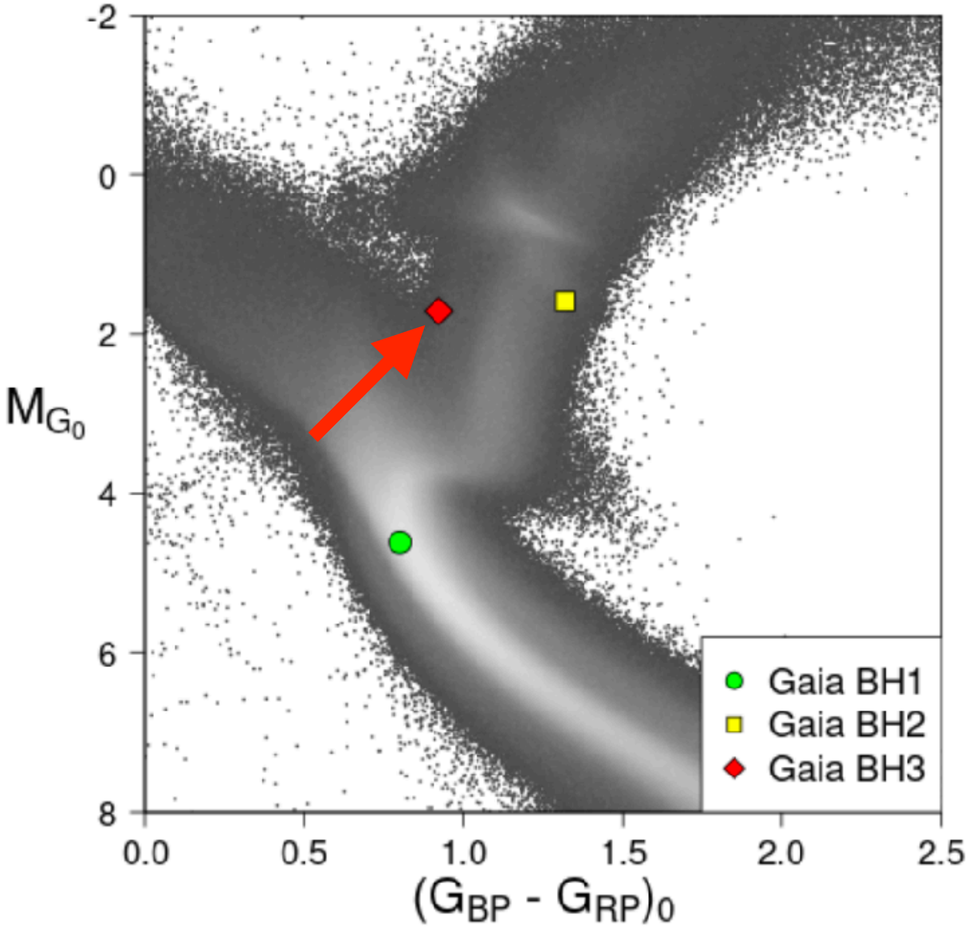




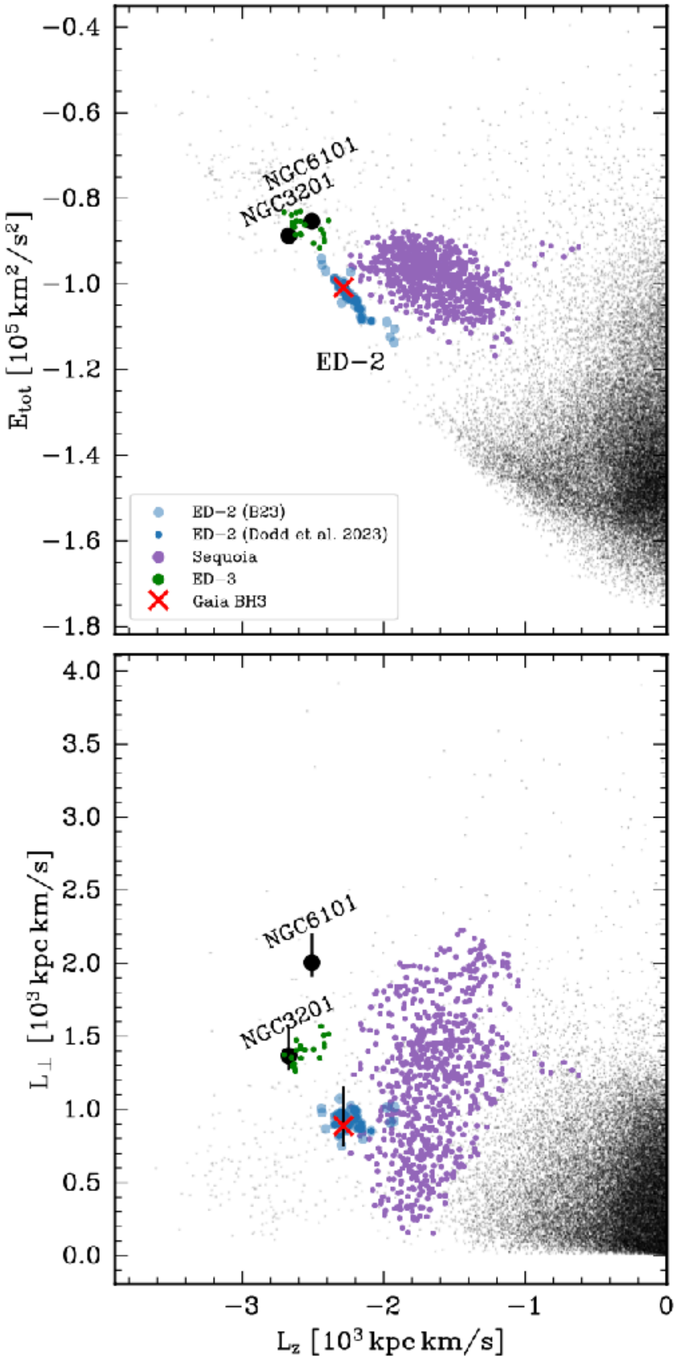


Gaia BH3

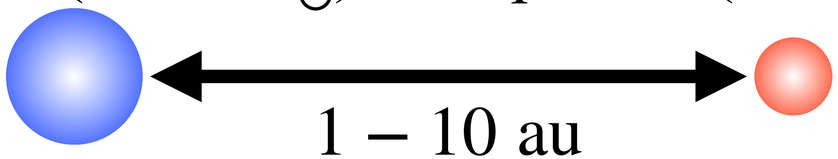
- $M_{\rm BH} = 32.7 M_\odot$
- $M_{\rm comp} = 0.76 M_\odot$
- $P = 4194.7$ d
- $a = 16.4$ au
- $e = 0.7262$
- [Fe/H] $= -2.56$



小質量星団の残骸とされる
ED-2 streamの中にある

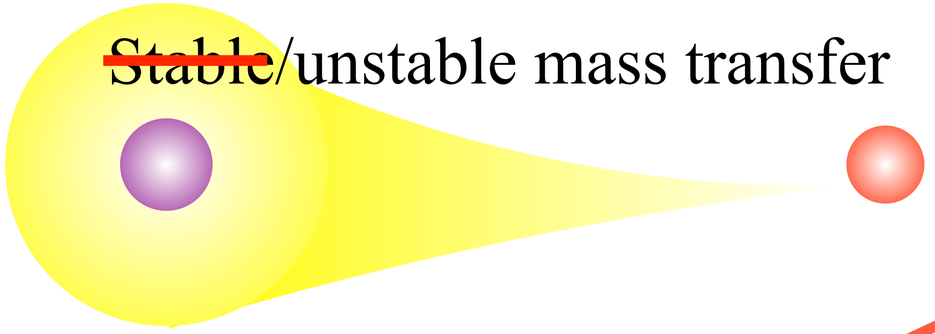


BH progenitor ($\sim 30M_\odot$) Companion ($\sim 1M_\odot$)



1 – 10 au

~~Stable~~/unstable mass transfer

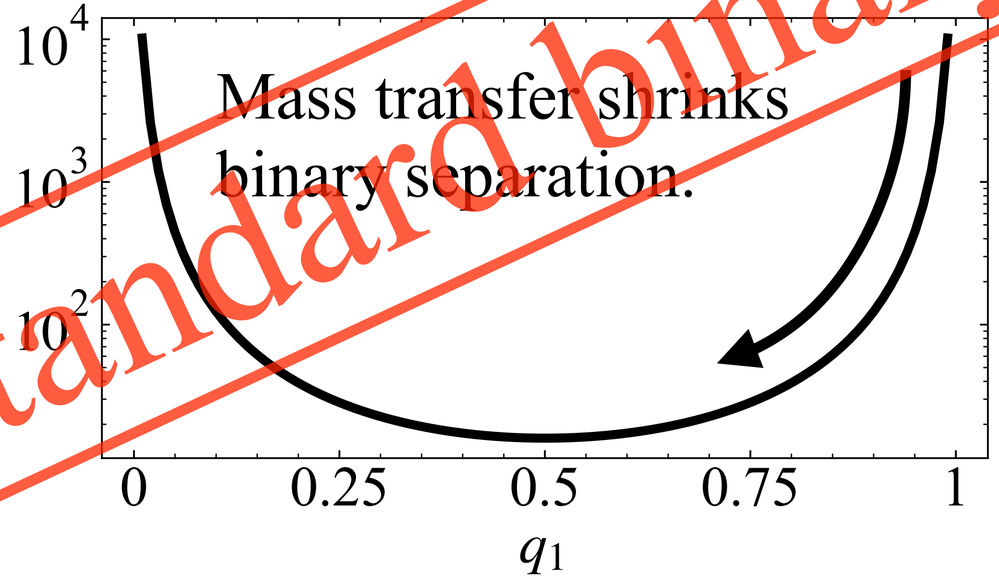


Common envelope

0.01 – 0.1 au

BH ($\sim 10M_\odot$)

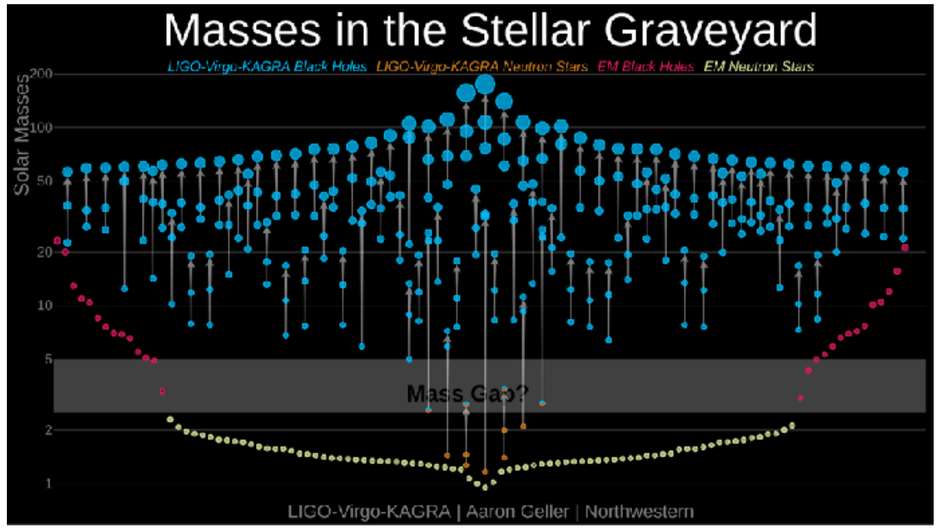
$$a = \frac{J^2 M}{G M_1^2 M_2^2} = \frac{J^2}{G M^3 q_1^2 (1-q_1)^2} \quad (q_1 = M_1/M)$$

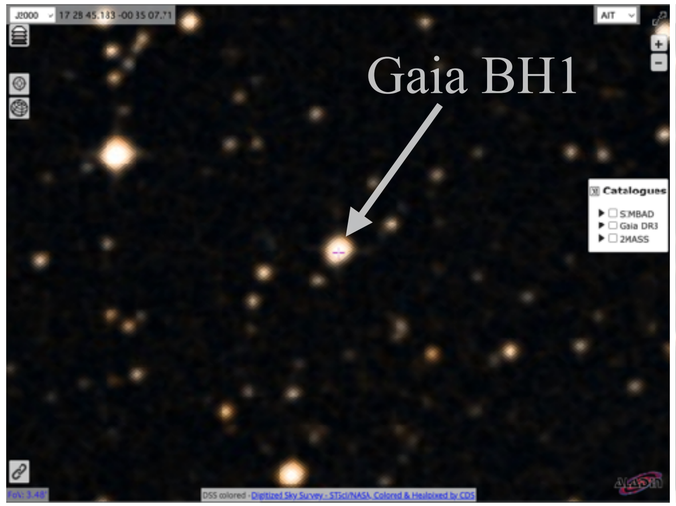


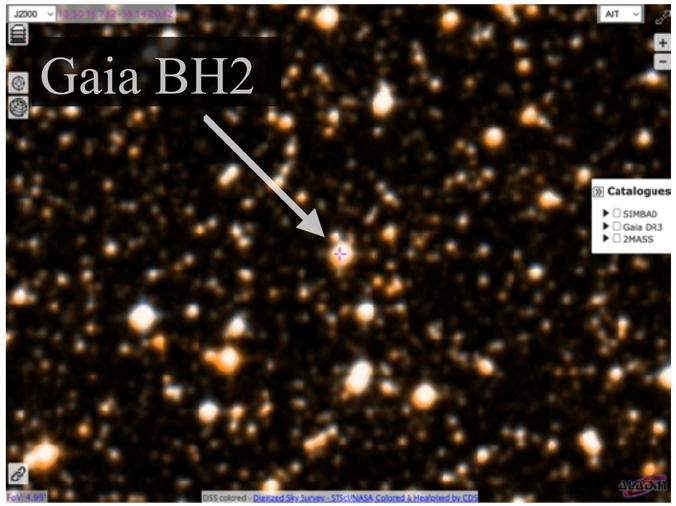
- $E_{\rm env} = \alpha_{\rm CE}\left(E_{\rm orbit,fin} - E_{\rm orbit,init}\right) \sim \alpha_{\rm CE} E_{\rm orbit,fin}$
- $E_{\rm env} = \dfrac{G M_{\rm core} M_{\rm env}}{\lambda_{\rm CE} R_{\rm env}}, E_{\rm orbit} = \dfrac{G M_{\rm core} M_{\rm comp}}{2 a_{\rm orbit}}$
- $a_{\rm orbit,fin} \sim 0.025\ {\rm au} \left(\dfrac{\alpha_{\rm CE}}{1.0}\right)\left(\dfrac{\lambda_{\rm CE}}{0.1}\right)\left(\dfrac{M_{\rm comp}}{1M_\odot}\right)\left(\dfrac{M_{\rm core}}{10M_\odot}\right)^{-1}$
- $\Longrightarrow a_{\rm orbit,fin} \ll a_{\rm GaiaBH} \sim 1$ au
- $\Longrightarrow \alpha_{\rm CE} > 10$ is required, but it is difficult for this pair (private communication with Ryosuke Hirai)

Standard binary model in crisis

The origin of Gaia BHs





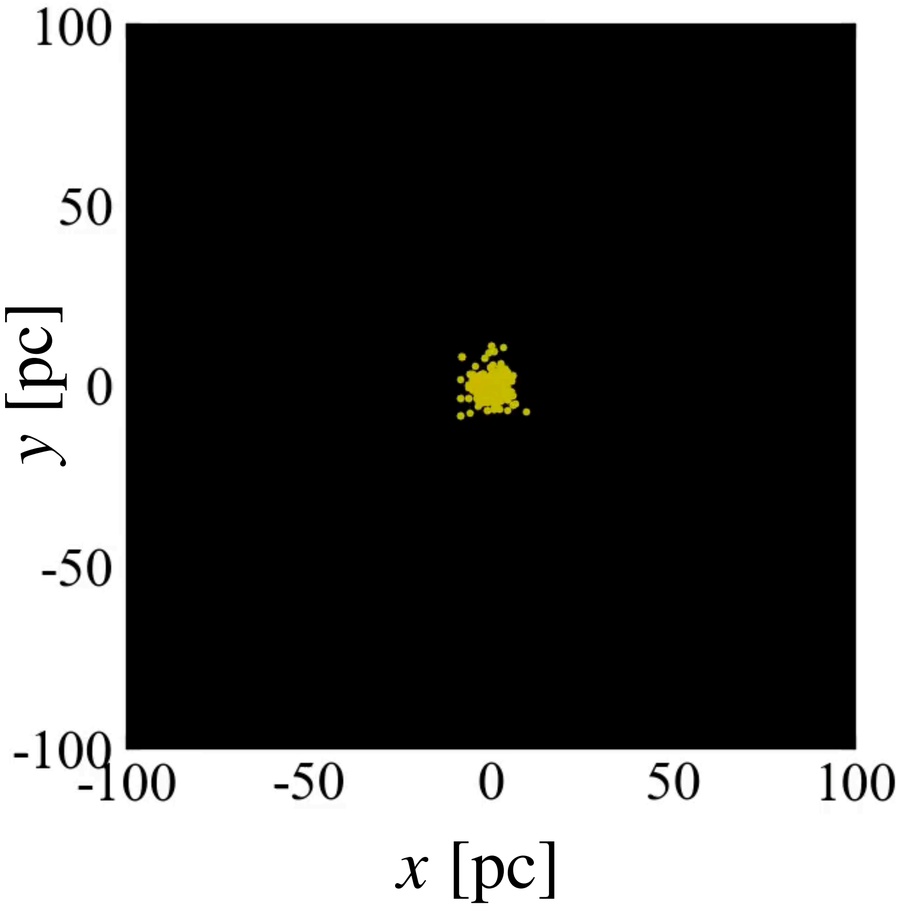


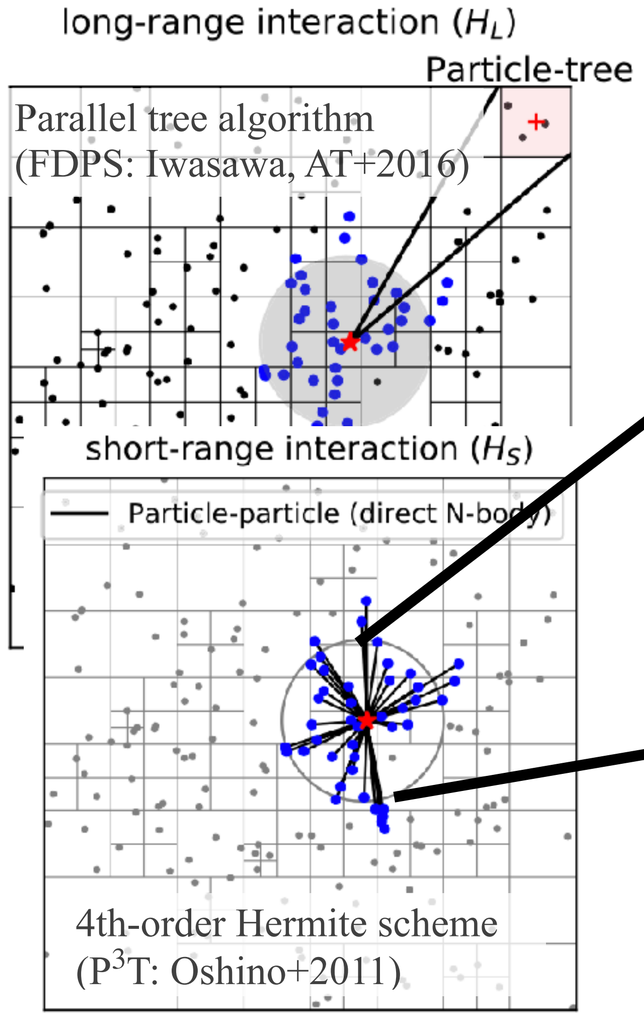
- Binary (Pop I/II, Pop III)
- Triple/Quadruple (Pop I/II, Pop III)
- Open cluster
- Globular cluster
- Galactic center/AGN disk
- Primordial BH

∵ Previous slide ∵ Companion's metallicity

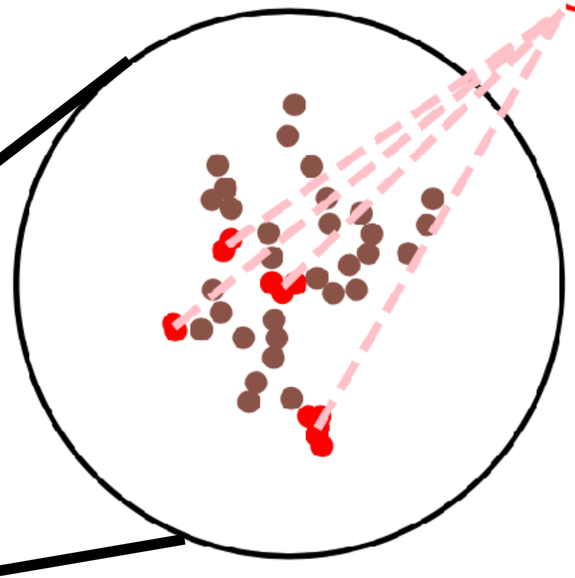
- ~~Binary (Pop I/II, Pop III)~~
- Triple/Quadruple (Pop I/II, ~~Pop III~~)
- Open cluster
- ~~Globular cluster~~ ∵ Disk components
- ~~Galactic center/AGN disk~~
- ~~Primordial BH~~ ∵ Small capture rate

N-body simulation for open clusters
PeTar (Wang et al. 2020)





Binary and close encounter



SDAR: Slow-Down Algorithmic Regularization (Wang+2020)

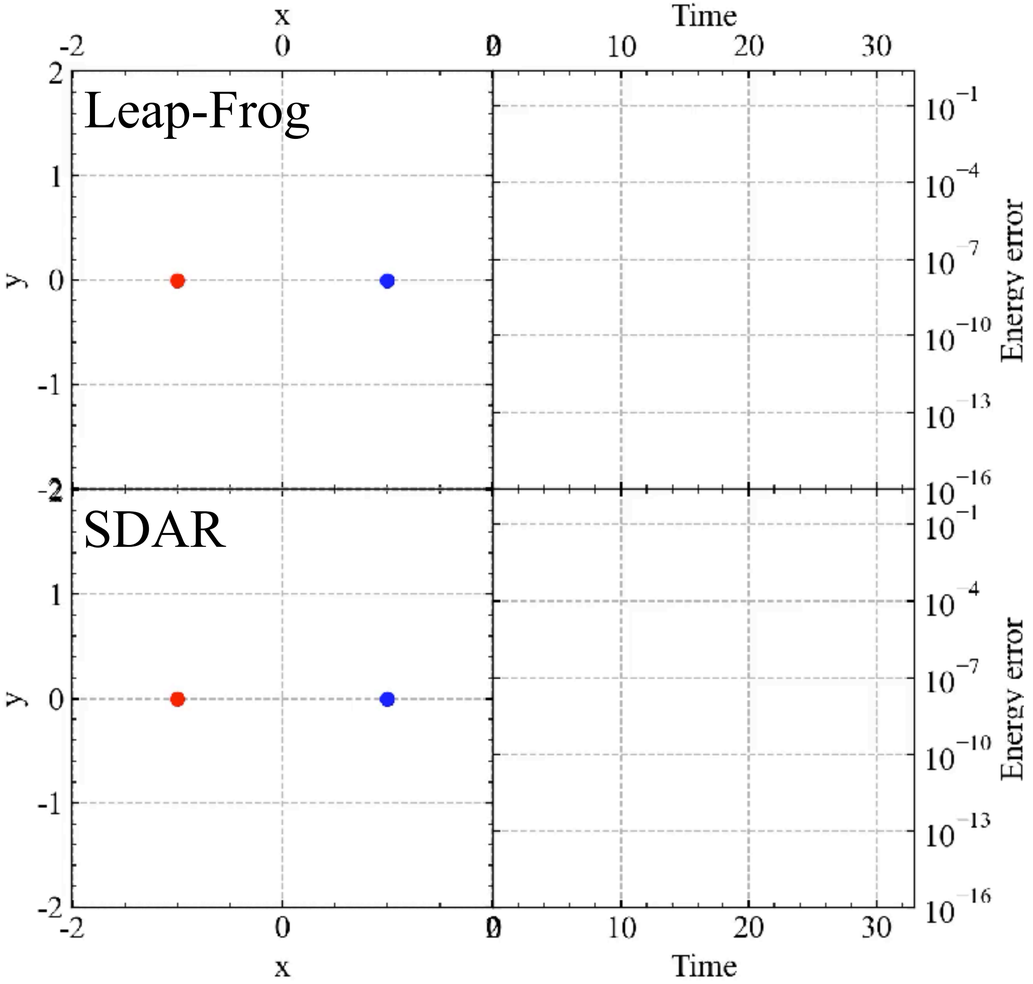
Slow-Down Algorithmic Regularization: SDAR (Wang+2020)

$$F_{j\to i} = \frac{Gm_i m_j(\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{[(\vec{r}_j - \vec{r}_i)^2 + \varepsilon^2]^{3/2}}$$

Singularity at zero distance

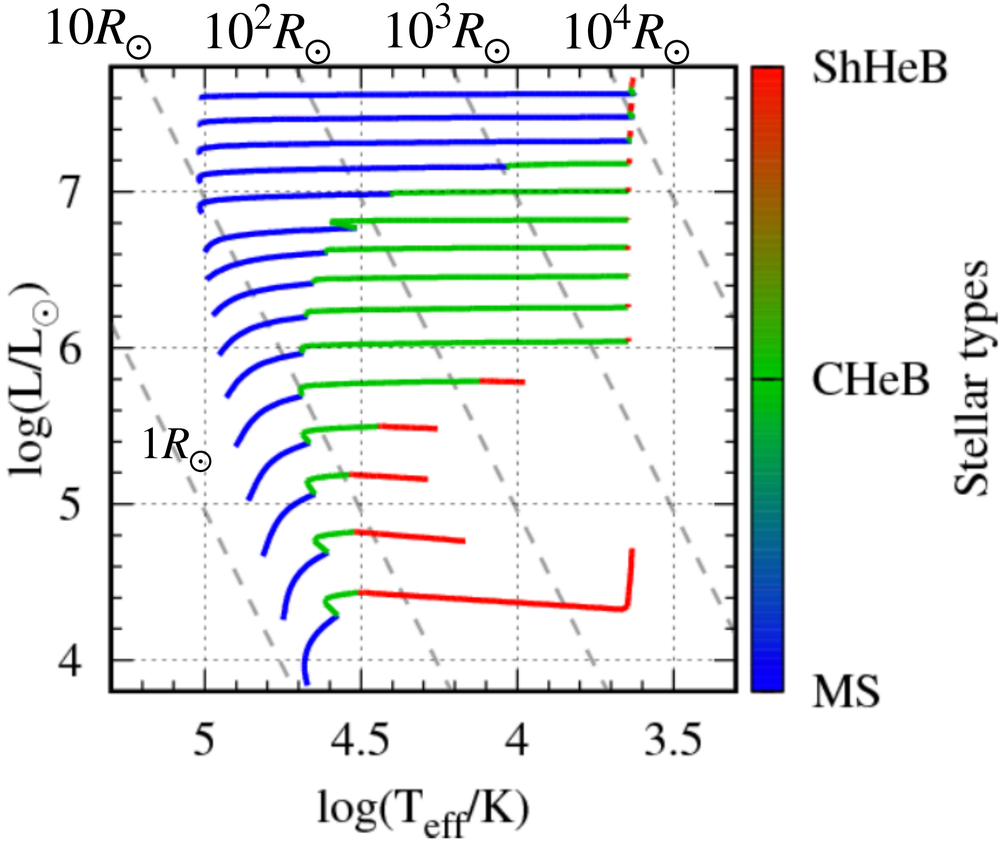
Regularization

- KS regularization (Kustaanheimo-Stiefel 1965)
- Algorithmic regularization (Mikkola, Tanikawa 1999)

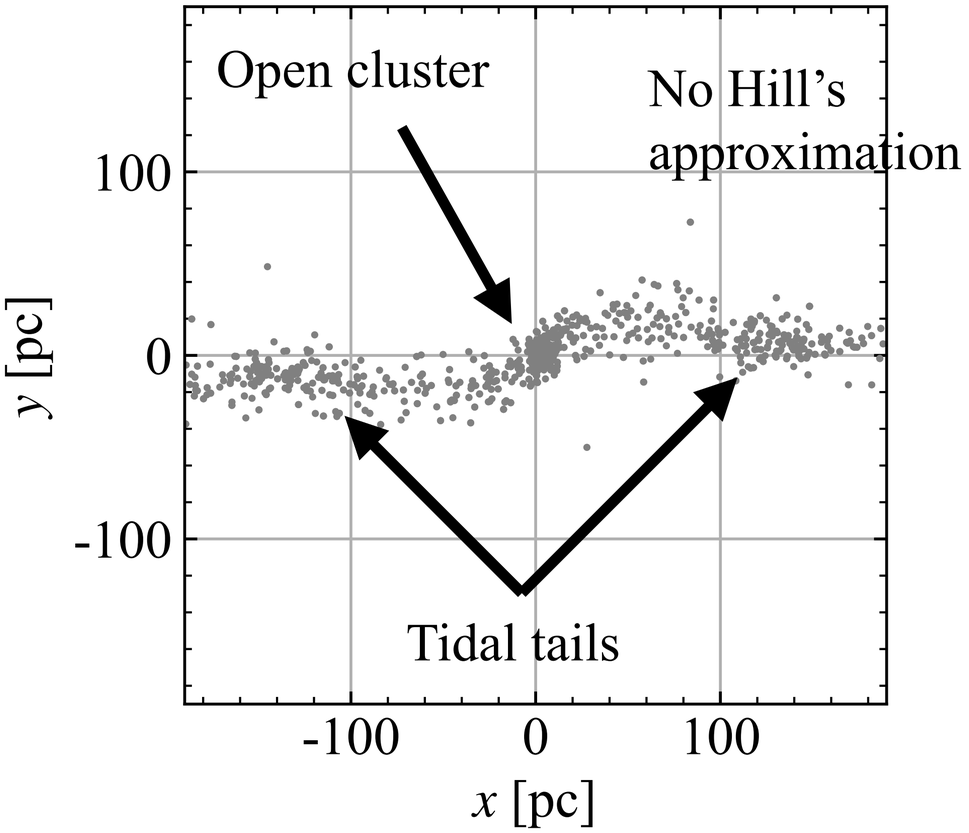


Physical effects

Single/Binary star evolution
(BSEEMP: AT+20)



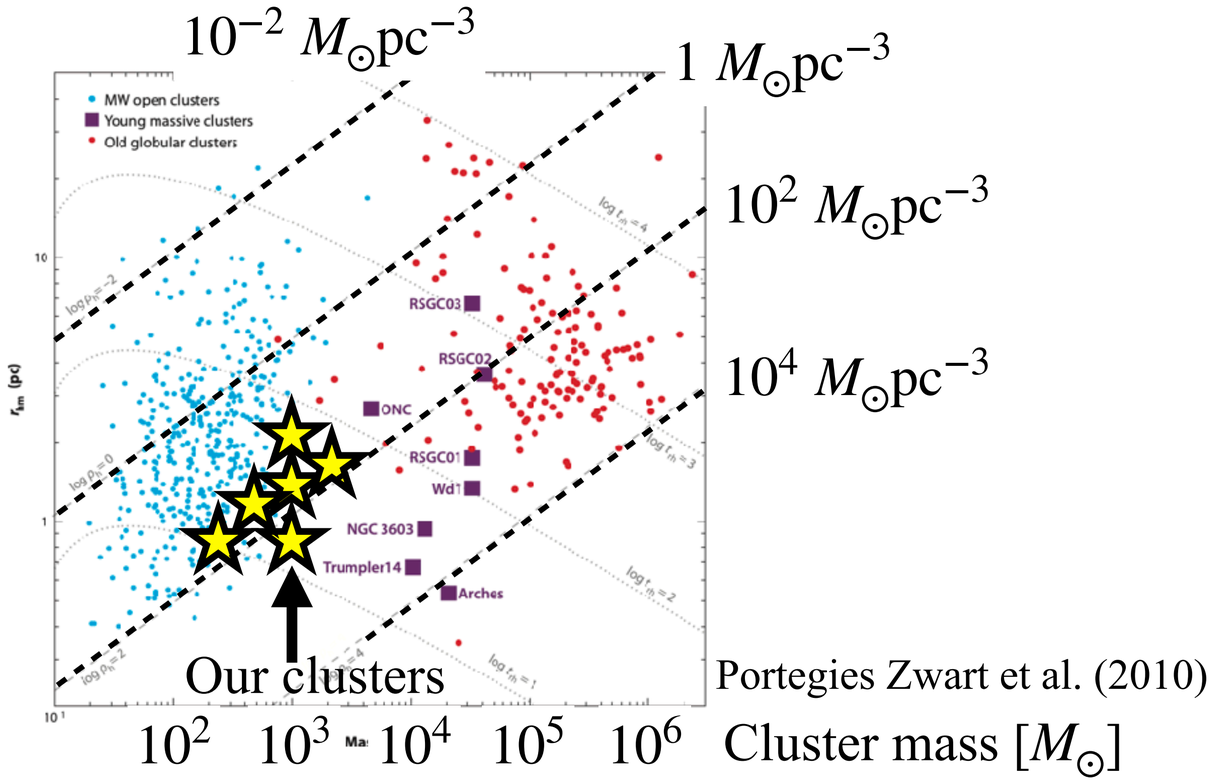
Galactic potential
(GALPY: Bovy12)



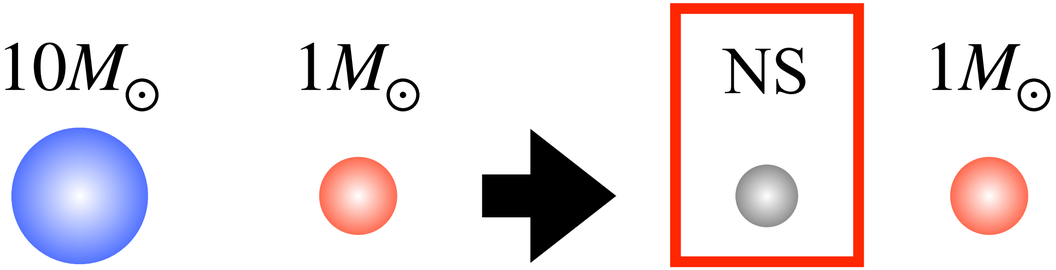
Initial conditions of open clusters

- Cluster mass: $200 - 2000 M_\odot$
- Z=0.0002-0.02
- Global density: $2 - 200\ M_\odot\ \mathrm{pc}^{-3}$
- Binary fraction: 0, 20, 50%
- No CCSN kick
- Initial binary stars
  - Primary star: Kroupa's IMF
  - $f(m_2/m_1) \propto (m_2/m_1)^{-0.1}$ $(0.1 \leq m_2/m_1 \leq 1)$

$10^7 M_\odot$ in total for each set



Gaia BHs could not be formed without dynamical interactions.



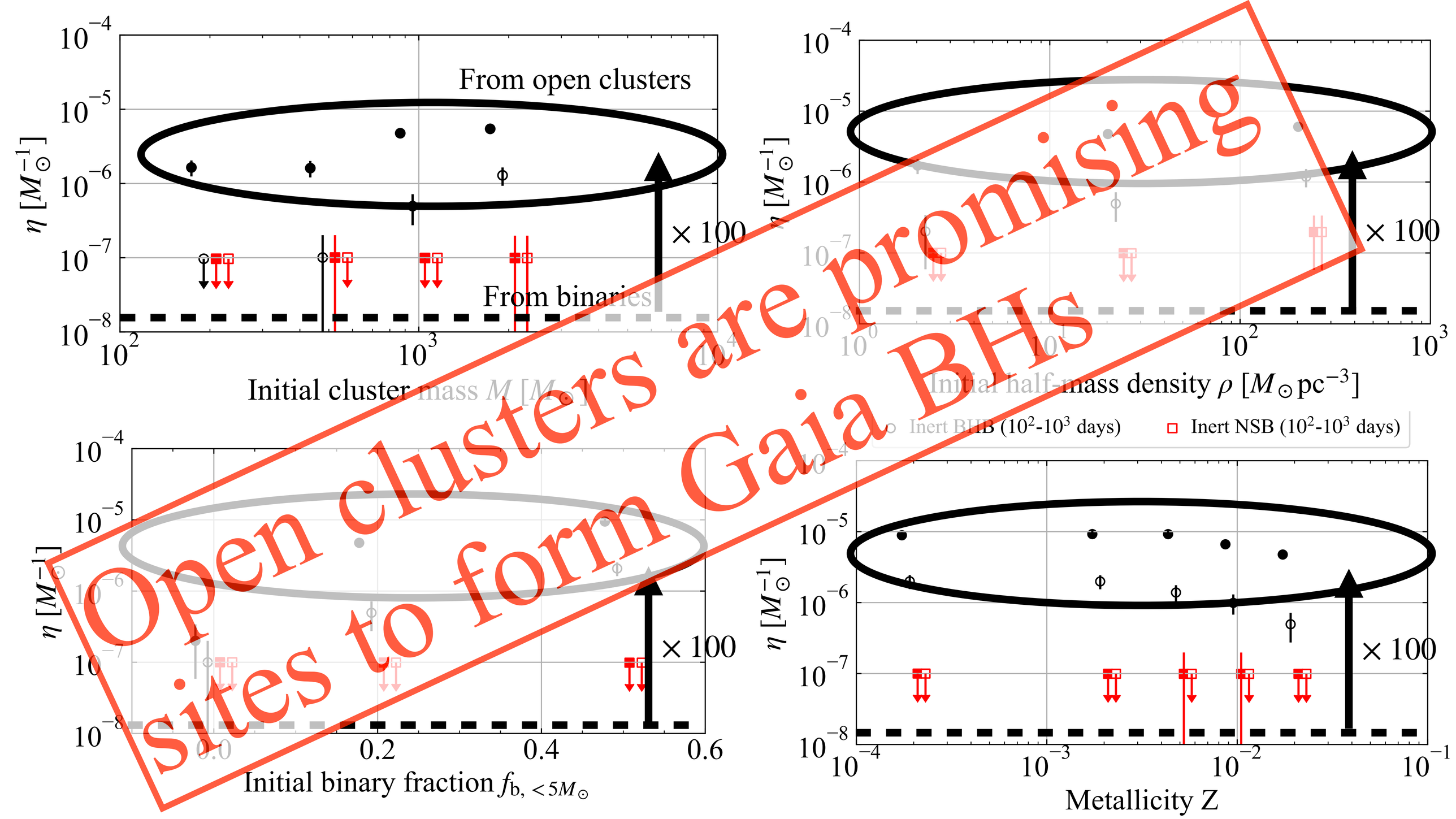
Criteria of Gaia BHs

MS, PMS, He star
(Gaia BH: MS, PMS)

$m_1 \leq 1.1 M_\odot$

$10^2 \leq P/\mathrm{day} \leq 10^4$

$0 \leq e \leq 1$


From open clusters
From binaries
× 100
$\eta\ [M_\odot^{-1}]$
Initial cluster mass $M\ [M_\odot]$
Initial half-mass density $\rho\ [M_\odot\,\mathrm{pc}^{-3}]$
Initial binary fraction $f_{\mathrm{b},<5M_\odot}$
Metallicity Z
Inert BHB (10^2-10^3 days)
Inert NSB (10^2-10^3 days)
Open clusters are promising sites to form Gaia BHs

The number of Gaia BHs in Milky Way

$\sim 10^{-6} M_\odot^{-1}$ for clusters with reasonable mass, density and binary fraction

$$N_{\rm GaiaBH,MW} \sim 6 \times 10^3 \left(\frac{\eta}{10^{-6} M_\odot^{-1}} \right) \left(\frac{M_{\rm MW}}{6.1 \times 10^{10} M_\odot} \right) \left(\frac{f_{\rm cluster}}{0.1} \right)$$

Sufficiently large to explain the presence of Gaia BHs

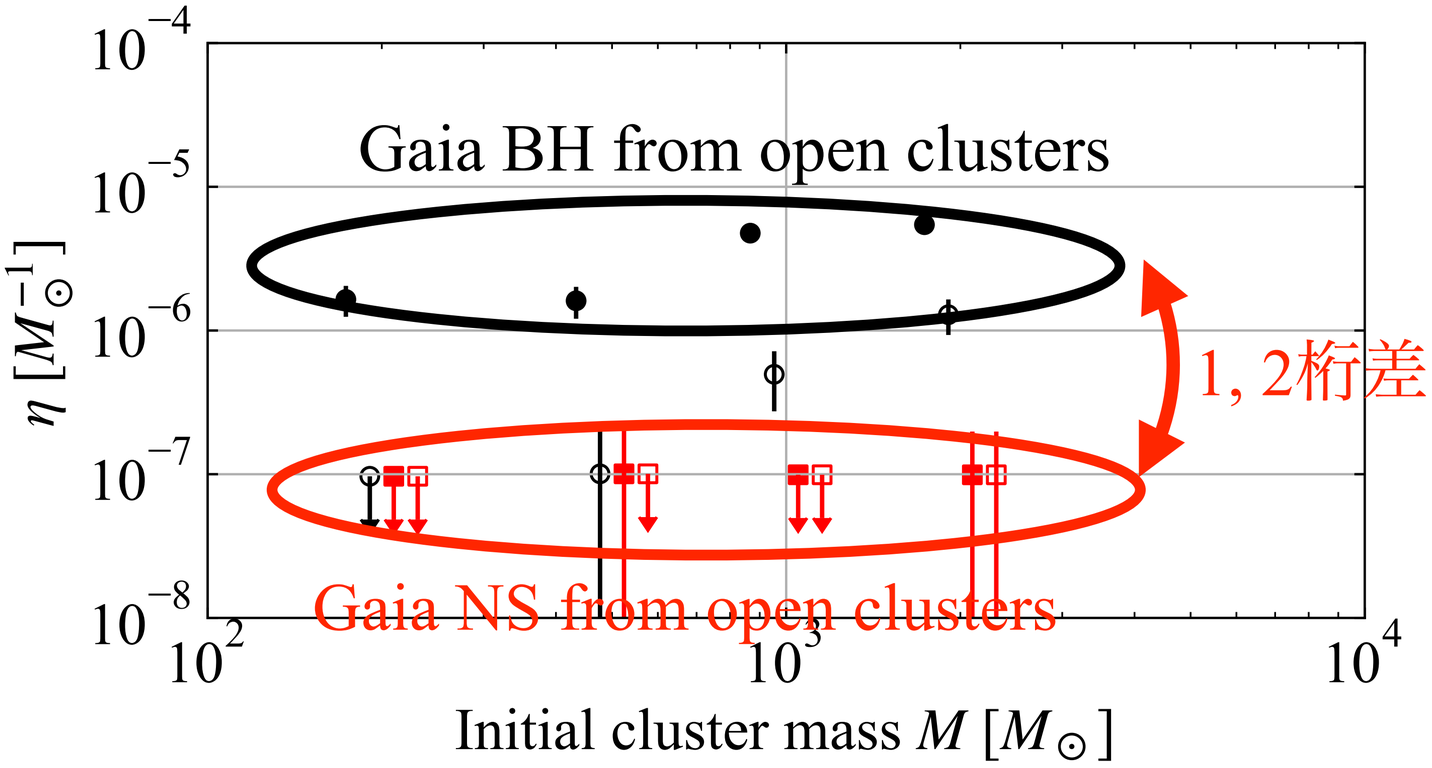
Gaia NS

Name	$P_{\rm orb}$ [days]	$M_\star$ [$M_\odot$]	M_2 [$M_\odot$]	eccentricity	ϖ [mas]	G [mag]	$N_{\rm RVs}$
J0553-1349	189.10 ± 0.05	0.98 ± 0.06	1.33 ± 0.05	0.3879 ± 0.0007	2.505 ± 0.015	13.00	20
J2057-4742	230.15 ± 0.07	1.048 ± 0.031	1.31 ± 0.04	0.3095 ± 0.0026	1.745 ± 0.019	13.58	11
J1553-6846	310.17 ± 0.11	1.04 ± 0.05	1.323 ± 0.032	0.5314 ± 0.0021	1.344 ± 0.012	14.19	16
J2102+3703	480.9 ± 0.6	1.03 ± 0.03	1.44 ± 0.04	0.432 ± 0.017	1.520 ± 0.014	13.70	9
J0742-4749	497.6 ± 0.4	0.90 ± 0.05	1.28 ± 0.04	0.168 ± 0.004	1.035 ± 0.014	14.60	8
J0152-2049	536.14 ± 0.18	0.782 ± 0.03	1.291 ± 0.024	0.6615 ± 0.0010	2.453 ± 0.017	12.05	15
J0003-5604	561.83 ± 0.29	0.802 ± 0.03	1.34 ± 0.04	0.795 ± 0.005	2.183 ± 0.016	14.48	12
J1733+5808	570.94 ± 0.31	1.16 ± 0.05	1.362 ± 0.030	0.3093 ± 0.0010	1.452 ± 0.010	13.65	13
J1150-2203	631.80 ± 0.23	1.18 ± 0.06	1.39 ± 0.04	0.553 ± 0.004	1.738 ± 0.016	12.66	19
J1449+6919	632.76 ± 0.22	0.91 ± 0.05	1.261 ± 0.032	0.2635 ± 0.0013	1.812 ± 0.012	13.20	16
J0217-7541	636.1 ± 0.7	0.996 ± 0.033	1.396 ± 0.033	0.3228 ± 0.0033	1.193 ± 0.012	14.01	10
J0639-3655	654.6 ± 0.6	1.32 ± 0.06	1.70 ± 0.07	0.721 ± 0.013	1.130 ± 0.011	13.36	10
J1739+4502	657.4 ± 0.6	0.778 ± 0.03	1.38 ± 0.04	0.6770 ± 0.0019	1.126 ± 0.013	13.52	16
J0036-0932	719.8 ± 0.9	0.94 ± 0.04	1.362 ± 0.034	0.3993 ± 0.0021	1.661 ± 0.019	13.02	16
J1432-1021	730.9 ± 0.5	0.790 ± 0.03	1.898 ± 0.030	0.1203 ± 0.0022	1.367 ± 0.011	13.34	33
J1048+6547	814.2 ± 3.4	1.00 ± 0.05	1.68 ± 0.07	0.381 ± 0.016	0.899 ± 0.012	14.52	8
J2145+2837	889.8 ± 1.2	0.95 ± 0.05	1.40 ± 0.04	0.583 ± 0.010	4.135 ± 0.017	12.19	10
J2244-2236	938.3 ± 0.5	1.002 ± 0.03	1.443 ± 0.023	0.5666 ± 0.0011	2.079 ± 0.019	13.35	13
J0824+5254	1027 ± 4	1.100 ± 0.03	1.603 ± 0.035	0.686 ± 0.013	1.643 ± 0.015	13.59	12
J0230+5950	1029 ± 5	1.114 ± 0.03	1.401 ± 0.034	0.753 ± 0.011	2.523 ± 0.015	13.09	15
J0634+6256	1046.0 ± 2.1	1.18 ± 0.06	1.48 ± 0.09	0.564 ± 0.011	0.689 ± 0.019	14.62	10

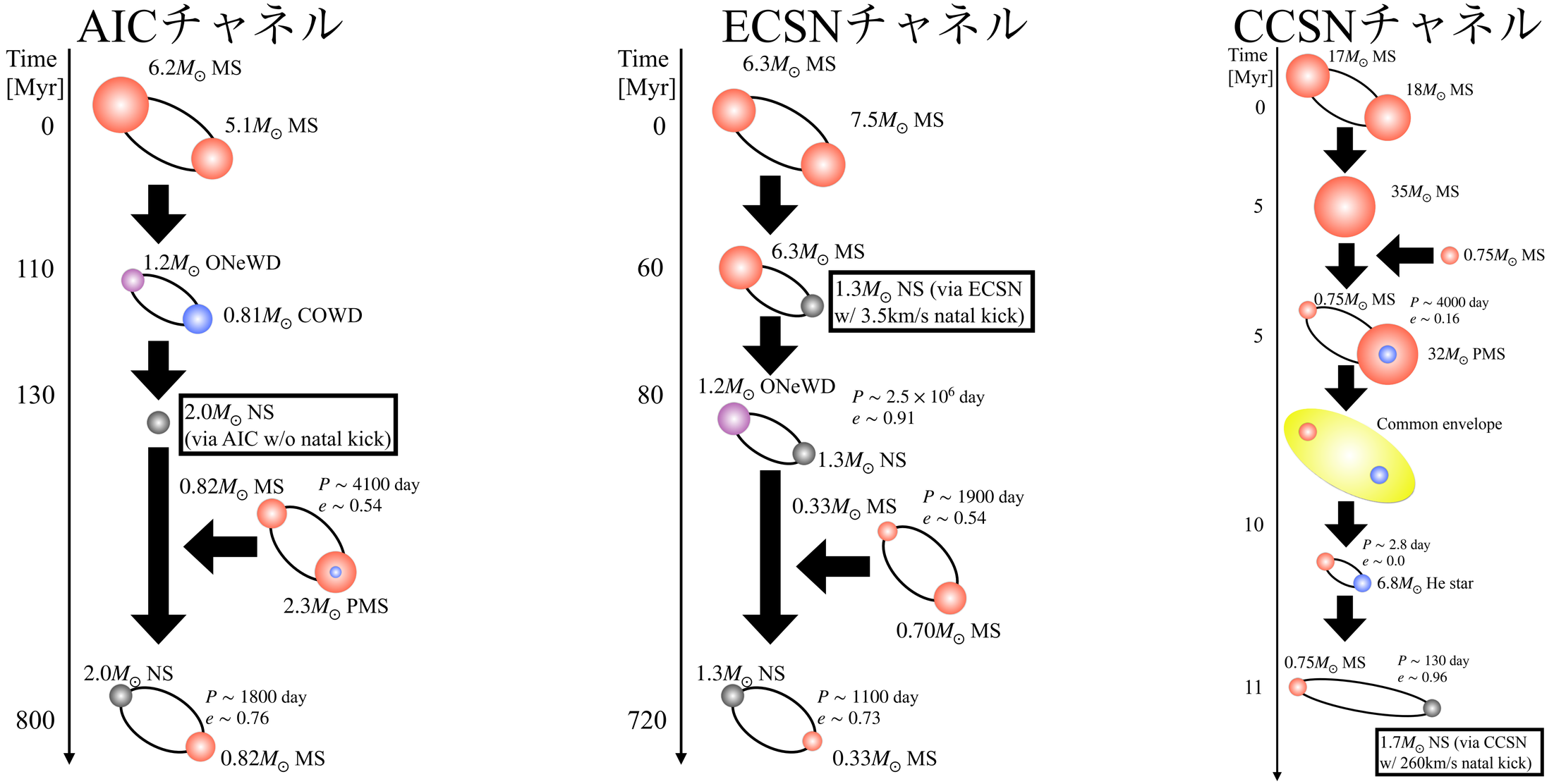
Name	[Fe/H], High-res
J0553-1349	0.12 ± 0.07
J2057-4742	0.13 ± 0.08
J1553-6846	0.13 ± 0.10
J2102+3703	-0.37 ± 0.08
J0742-4749	-0.13 ± 0.12
J0152-2049	-1.28 ± 0.08
J0003-5604	-0.09 ± 0.08
J1733+5808	0.17 ± 0.10
J1150-2203	0.42 ± 0.07
J1449+6919	-0.65 ± 0.09
J0217-7541	0.14 ± 0.10
J0639-3655	0.04 ± 0.10
J1739+4502	-1.82 ± 0.10
J0036-0932	-0.42 ± 0.10
J1432-1021	-1.29 ± 0.11
J1048+6547	-0.14 ± 0.11
J2145+2837	-0.03 ± 0.06
J2244-2236	0.06 ± 0.08
J0824+5254	0.27 ± 0.10
J0230+5950	0.15 ± 0.08
J0634+6256	-0.03 ± 0.11

But, Gaia NS?

- Gaia BHの数は3、Gaia NSの数は21
  - 散開星団ではGaia BHのほうが10-100倍以上効率よく形成
  - しかもGaia BHのほうが見つけやすいはず（明るい星を大きく動かすため）
  - Gaia BHの発見数がGaia NSの発見数より少ないのはおかしい $\Longrightarrow$ **散開星団でGaia BHとGaia NSを両方作ることはできない**
- ありうるシナリオ
  - Gaia BHは散開星団、Gaia NSは三重星
  - なんか未知の孤立連星チャネル
    - e.g. Neutron star kicks plus rockets (Hirai et al. 2024)

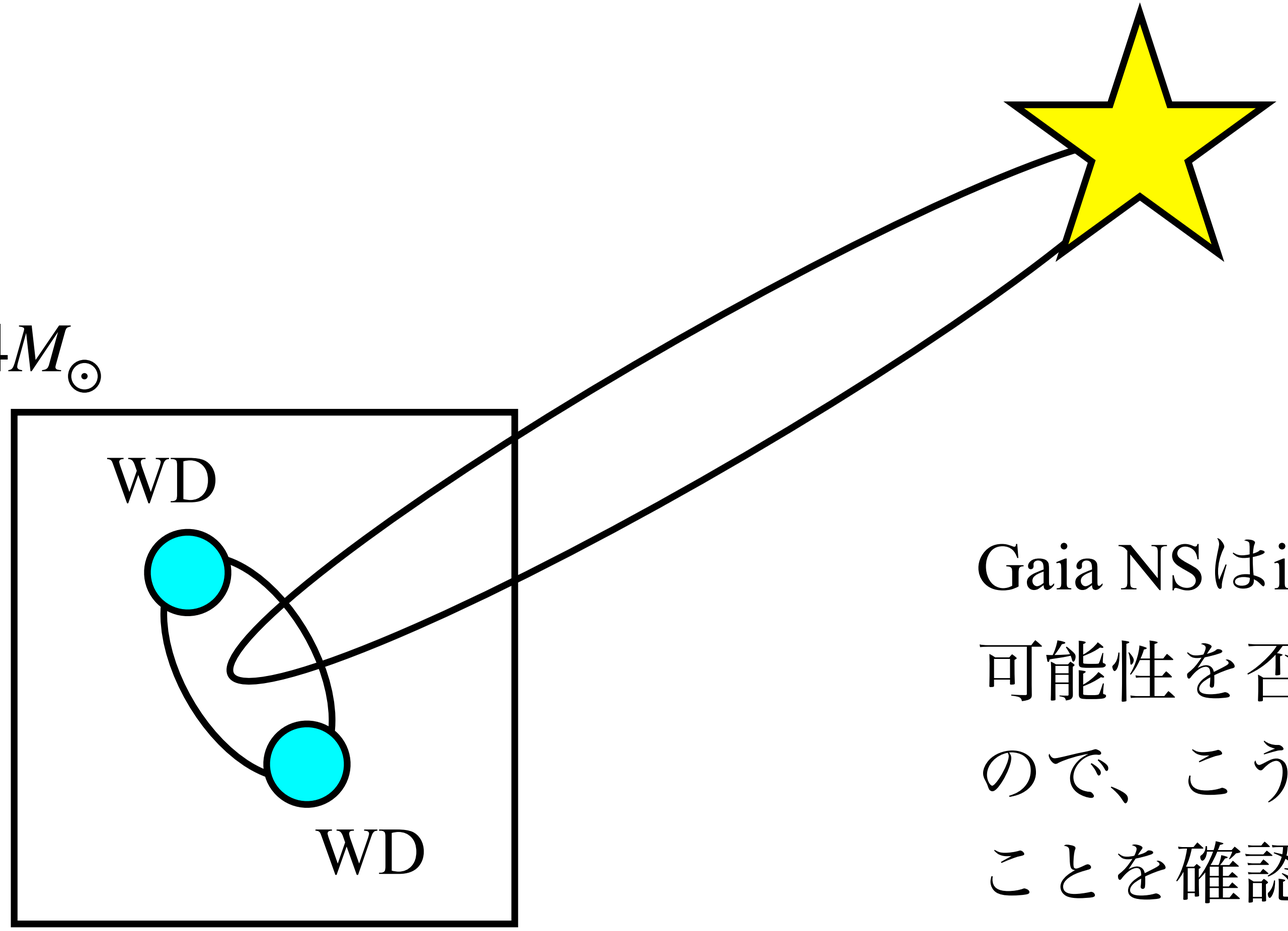


星団内でGaia NS形成しやすくしている



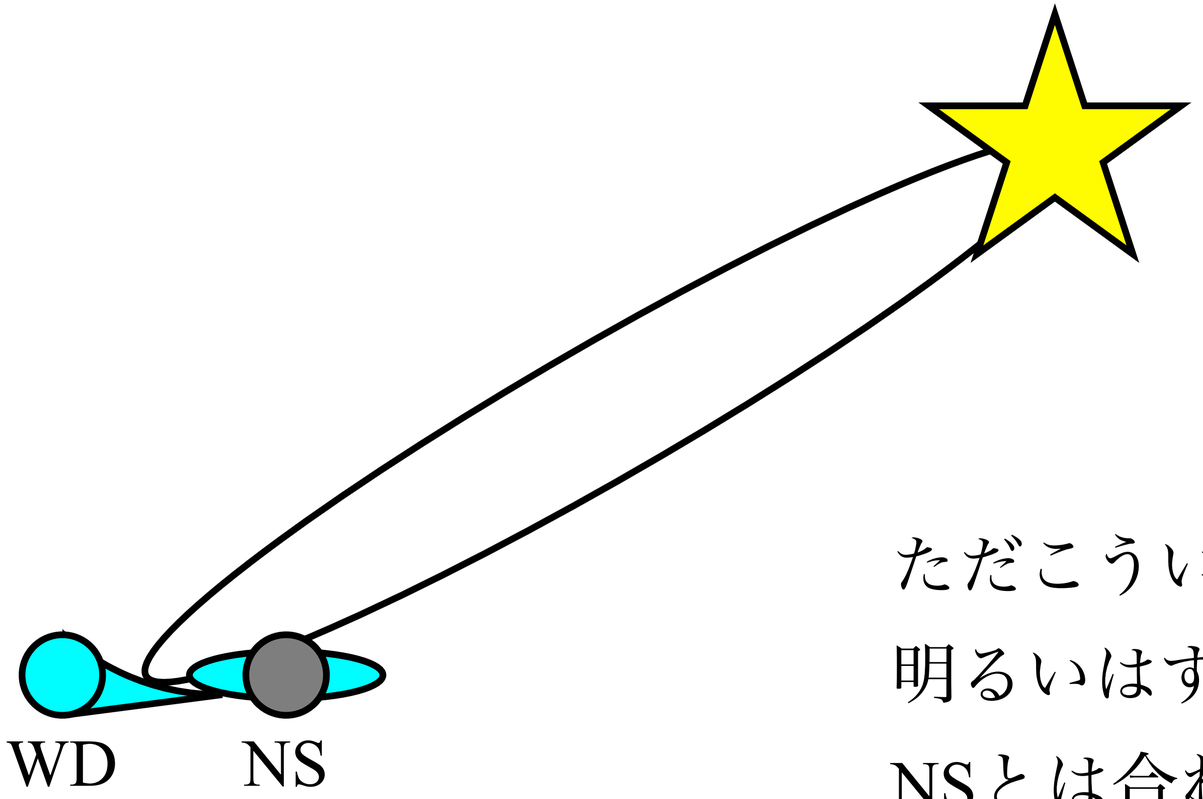
こういうのもなかった

全質量 $\gtrsim 1.4 M_{\odot}$



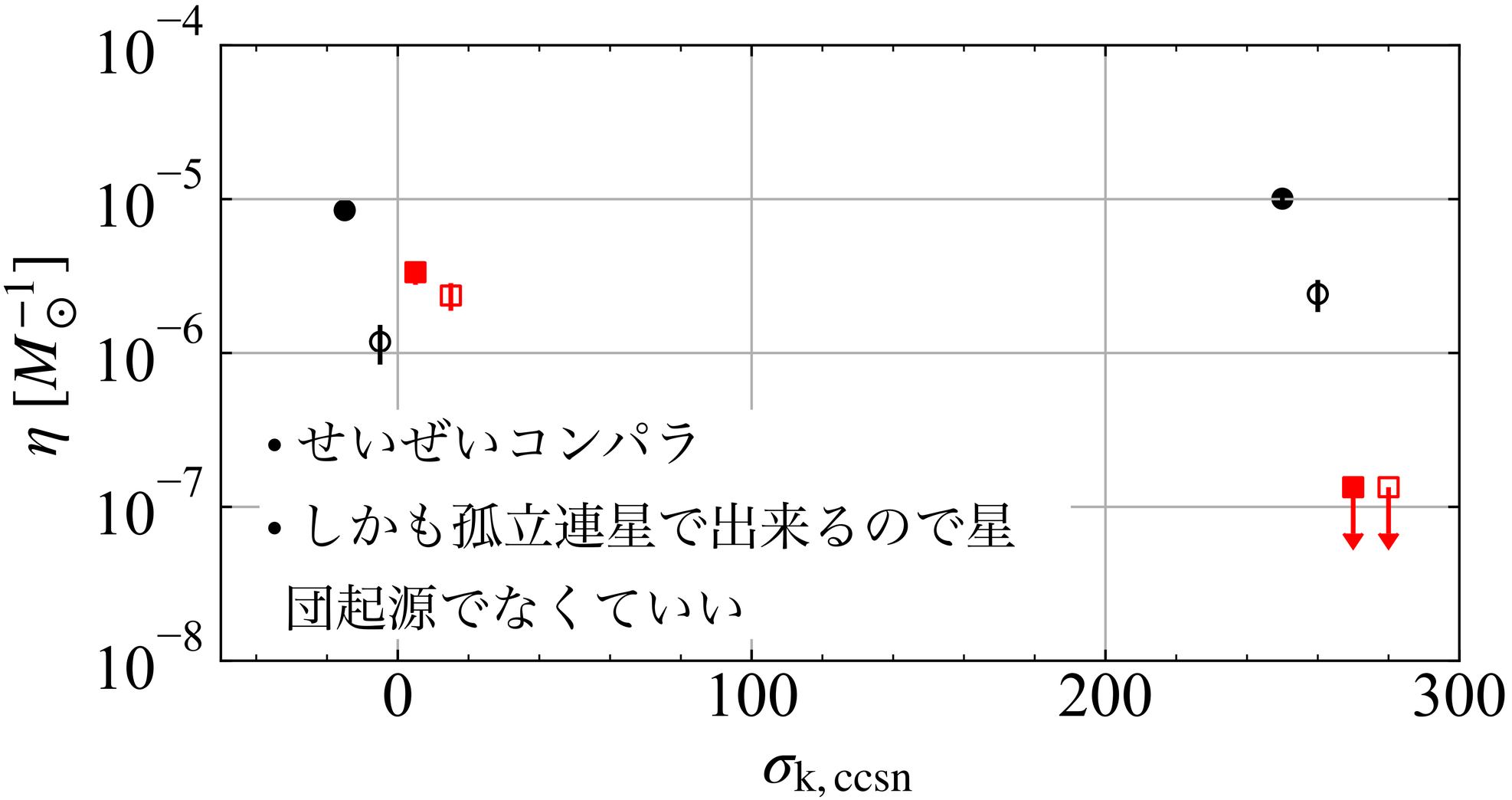
Gaia NSはinner WD-WDの
可能性を否定できていない
ので、こういうものが無い
ことを確認するのは重要

こういうものはあった



ただこういうものはX線で
明るいはずなので、Gaia
NSとは合わない

キックをゼロにしても意味なし



まとめ

- Gaia DR3の登場によって、BH/NS連星の新たなパラメータスペース（軌道周期10^2 – 10^4日）が切り開かれつつある。
- Gaia BHの形成は星団での力学的捕獲でも良い。
- Gaia NSの形成は星団での力学的捕獲**ではない**。