

# 全金属量の孤立連星から形成される 連星ブラックホールの性質の数値研究

連星系・変光星研究会2022@鹿児島大学

AT, Yoshida, Kinugawa, Trani, Hosokawa, Susa, Omukai (2021,  
arXiv:2110.10846, ApJ accepted)

AT, Susa, Yoshida, Trani, Kinugawa (2021, ApJ, 910, 30)

AT, Kinugawa, Yoshida, Hijikawa, Umeda (2021, MNRAS, 505, 2170)

AT, Yoshida, Kinugawa, Takahashi, Umeda (2020, MNRAS, 495, 4170)

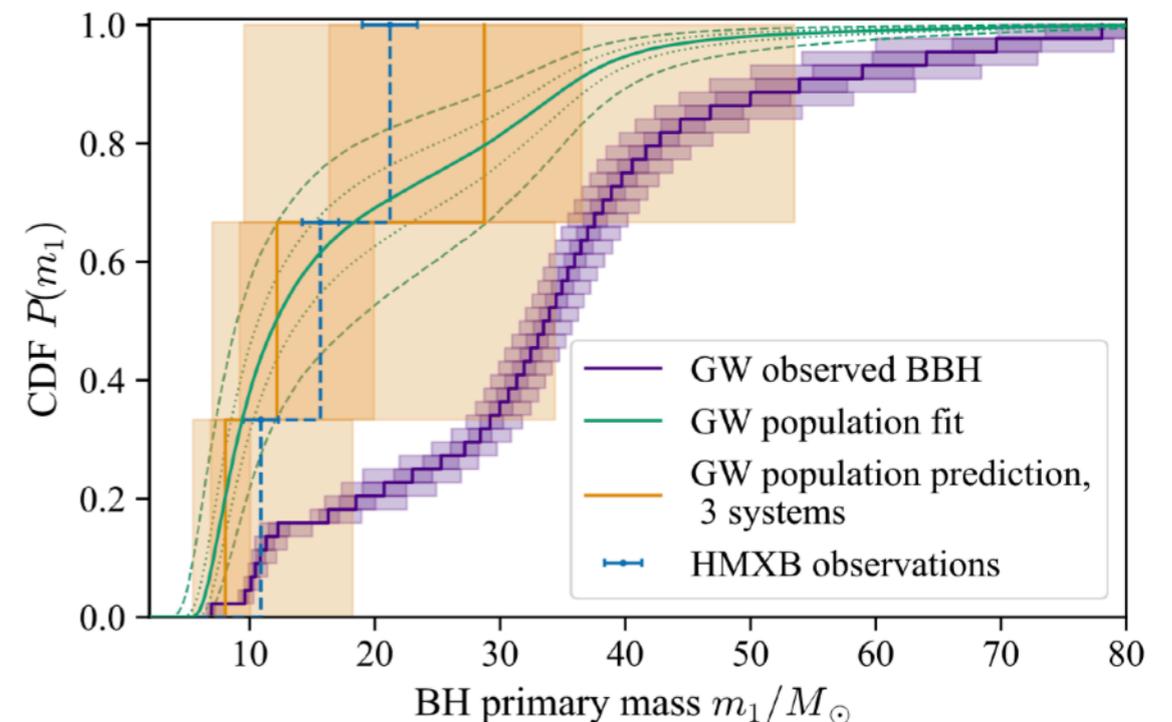
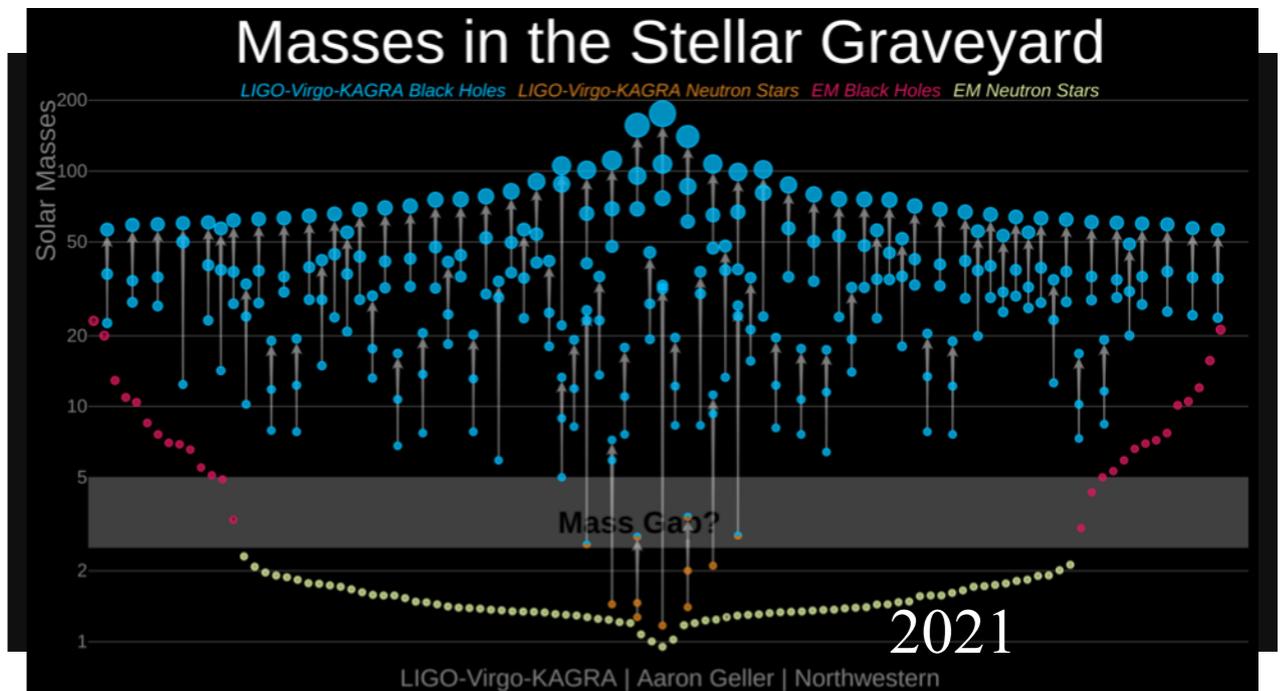
共同研究者（敬称略，50音順）：梅田秀之，大向一行，衣川智弥，須佐元，高橋亘，アレックスサンドロ・トラニ，聖川昂太郎，細川隆史，吉田敬

東京大学大学院 総合文化研究科  
広域科学専攻 広域システム科学系  
宇宙地球部会（東大駒場）

たにかわ あたる  
谷川 衝

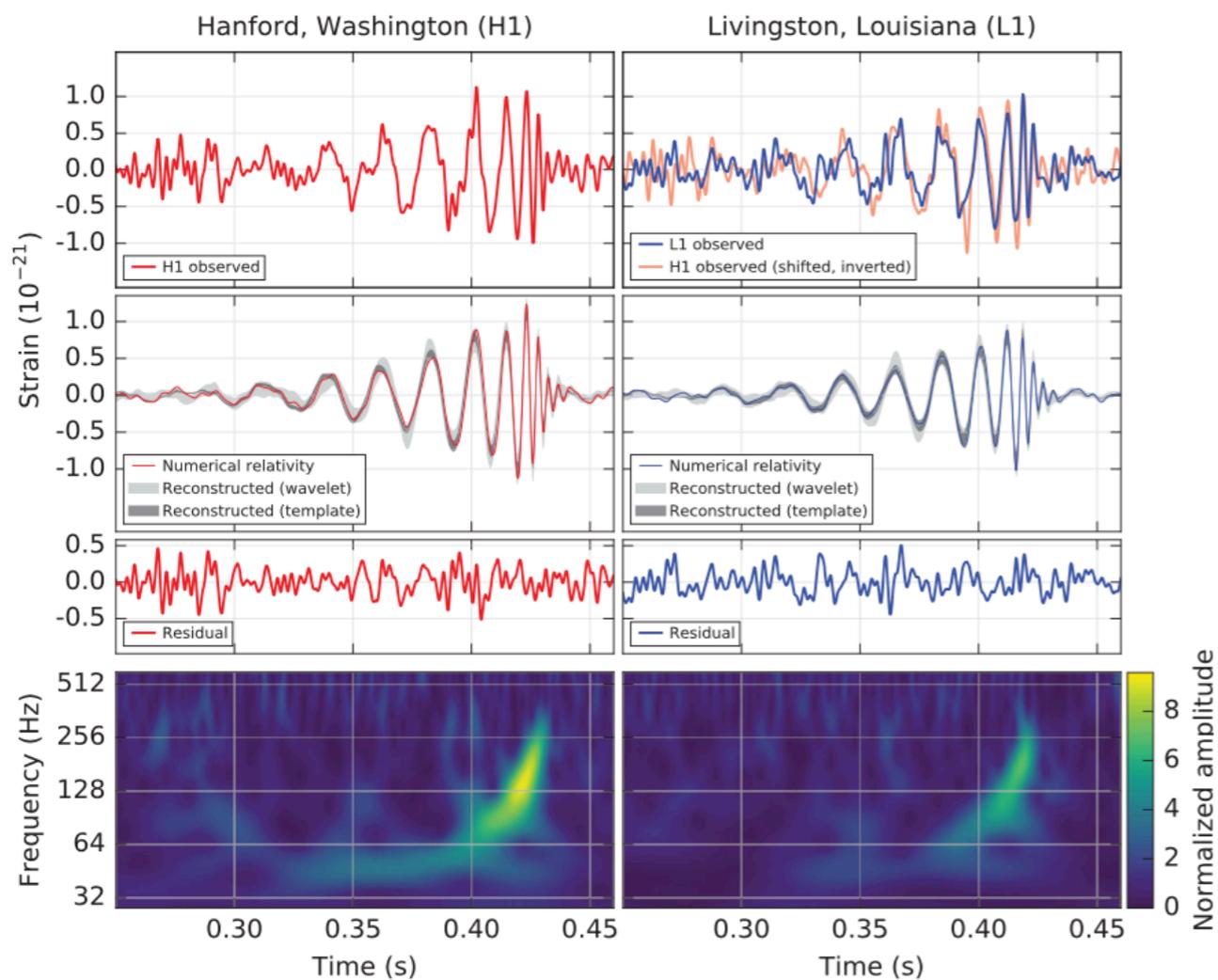
# 重力波による連星BHの発見

- 連星BH発見数の急激な増加
  - 2015年 連星BH初発見 (Abbott et al. 2016)
  - 2021年 発見数 ~ 80 (Abbott et al. 2021)
- BH質量
  - X線連星内のBH:  $\sim 10M_{\odot}$
  - 重力波で発見されたBH:  $\sim 30M_{\odot}$
- 起源の違い？
  - 孤立連星, 高密度星団, 原始ブラックホール...

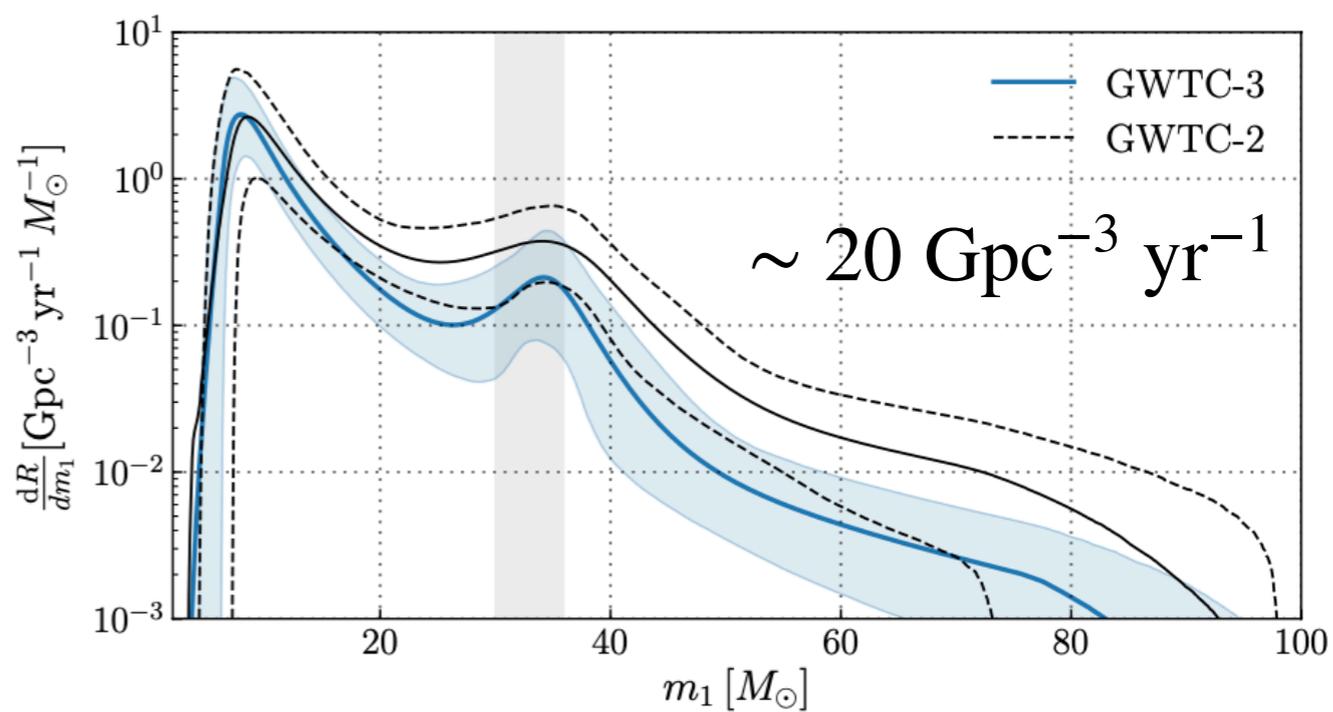
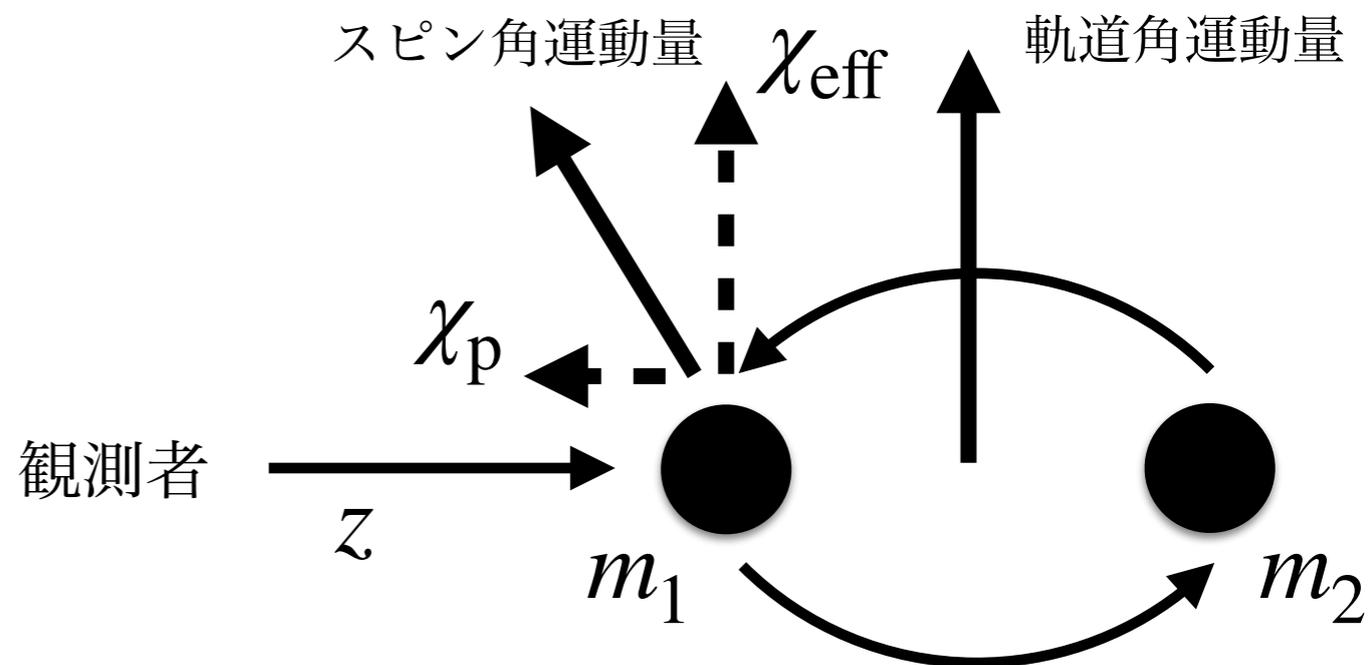


Fishbach & Kalogera (2021)

# 重力波による連星BHの観測

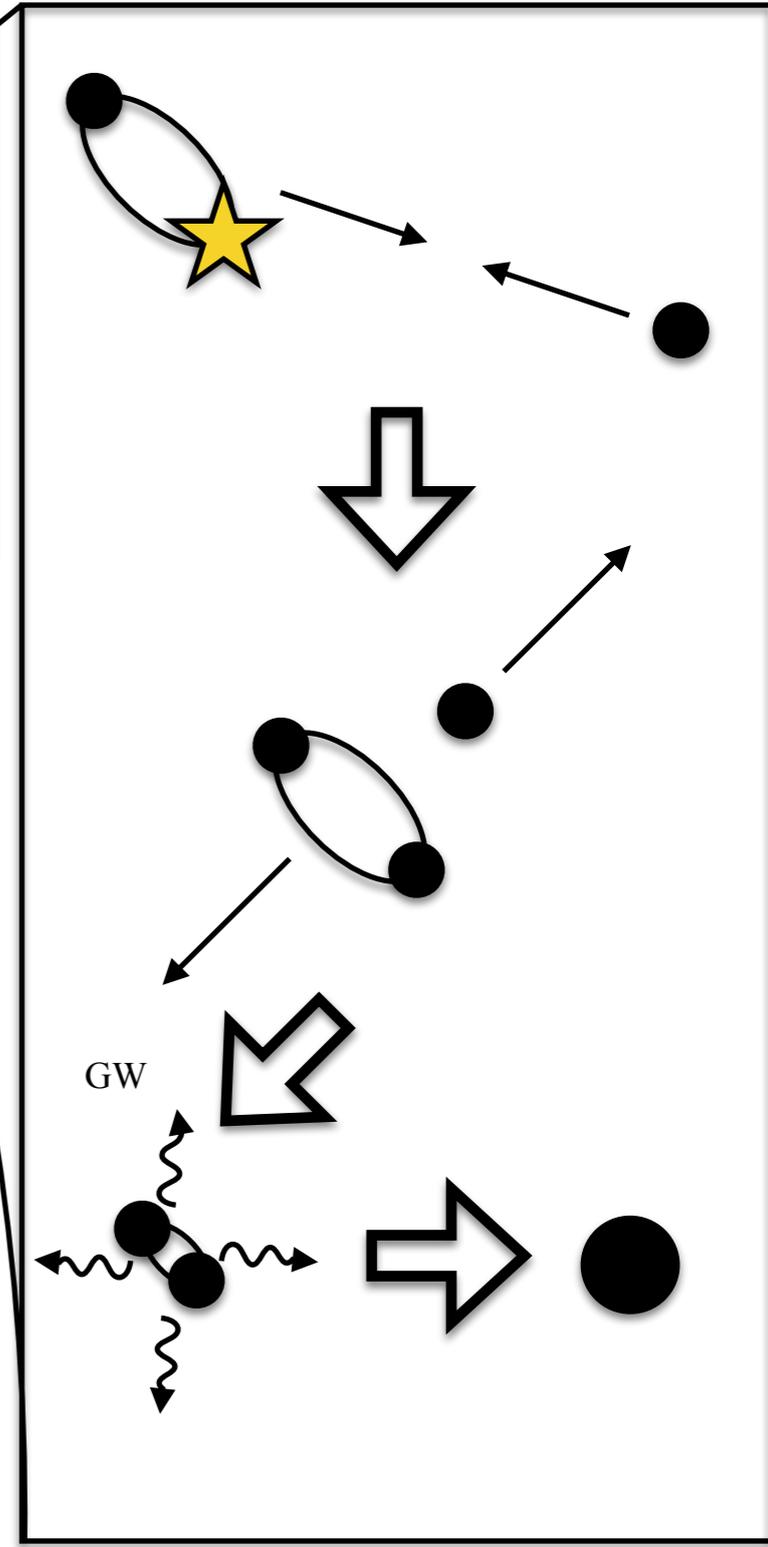
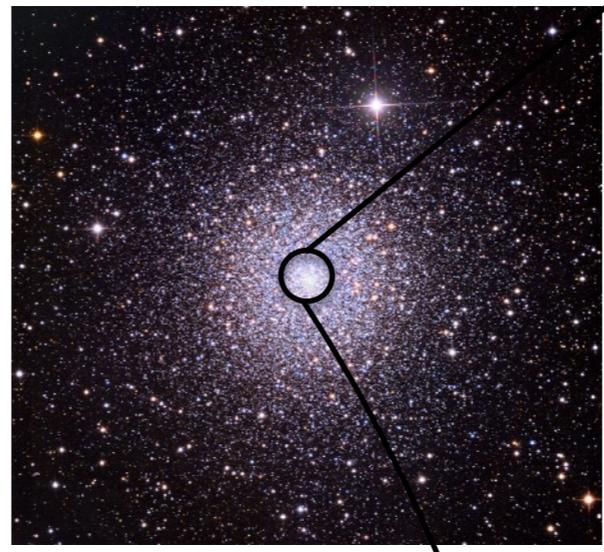
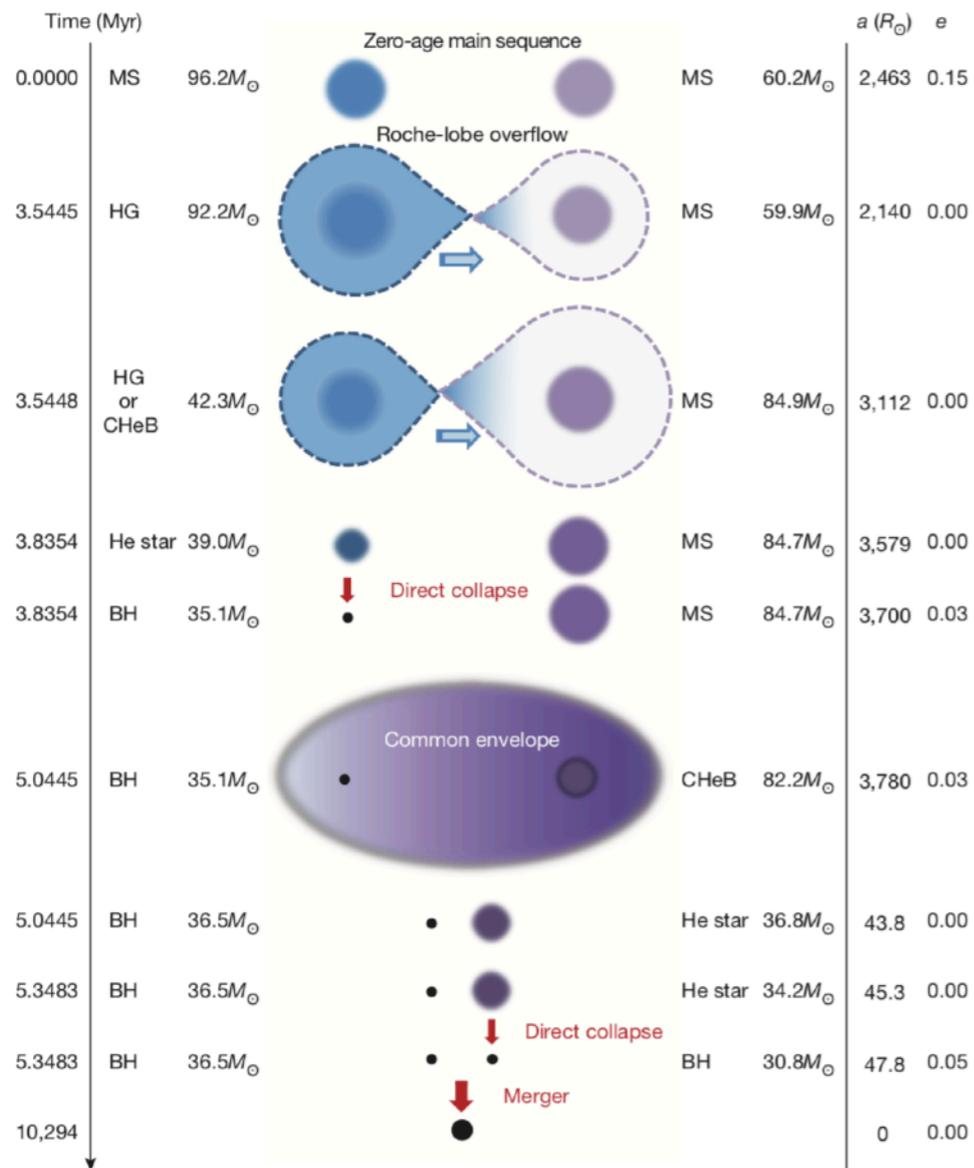


Abbott et al. (2016)



Abbott et al. (2021)

# 孤立連星シナリオ



Belczynski et al.; Eldridge et al.;  
 Giacobbo et al.; Kinugawa et al.;  
 Kruckow et al.; Stevenson et al.;  
**Tanikawa et al.;**

- 散開星団  
 (Kumamoto et al.;  
 Di Carlo et al.)
- 球状星団  
 (Rodríguez et al.;  
 Askar et al.; **Wang et al.**)
- AGNディスク  
 (Tagawa et al.)

# 金属量の重要性

- 金属量の依存性はX線BHと重力波BHの質量差の理由になりうる

- 恒星風

- 低金属量 → 弱恒星風 → 重いBH

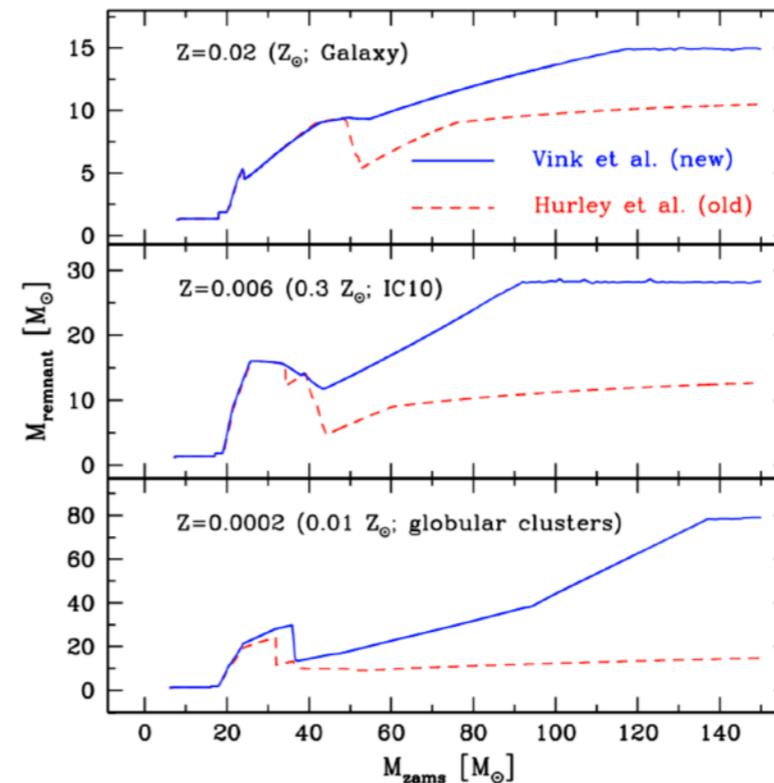
- (Heger et al. 2003; Mapelli et al. 2009; Belczynski et al. 2010; Spera et al. 2015)

- IMF

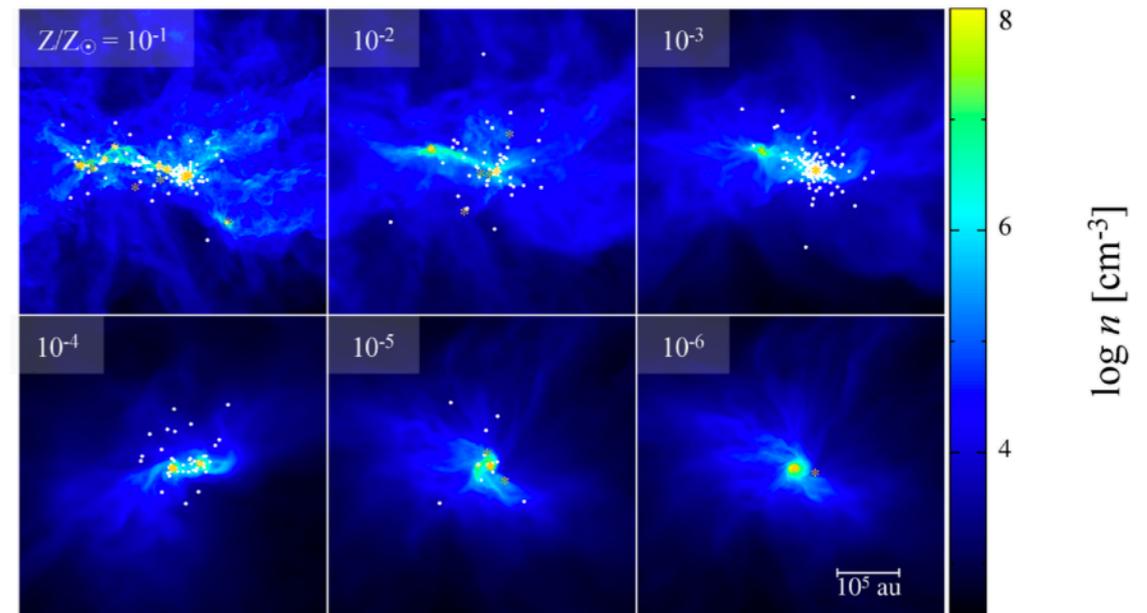
- Top-light ( $Z/Z_{\odot} \gtrsim 10^{-5}$ )

- Top-heavy ( $Z/Z_{\odot} \lesssim 10^{-5}$ )

- (Bromm, Larson 2004; Omukai et al. 2005; Schneider et al. 2006; Maio et al. 2010)



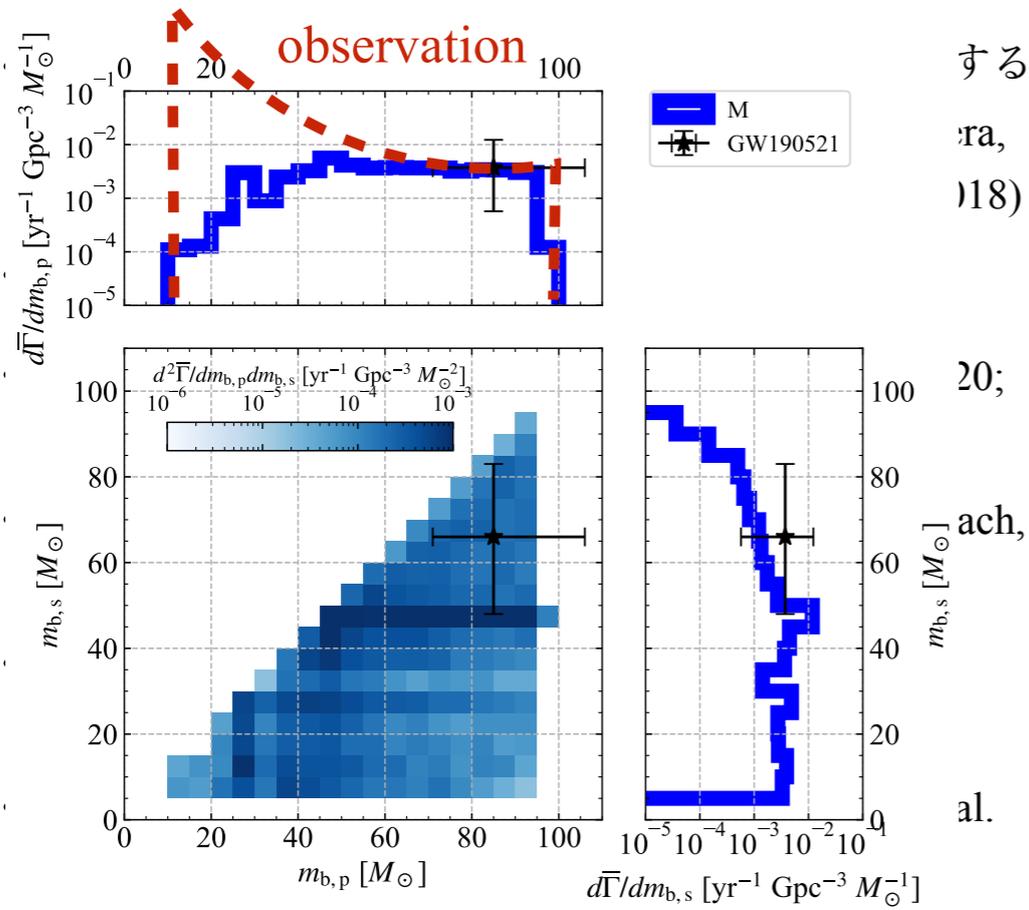
Belczynski et al. (2010)



Chon et al. (2021)

# 対不安定性が生むBHの質量ギャップ

- GW190521:  $85M_{\odot}$  BHと $66M_{\odot}$  BHの合体



- Pop III星なら作れる (Kinugawa et al. 2020; Tanikawa et al. 2021, MNRAS, 505, 2170)

Main sequence (MS)

$M_{\text{tot}} \sim 90M_{\odot}$

$M_{\text{tot}} \sim 60M_{\odot}$

$a \sim 100R_{\odot}$

Post MS

$M_{\text{tot}} \sim 90M_{\odot}$

No mass transfer

$M_{\text{core}} \sim 40M_{\odot}$

BH

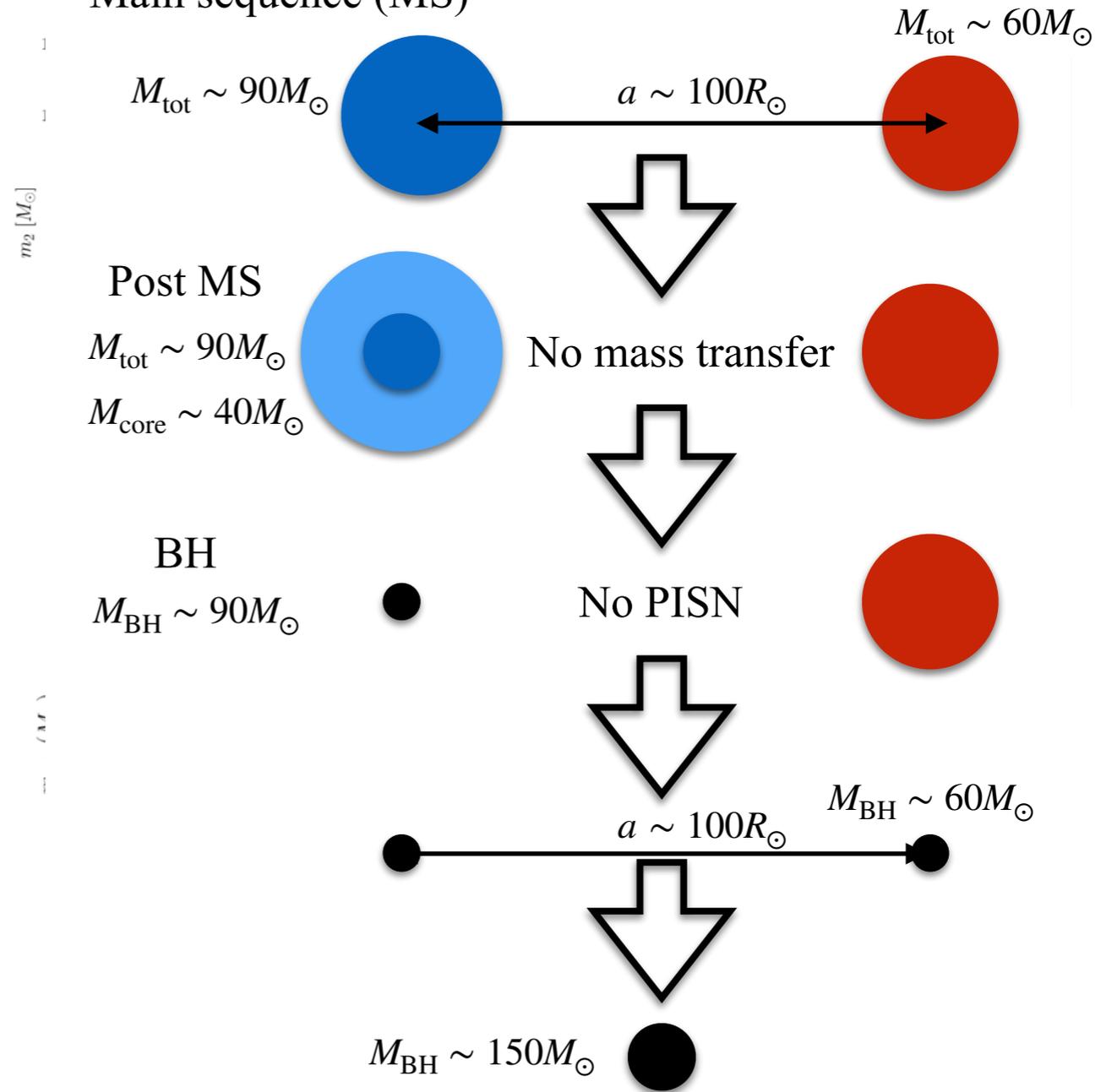
$M_{\text{BH}} \sim 90M_{\odot}$

No PISN

$a \sim 100R_{\odot}$

$M_{\text{BH}} \sim 60M_{\odot}$

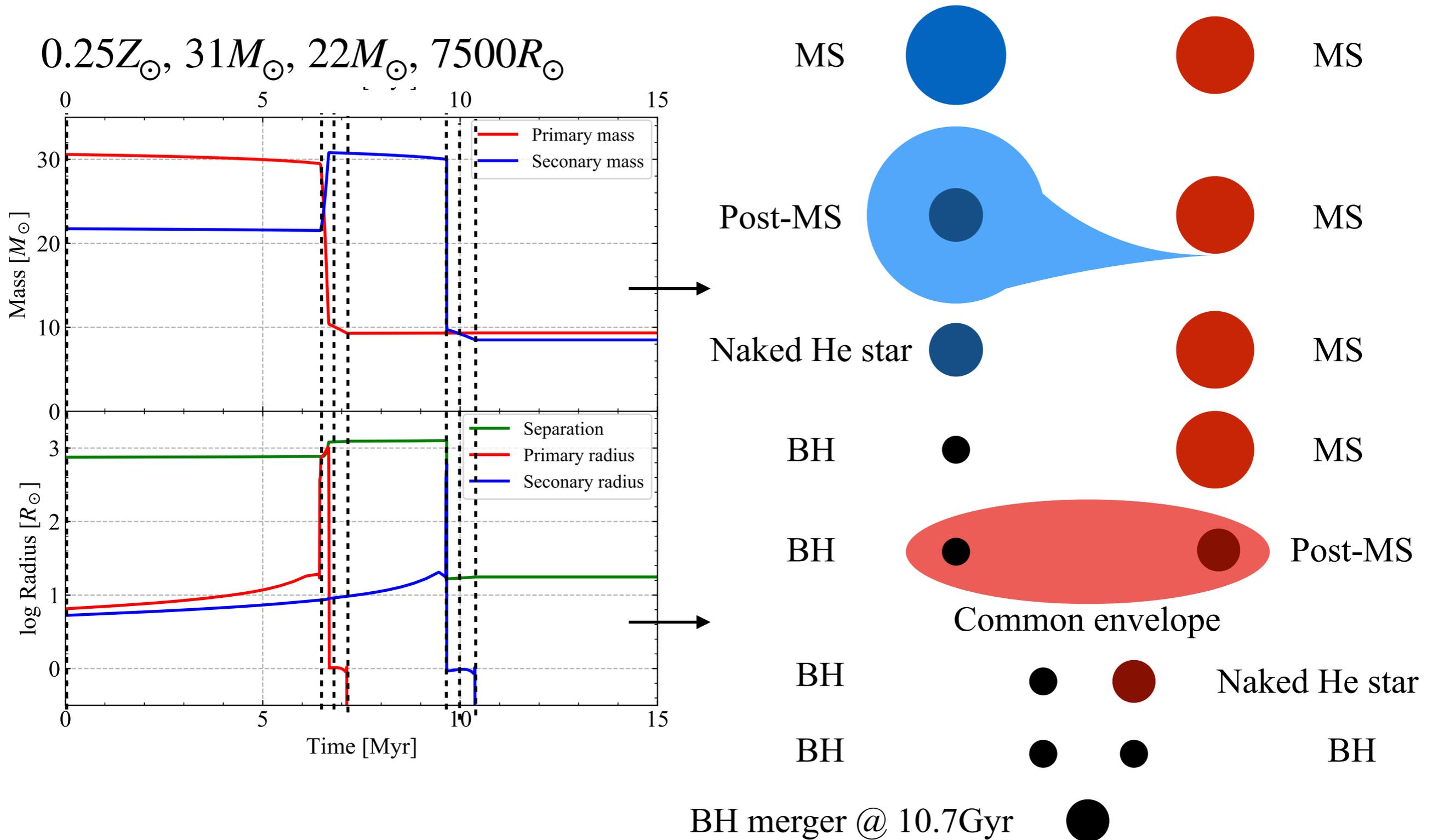
$M_{\text{BH}} \sim 150M_{\odot}$



# 我々の研究

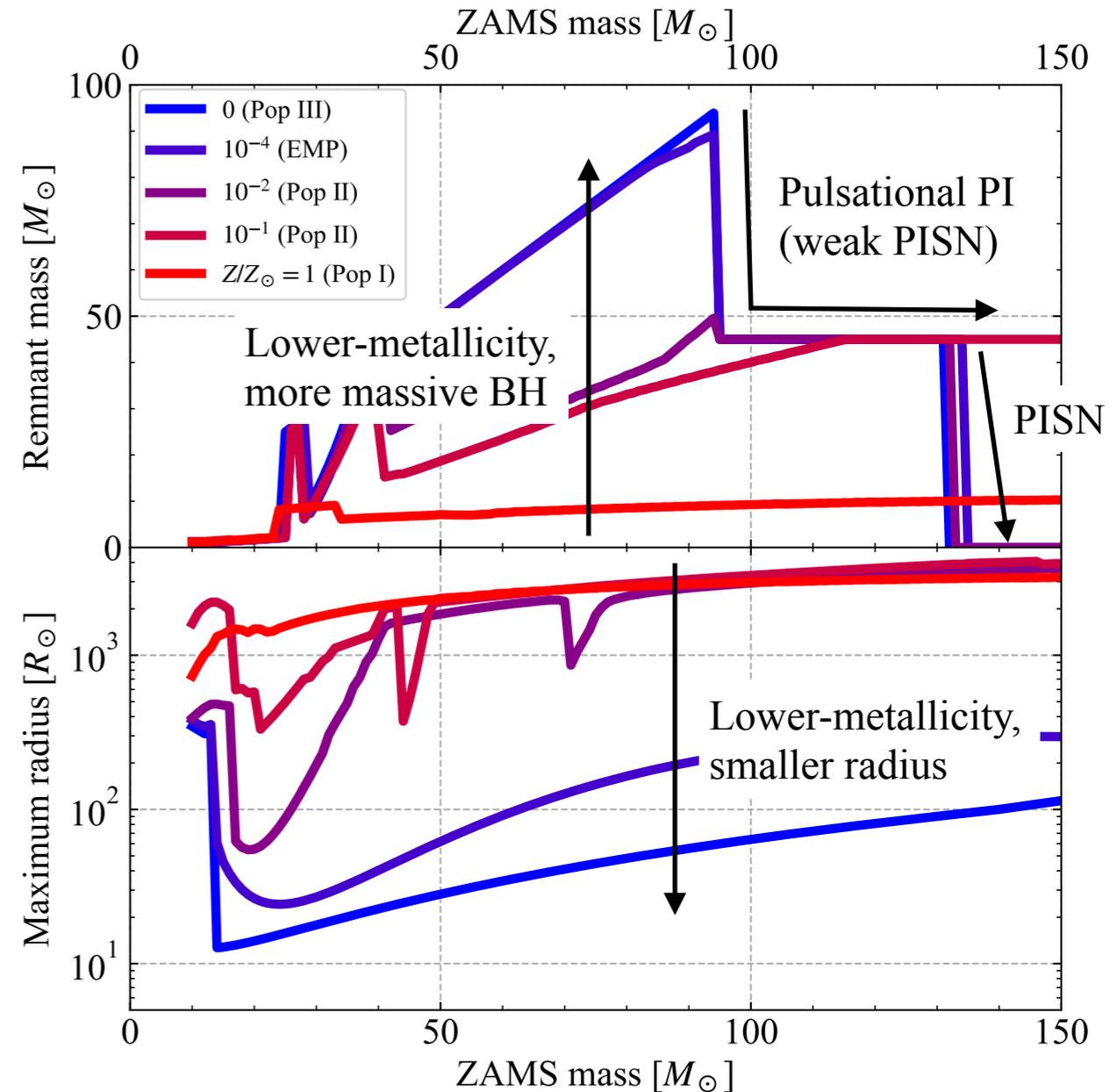
- 全金属量の孤立連星に対して連星種族合成計算を行い連星BH形成を調べる
  - Pop I/IIのみ: BSE (Hurley et al. 2002); binary\_c (Izzard et al. 2009); SeBa (Toonen et al. 2012); BPASS (Eldridge, Stanway 2016); MOBSE (Giacobbo et al. 2018); COSMIC (Breivik et al. 2020); COMPAS (Team COMAS et al. 2021)
  - Pop I/II/IIIのみ: BSE+Pop III (Kinugawa et al. 2020); StarTrack (Belczynski 2002; 2017, but see Inayoshi et al. 2017)
- Pop I:  $Z/Z_{\odot} > 0.16$ , Pop II:  $10^{-3} < Z/Z_{\odot} \leq 0.16$ , EMP:  $0 < Z/Z_{\odot} \leq 10^{-3}$ , Pop III:  $Z/Z_{\odot} = 0$

# 連星種族合成計算



# 単星・連星進化モデル

- 金属量
  - $0, 10^{-6}, 10^{-4}, 10^{-2}, 0.025, 0.05, 0.1 Z_{\odot}$  (Tanikawa et al. 2021)
  - $0.25, 0.5, 1 Z_{\odot}$  (Hurley et al. 2000)
- 恒星風モデル (Belczynski et al. 2010), 超新星モデル (Fryer et al. 2012; Belczynski et al. 2016), BHキックモデル (Hobbs et al. 2005; Fryer et al. 2012)
- 恒星風降着, 潮汐作用, 質量輸送, 共通外層進化, 重力波... (Hurley et al. 2002)



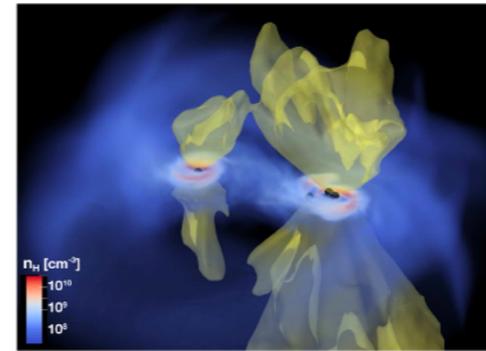
# 初期条件

- 連星

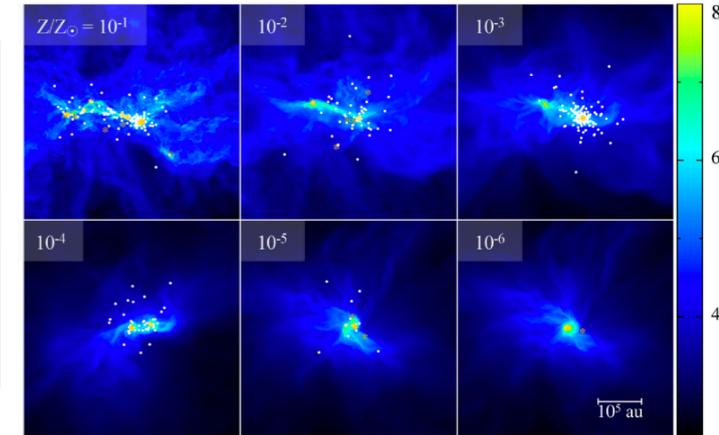
- 連星の割合: 50% (全金属量で)
- Chon's IMF
  - $f(m)dm \propto m^{-2.3}dm$  ( $Z/Z_{\odot} > 10^{-2}$ )
  - $f(m)dm \propto m^{-1}dm$  ( $Z/Z_{\odot} \leq 10^{-6}$ )
  - 上2つの混合 ( $10^{-6} < Z/Z_{\odot} \leq 10^{-2}$ )
- 質量比, 軌道周期, 離心率分布 (Sana et al. 2012)

- 星形成史

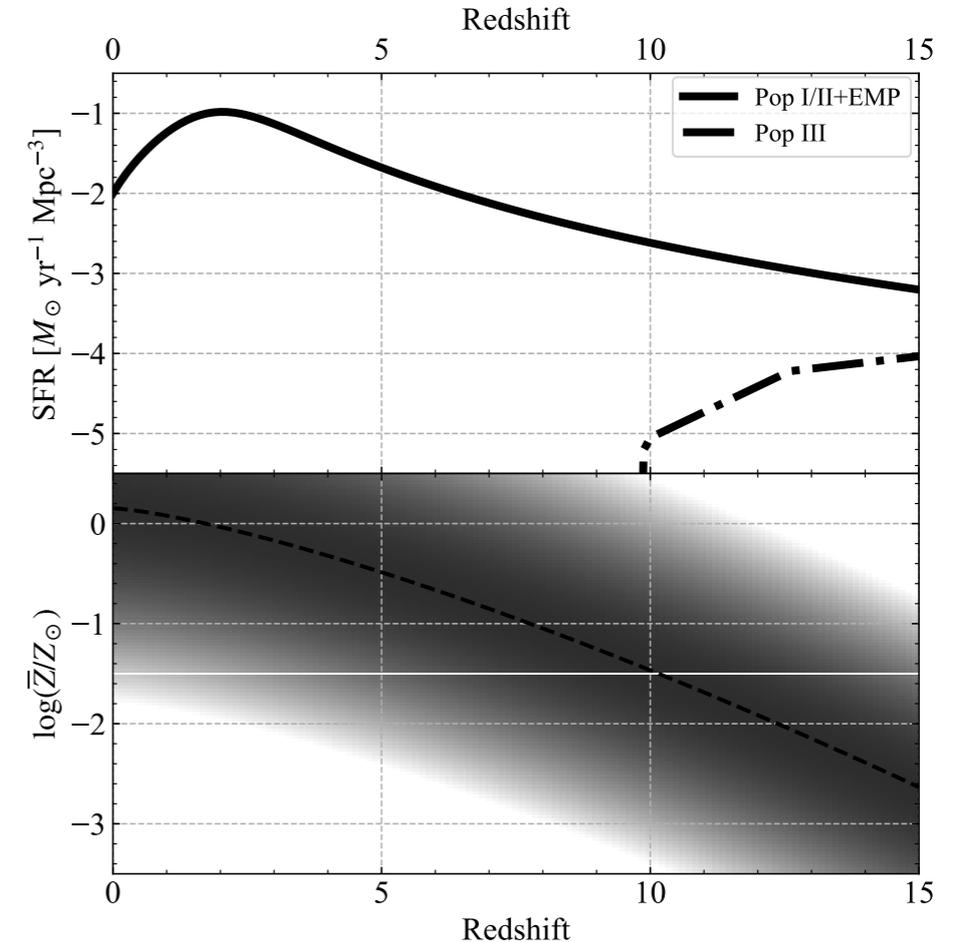
- Pop I/II+EMP (Madau, Fragos 2017), Pop III (Skinner, Wise 2020)
- 平均金属量 (Madau, Fragos 2017)
- 金属量分布: 対数正規分布 ( $\sigma = 0.35$ )



Sugimura et al. (2020)



Chon et al. (2021)

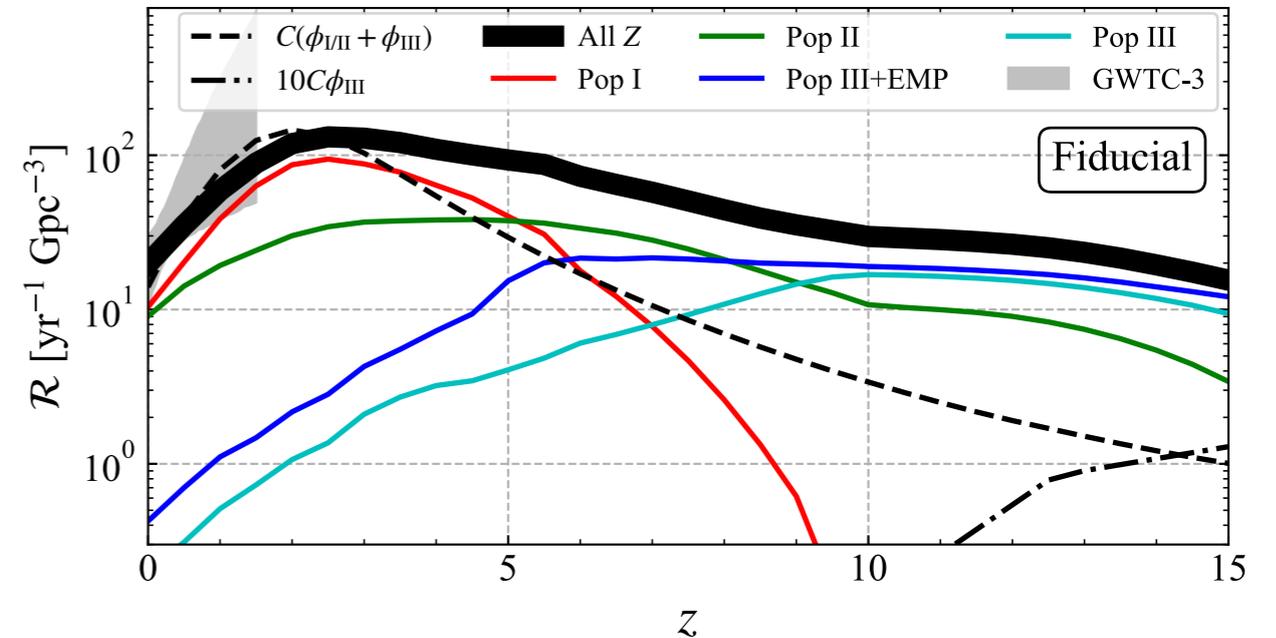


# 連星BHの合体率と質量分布

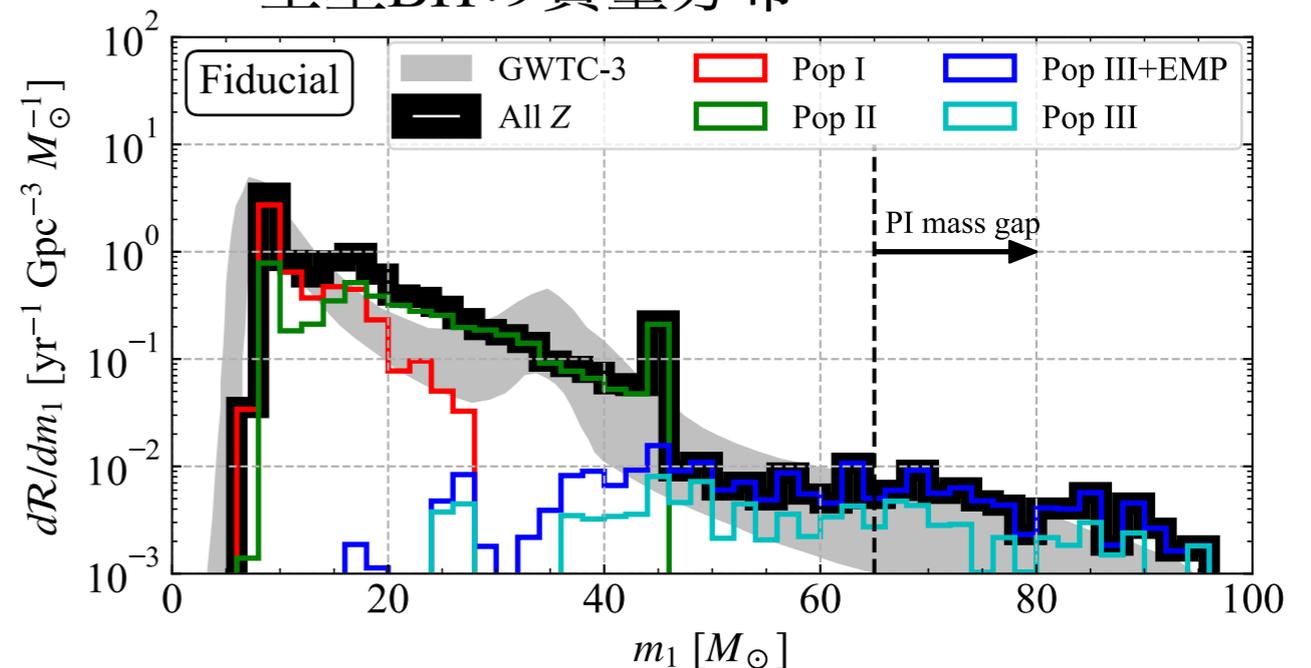
- 合体率を再現
  - 低赤方偏移ではPop I/II
  - 高赤方偏移ではEMP+Pop III
- 質量分布を再現
  - $5 - 20M_{\odot}$ : Pop I
  - $20 - 50M_{\odot}$ : Pop II
  - $50 - 100M_{\odot}$ : EMP+Pop III

• 全金属量が必要！

合体率の赤方偏移進化

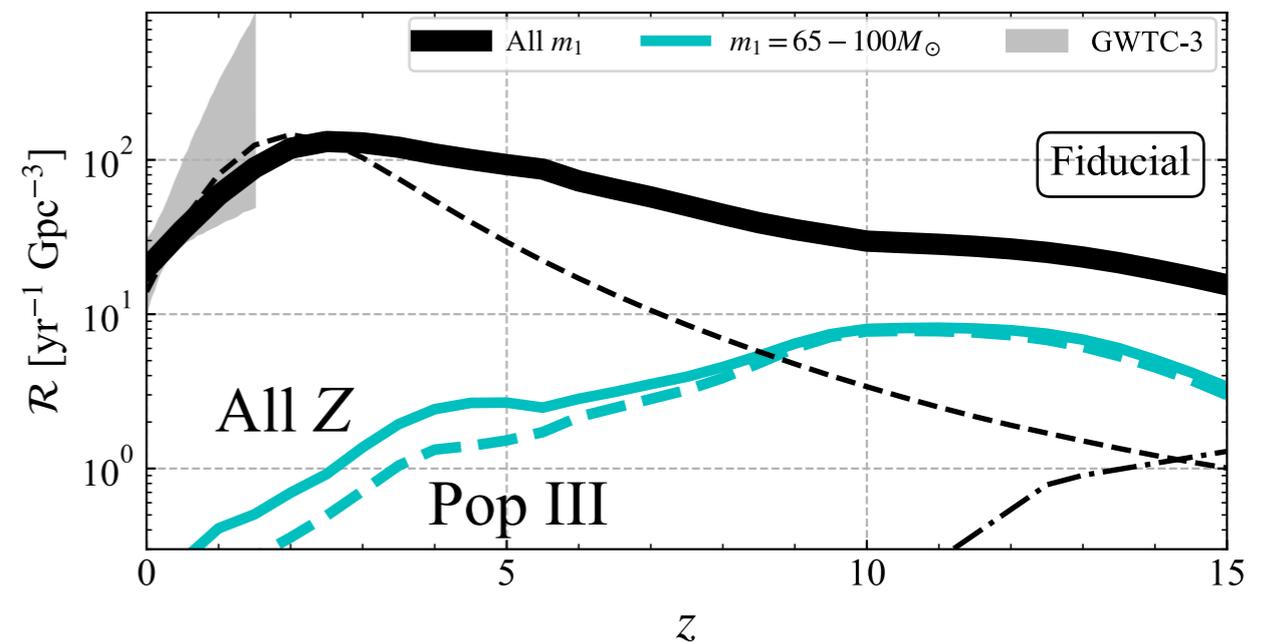
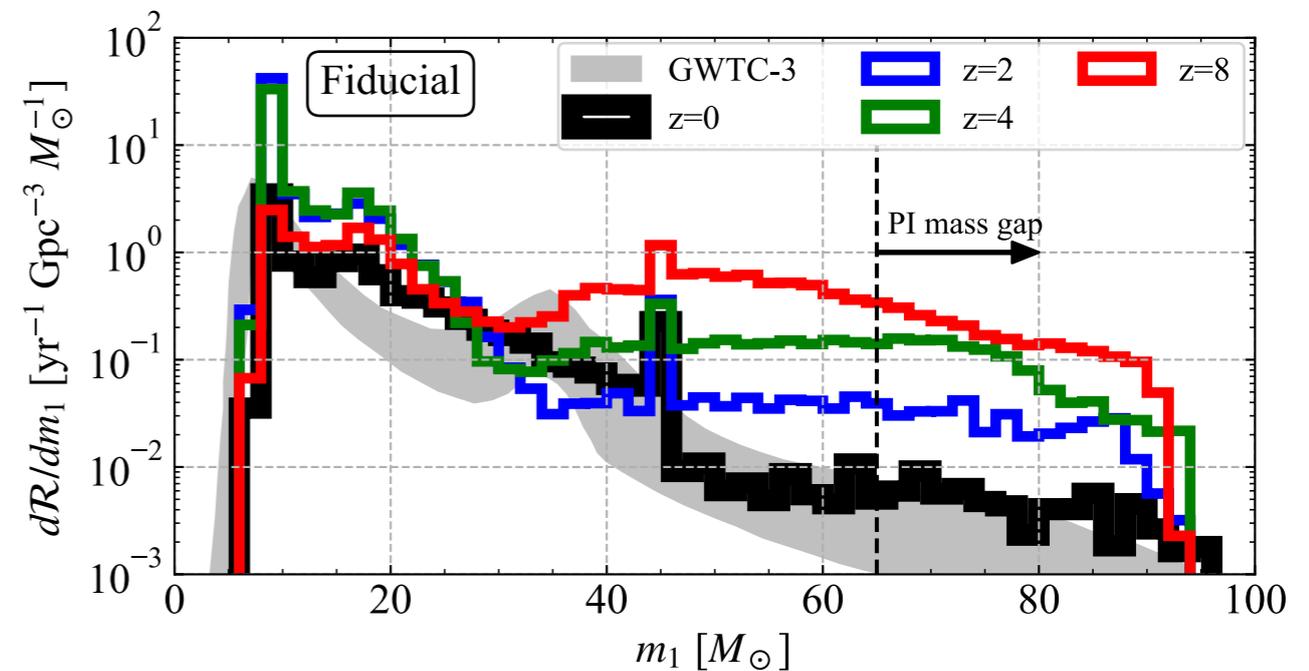


主星BHの質量分布



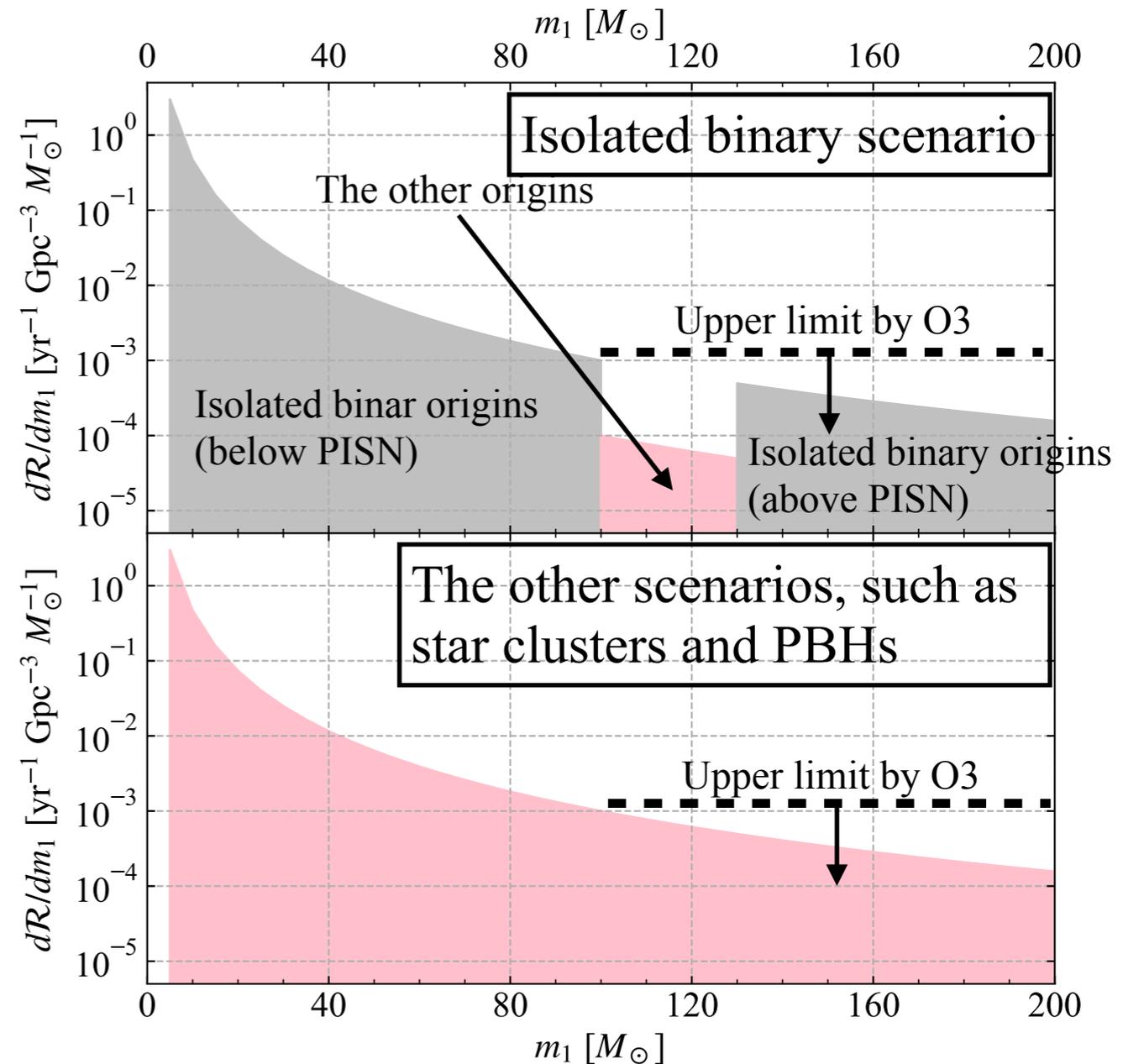
# 質量分布の赤方偏移進化

- $> 40M_{\odot}$ : 高赤方偏移ほど合体率大
- 対不安定質量ギャップにあるBH ( $65 - 100M_{\odot}$ )
  - ピークは $z \sim 11$
  - 高赤方偏移ではPop IIIが支配的
- Pop III星のプロープになりうる

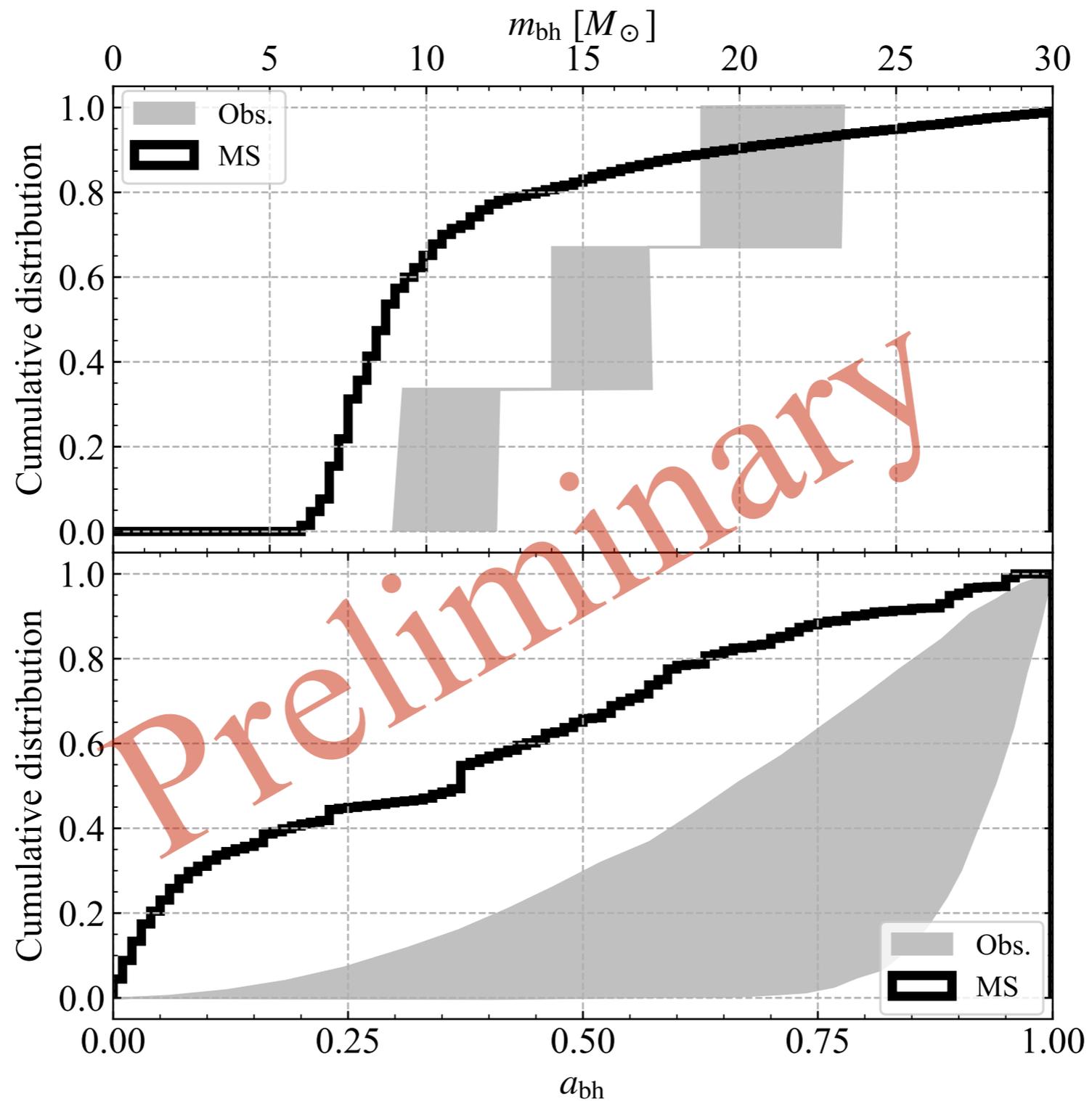


# 他のシナリオとの違い

- $100 - 130M_{\odot}$  BHなし
  - $m_1 \lesssim 100M_{\odot}$ : below PISN
  - $m_1 \gtrsim 130M_{\odot}$ : above PISN
- 他のシナリオではあり
- もし孤立連星シナリオが正しいければ,  
 $m_1 = 100 - 130M_{\odot}$ に穴があく
- 近い将来  $m_1 > 100M_{\odot}$  の合体率は制限されるはず (Abbott et al. 2021, arXiv:2105.15120).



# BH大質量X線連星 (BH-HMXB)



# まとめ

- 全金属量に対して連星種族合成計算
- 重力波観測と無矛盾な連星BHの合体率と質量分布の再現には全金属量の孤立連星が必要
- $100 - 130M_{\odot}$  BHの合体率が小さいはず (2020年代)
- $65 - 100M_{\odot}$  BHはPop IIIのプローブの可能性 (2030年代)
- X線連星との比較も開始