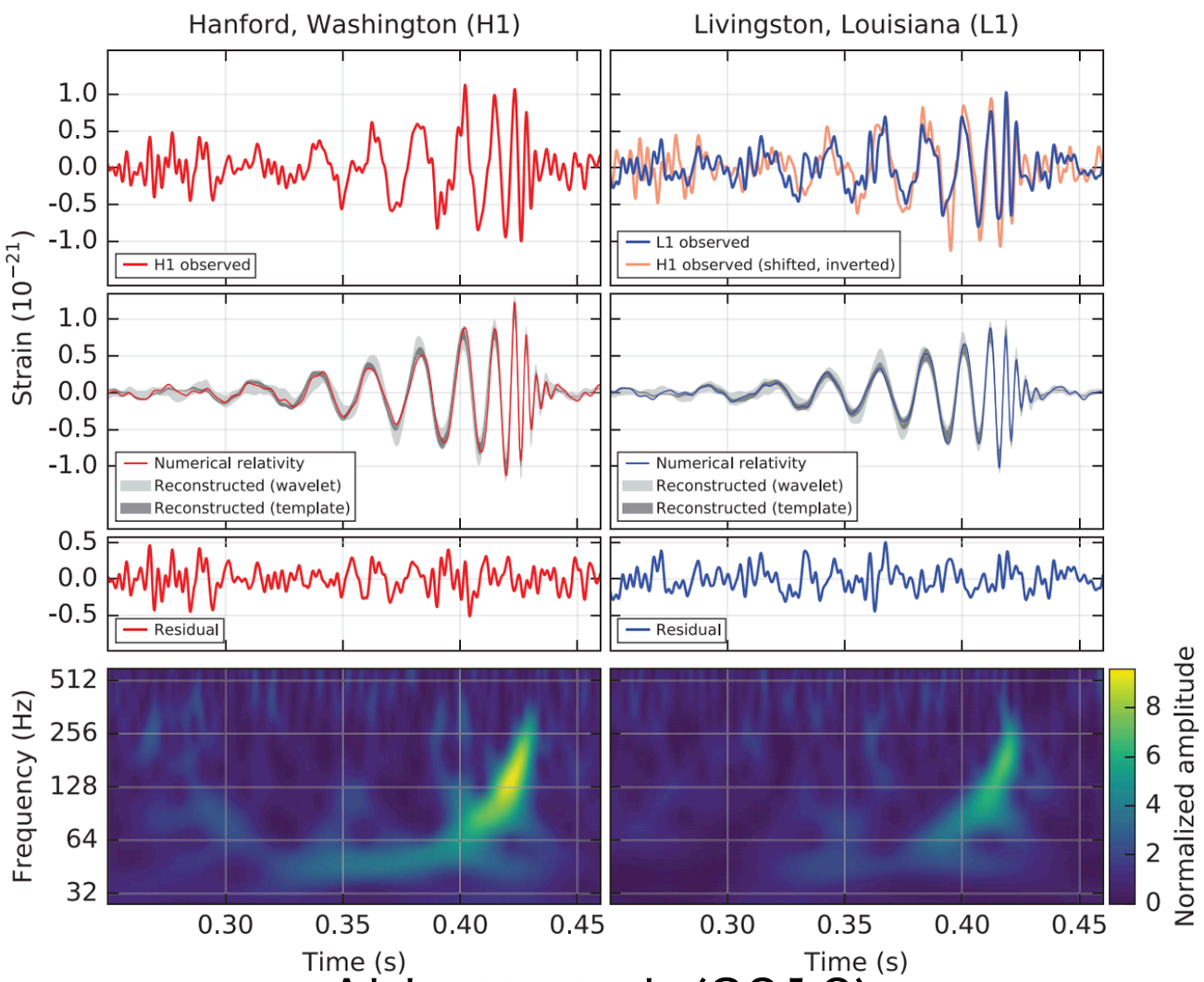
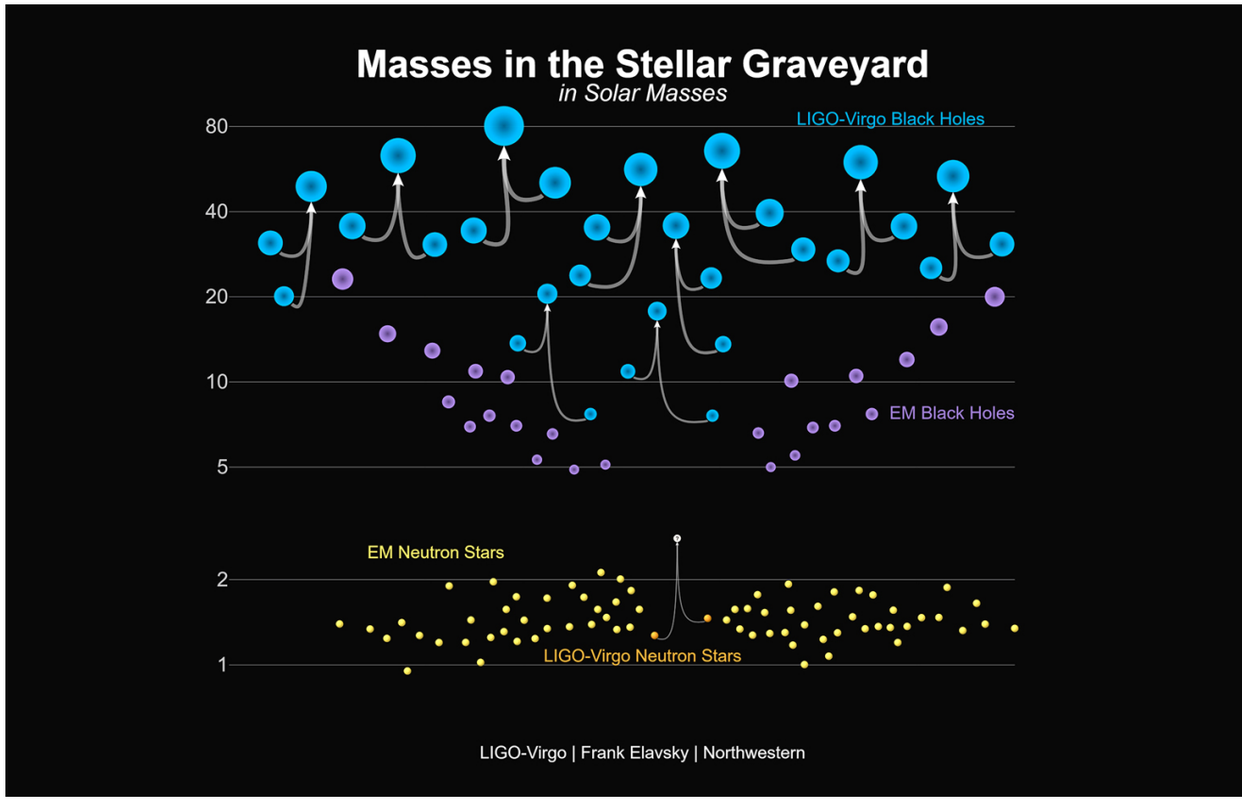
種族合成計算と星団進化計算用の超低金属量星の進化経路モデルの開発

発表者：谷川衝[1]
共同研究者：吉田敬[1]，衣川智弥[1]，高橋亘[2]，梅田雅之[1]
所属機関：[1]東京大学，[2]マックスプランク研究所
日本天文学会2019年秋季年会，熊本，2019年9月13日
Tanikawa et al. (2019, arXiv:1906.06641)

連星ブラックホール(BH-BH)

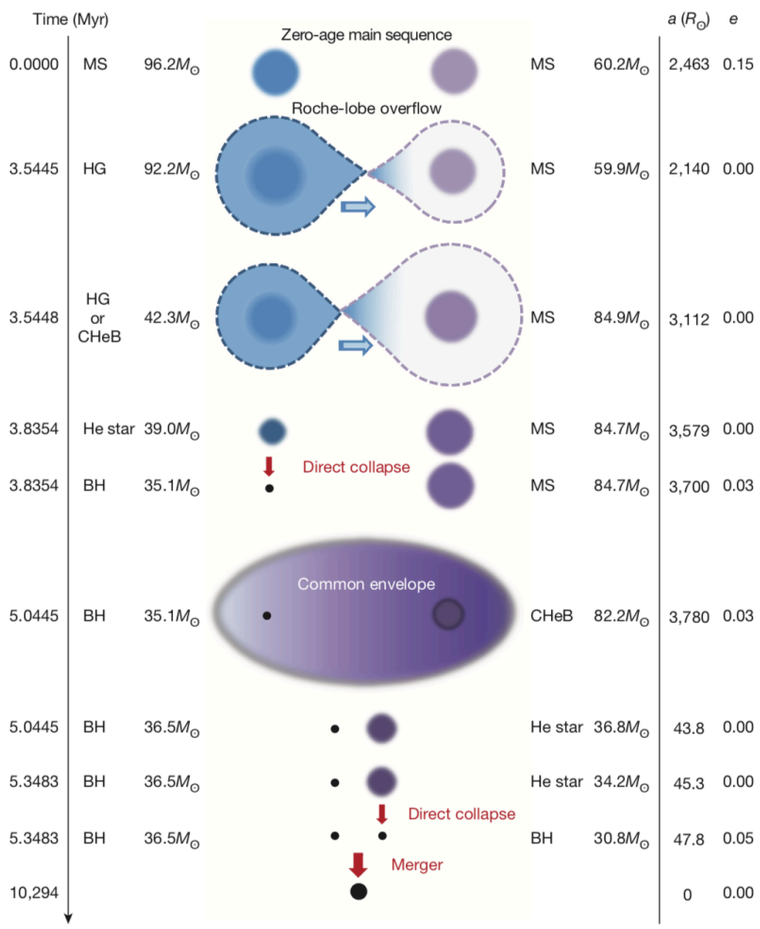


Abbott et al. (2016)

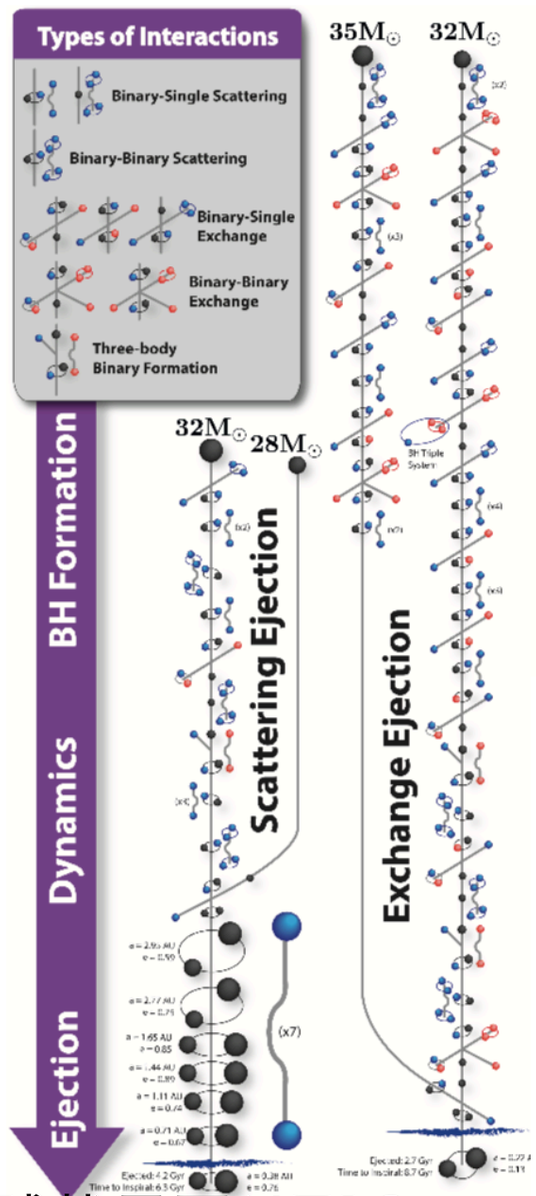


Credit: LIGO-Virgo/Frank Elavsky/ Northwestern University

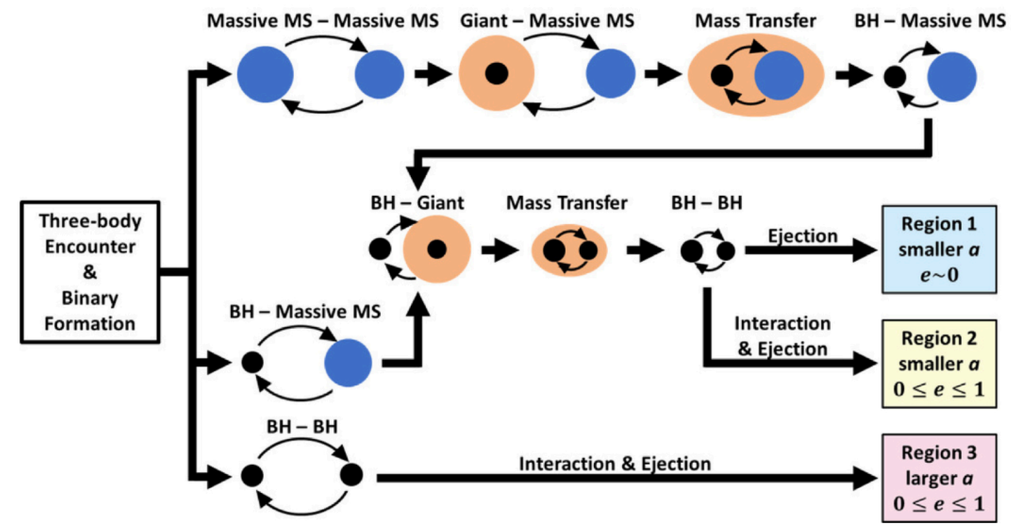
BH-BHの起源



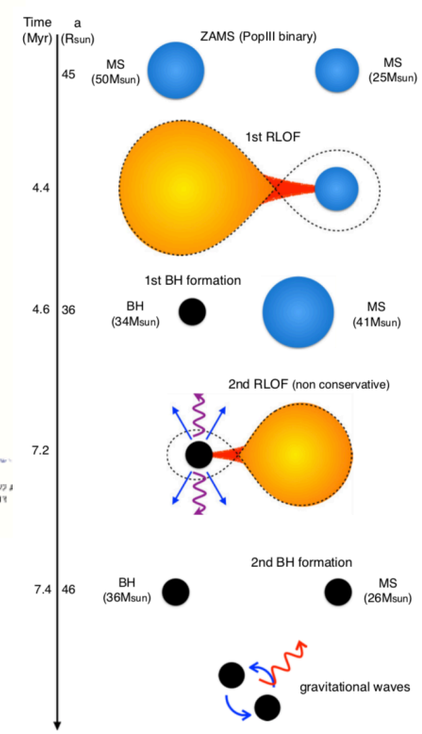
Pop. I/II 孤立連星(e.g. Belczynski et al. 2016)



球状星団(AT13; Rodriguez et al. 2016; Fujii+17)



散開星団 (Kumamoto et al. 2019; 鹿内発表W06a; 熊本発表W64a)

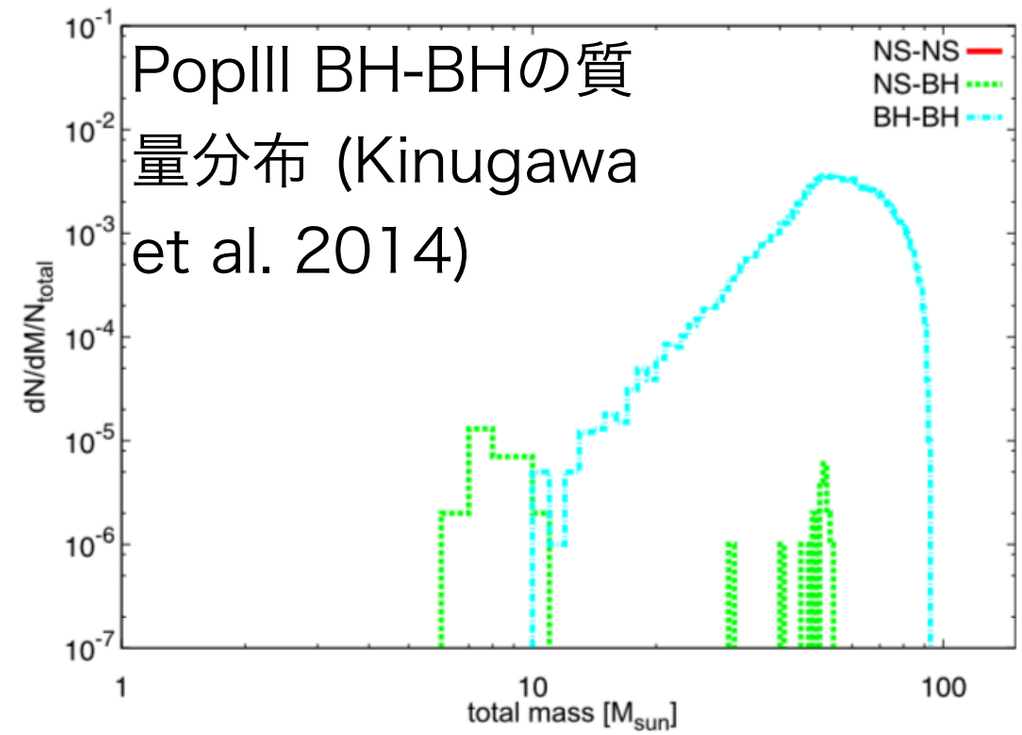


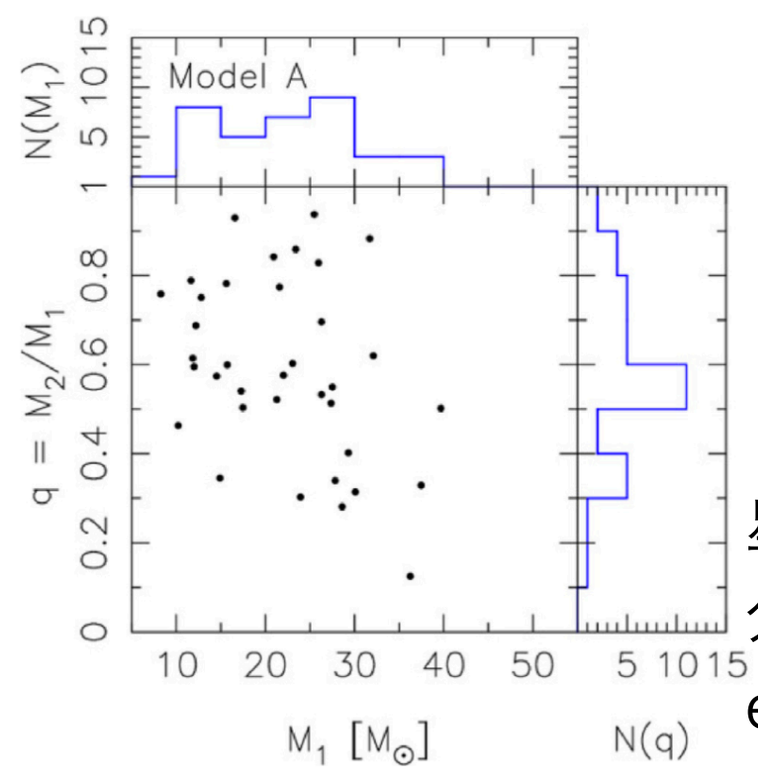
Pop. III 孤立連星 (Kinugawa et al. 2014; Inayoshi et al. 2017)

- 原始BH起源
- 銀河中心星団起源
- など

種族合成計算・星団進化計算

- 種族合成計算：多数の連星 ($\sim 10^6$)の進化を追跡
- 星団進化計算：多数の星・連星 ($\sim 10^3 - 10^6$)の進化とその軌道進化を追跡 (吉成W65a)
- BH-BHの統計量を導出
  - 合体率
  - 合体時間分布
  - 質量，スピン，離心率分布
- 観測と比較しシナリオの検証



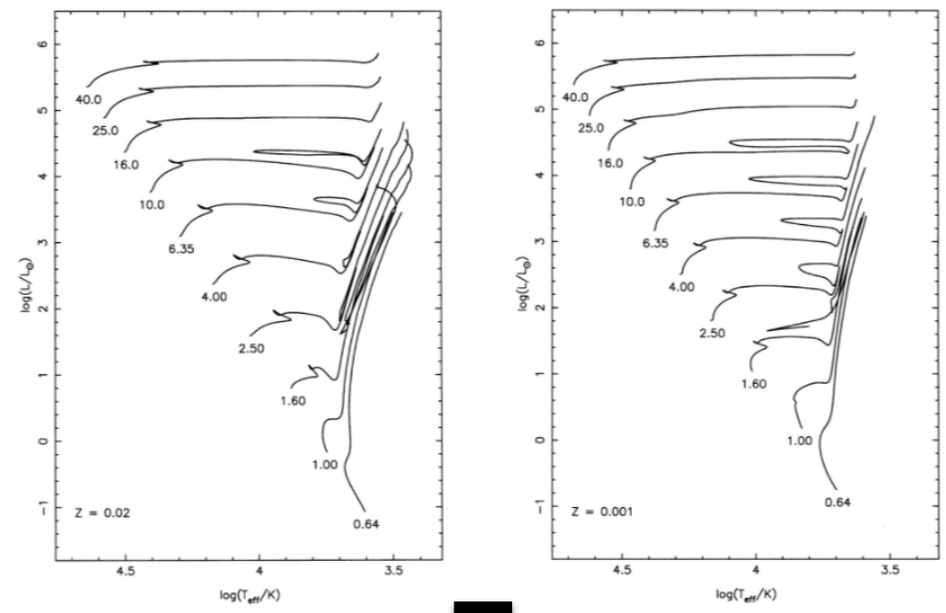


星団BH-BHの質量分布 (Kumamoto et al. 2019)

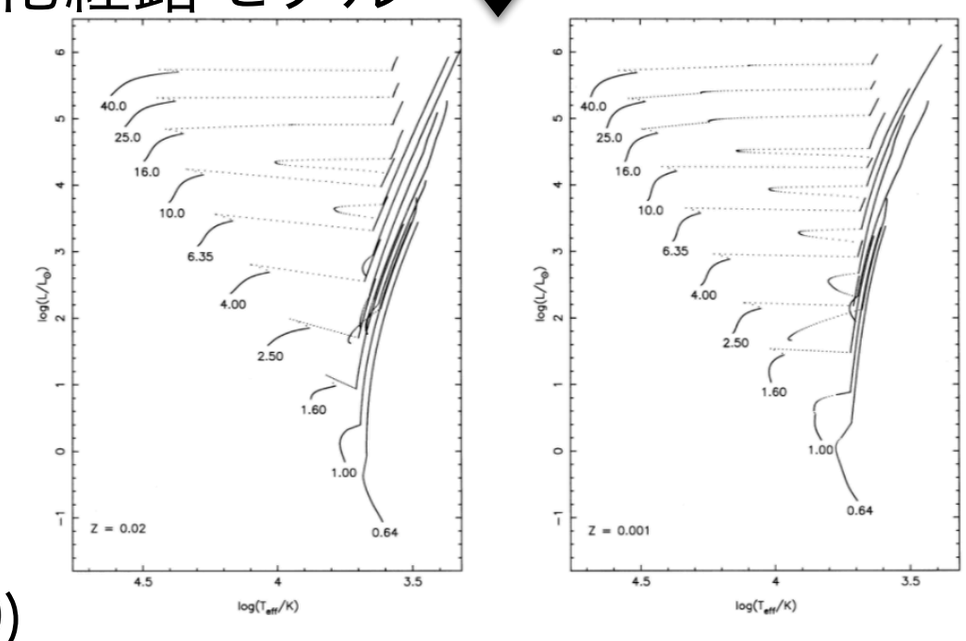
恒星進化経路モデル

- 多数の星(~ 10^6)の進化を追跡する必要あり
- １つ１つの星の進化を流体計算で解くのは時間がかかりすぎる
- あらかじめ星の進化を解いておき単純なフィッティング式を用いて星の進化をモデル化

流体計算結果



恒星進化経路モデル



MS光度

$$\log\frac{L_{\rm MS}(t)}{L_{\rm ZAMS}} = \alpha_L\tau + \beta_L\tau^{\eta} + \left(\log\frac{L_{\rm TMS}}{L_{\rm ZAMS}} - \alpha_L - \beta_L\right)\tau^2 - \Delta L(\tau_1^2 - \tau_2^2)$$

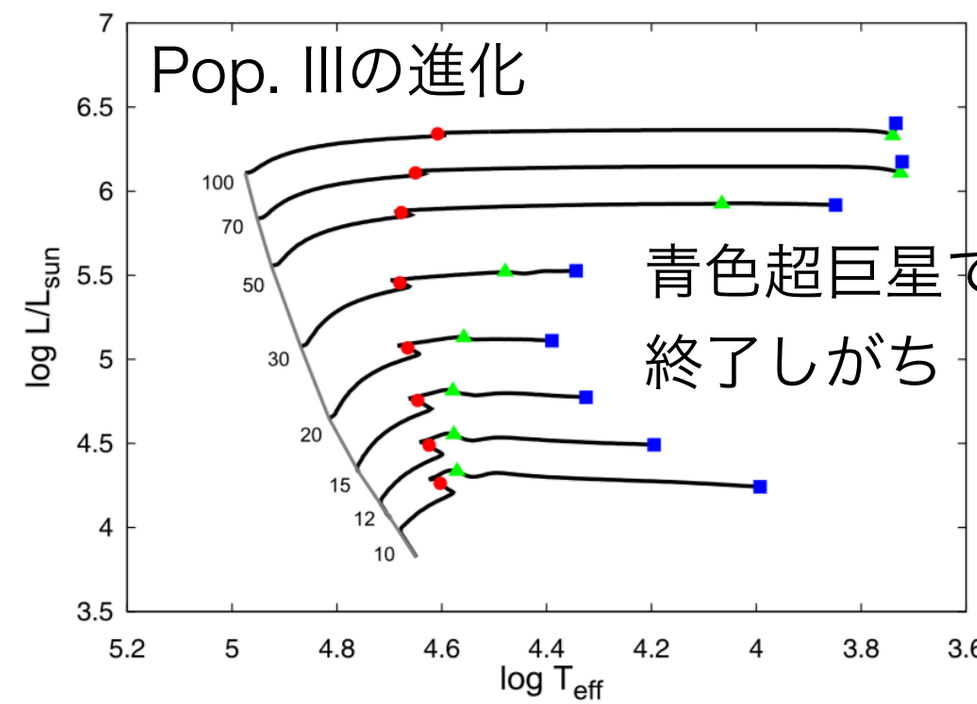
MS半径

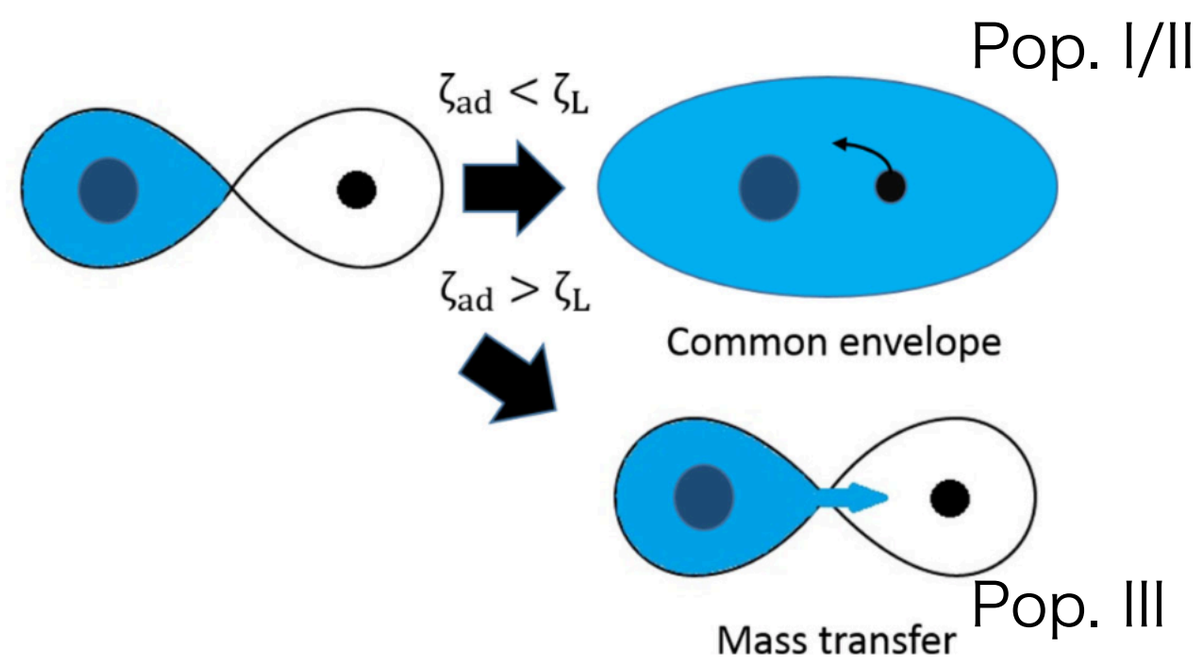
$$\log\frac{R_{\rm MS}(t)}{R_{\rm ZAMS}} = \alpha_R\tau + \beta_R\tau^{10} + \gamma\tau^{40} + \left(\log\frac{R_{\rm TMS}}{R_{\rm ZAMS}} - \alpha_R - \beta_R - \gamma\right)\tau^3 - \Delta R(\tau_1^3 - \tau_2^3),$$

Hurley et al. (2000)

超低金属量星

- 既存の恒星進化経路モデル
  - $10^{-3} \lesssim Z/Z_\odot \lesssim 1$ (Hurley+00; Bressan+12; etc.)
  - $Z/Z_\odot = 0$ (Kinugawa+14)
- Pop. I/IIとPop. IIIの違い
  - IMF
  - 質量輸送過程の安定性
- Pop. IIIとPop. I/IIのギャップを埋める恒星進化経路モデルが必要

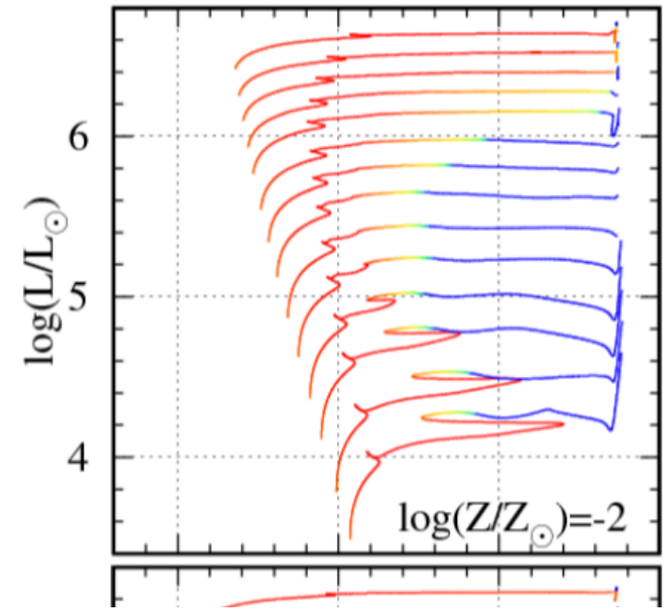


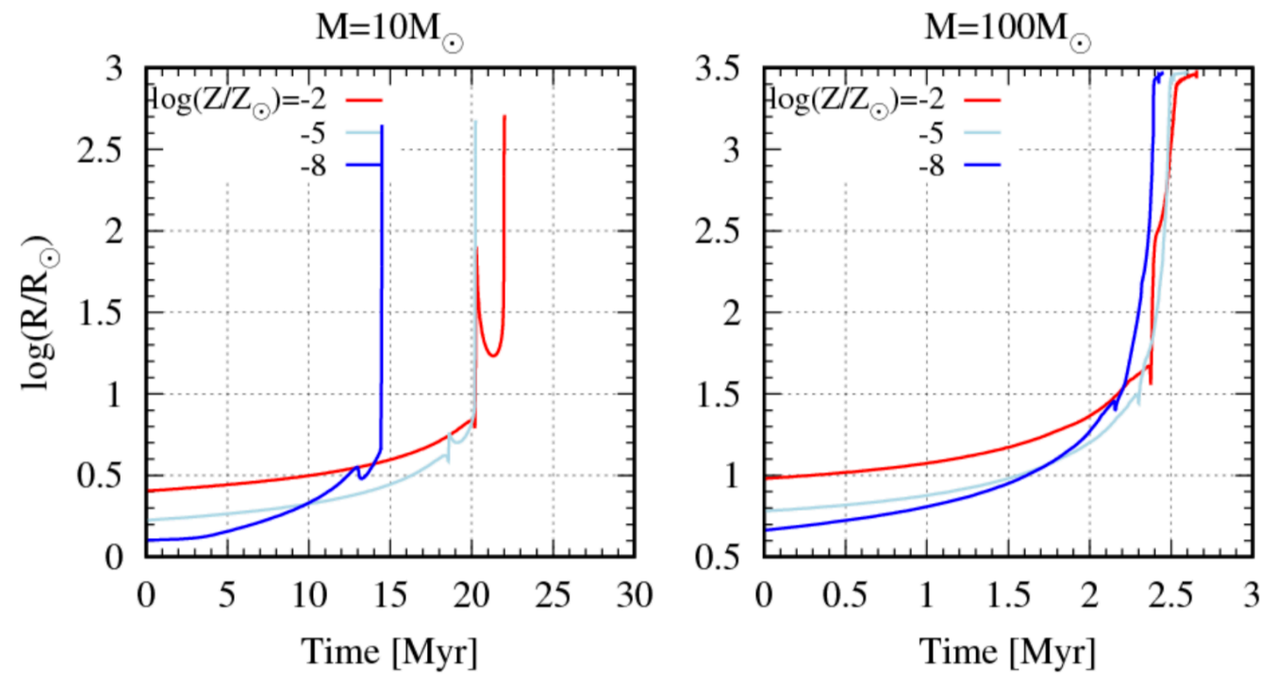


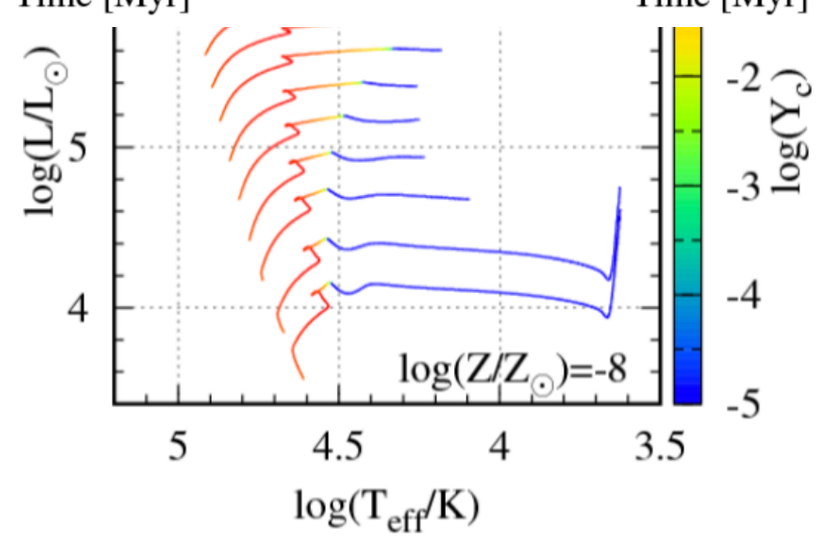
Kinugawa et al. (2014)

恒星進化計算

- 方法
  - HOSHIコード(Takahashi+16; 18)による１次元流体計算 (Yoshida+19)
  - Convective instability
  - Convective overshoot
  - 恒星風なし (post-process的に考慮するため)
- 初期条件
  - $M/M_\odot = 8 - 160$
  - $\log(Z/Z_\odot) = -2, -4, -5, -6, -8$
- 金属量依存性（金属量が減ると）
  - 青色超巨星で終わる範囲が増加
  - ブルーループのない範囲が増加（ブルーループ自体も縮小）
  - ヘルツシュプラング・ギャップ(HG)のない範囲が増加（(HG自体も縮小)



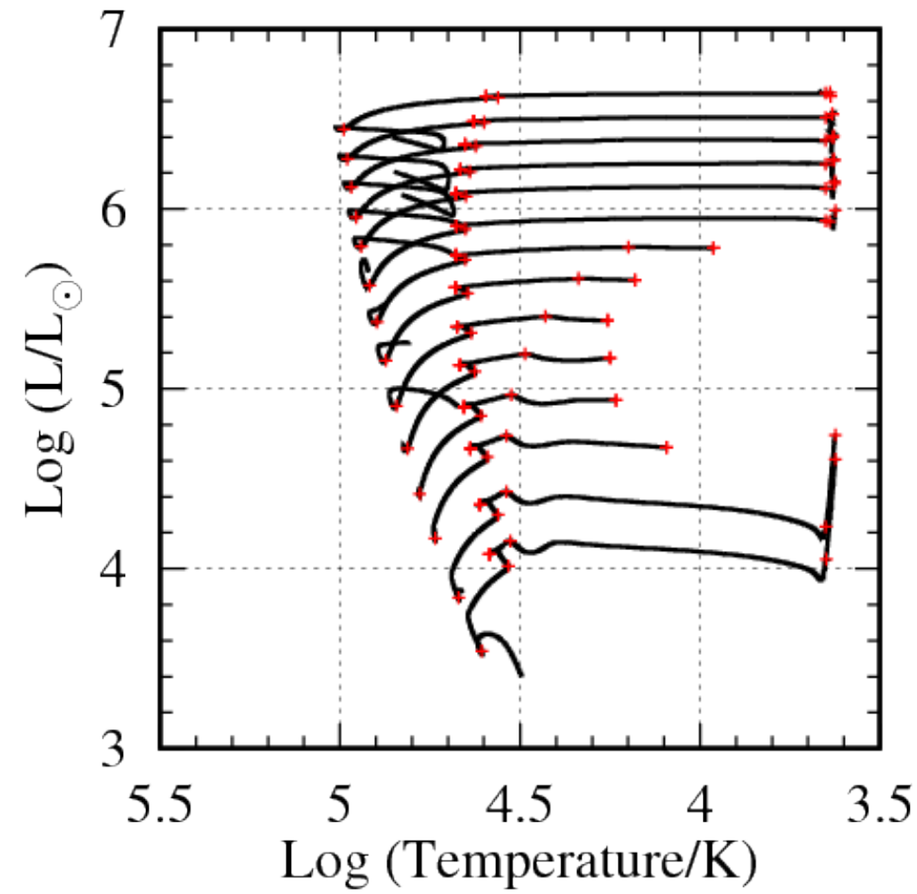




Tanikawa et al. (2019, arXiv:1906.06641)

データのモデル化

- 金属量ごとのR, L, $M_{C,He}$のフィッティング式を作成
- 恒星進化をMS, HG, CHeB, ShHeB, BH/NSフェイズに分割
- HGの起こる上限質量などを各金属量ごとに設定
- フィッティング式
  - 各フェイズの始点終点のR, L, $M_{C,He}$のフィッティング式を質量関数として作成
  - 始点終点のR, L, $M_{C,He}$を簡単なフィッティング式で接続



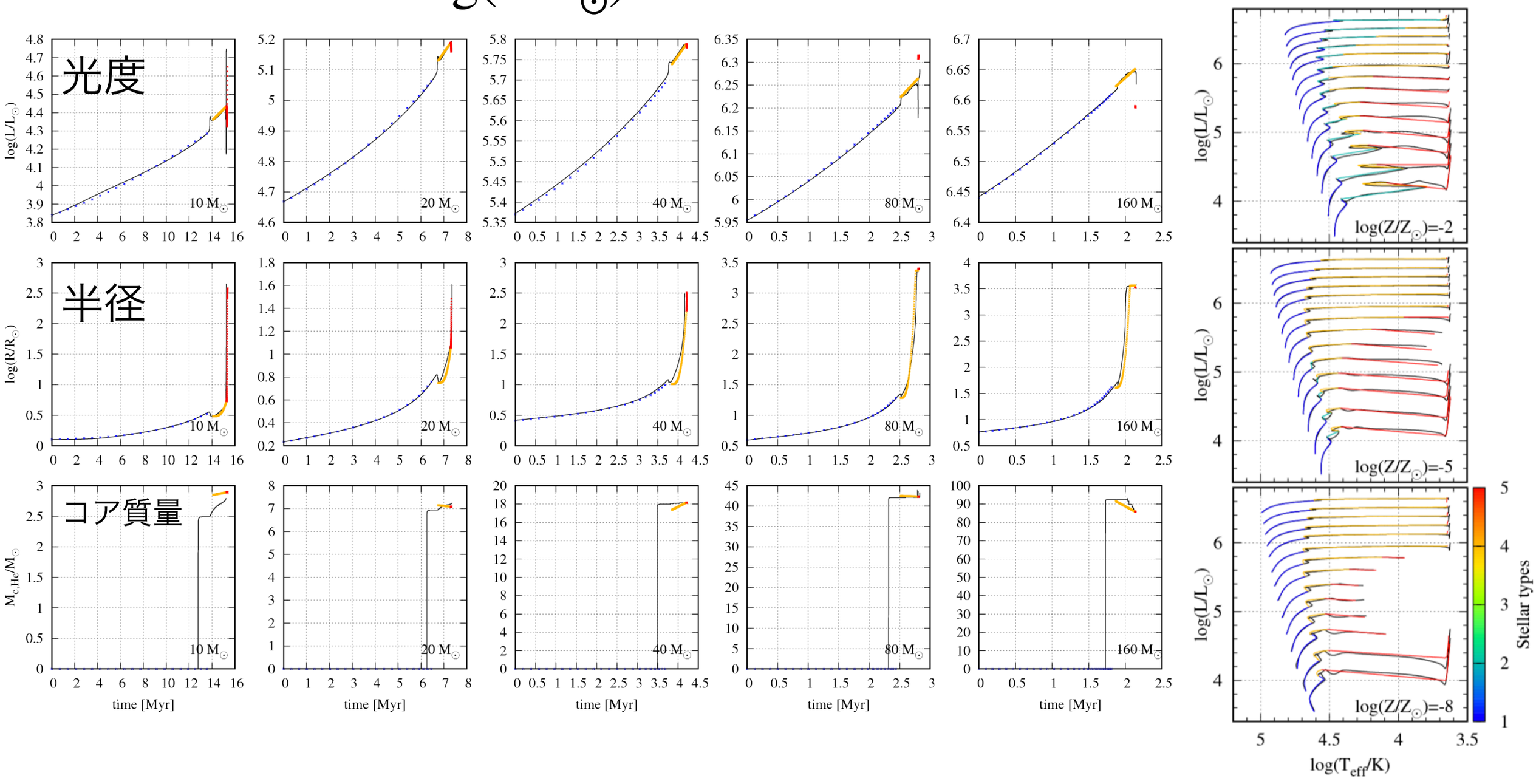
$$\hat{L}_{\rm CHeB} = \hat{L}_{\rm HeI} + \lambda \left(\hat{L}_{\rm ECHeB} - \hat{L}_{\rm HeI} \right),$$

$$\lambda = \tau_{\rm CHeB}^{\xi},$$

$$\xi = \min\left[2.5, \max\left(0.4, R_{\rm min}/R_{\rm HeI}\right)\right].$$

恒星進化計算との比較

$\log(Z/Z_\odot) = -8$



Tanikawa et al. (2019, arXiv:1906.06641)

今後の方針

- 本進化経路モデルを載せたBSE, NBODY4, NBODY6の公開（2020年半ばを目安）

- 各Zに対し$0.1M_\odot \lesssim M \lesssim 10^3 M_\odot$まで進化経路を拡張

  - $Z \sim 10^{-2}$で$M \sim 10^3 M_\odot$程度まで

  - $Z \sim 0$で$M \sim 0.1 M_\odot$程度まで

  - なにか面白いアイデアがあれば谷川まで

まとめ

- BH-BHの起源を明らかにするには種族合成計算や星団進化計算を行って統計量を出すことが必要

- これらの計算には恒星進化経路モデルが必要

- 金属量$\log(Z/Z_\odot) = -2, -4, -5, -6, -8$の質量$8 \leq M/M_\odot \leq 160$に対し恒星進化経路モデルを作成

- 2020年半ばに公開予定（いくつかの拡張を含む）