

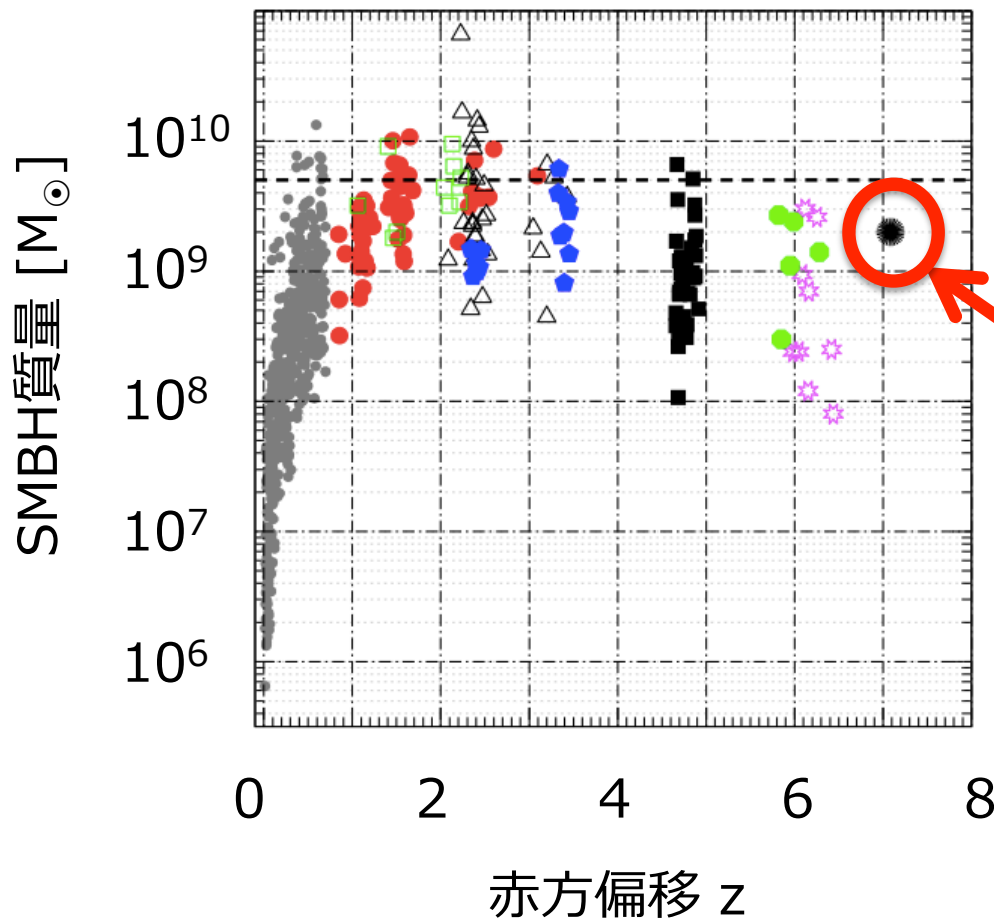
平成27年1月19日（月） - 21日（水）
初代星研究会@東北大

初期宇宙における超大質量星 形成の数値計算

東京大学 宇宙理論研究室 吉田研M2 櫻井祐也
共同研究者：細川隆史、吉田直紀

宇宙年齢10億年以前におけるSMBHの存在

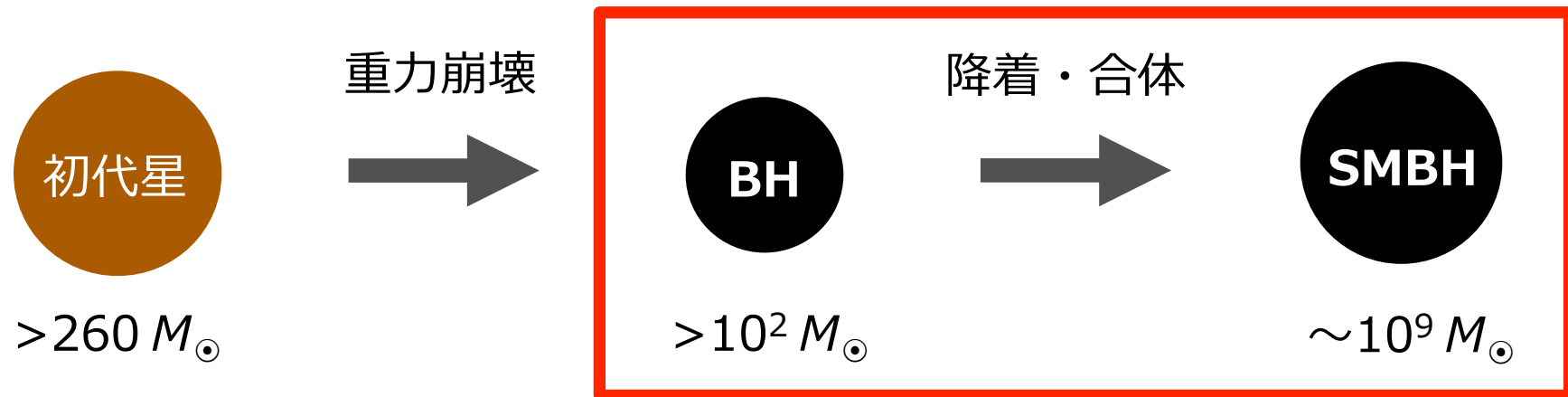
- 遠方宇宙の観測で宇宙10億歳 ($z \sim 6$) 未満で 10 億 M_{\odot} 程度以上の活動銀河核中のSMBHの存在を確認



URAS J1120+0641
 $\sim 2 \times 10^9 M_{\odot}$
宇宙7.5億歳 ($z \sim 7$)
Mortlock et al. (2011)

Marziani & Sulentic (2012)

通常の初代星からSMBHを形成するモデル



成長時間や降着速度に問題あり

BH質量 M は $M = M_{\text{ini}} \exp(t/t_{\text{acc}})$

$$t_{\text{acc}} = (4.4 \times 10^7 \text{ yr}) \left(\frac{\dot{m}_{\text{E}}}{\dot{m}} \right)$$

輻射効率 $\epsilon = 0.1$

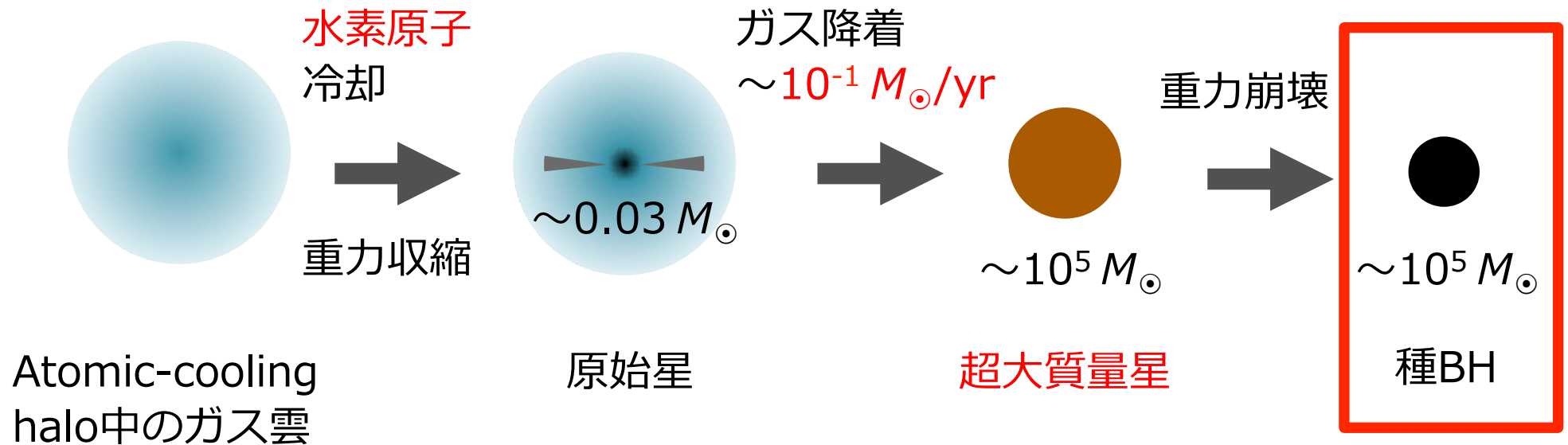
組成：水素約75%、ヘリウム約25%

エディントン降着 ($\dot{m} = \dot{m}_{\text{E}}$) で $10^2 M_{\odot}$ から $2 \times 10^9 M_{\odot}$ になるまでの時間は

$$t = t_{\text{acc}} \ln(M_{\text{fin}}/M_{\text{ini}}) = 0.74 \text{ Gyr} > (z=20 \text{ から } z=7 \text{ までの時間})$$

さらにエディントン降着を維持できるとは限らない

Direct Collapseモデル



他銀河に存在する多くの初代星からの紫外線により水素分子解離
→水素分子冷却抑制

Atomic-cooling halo
形成

$$T_{\text{vir}} > 10^4 \text{ K}$$

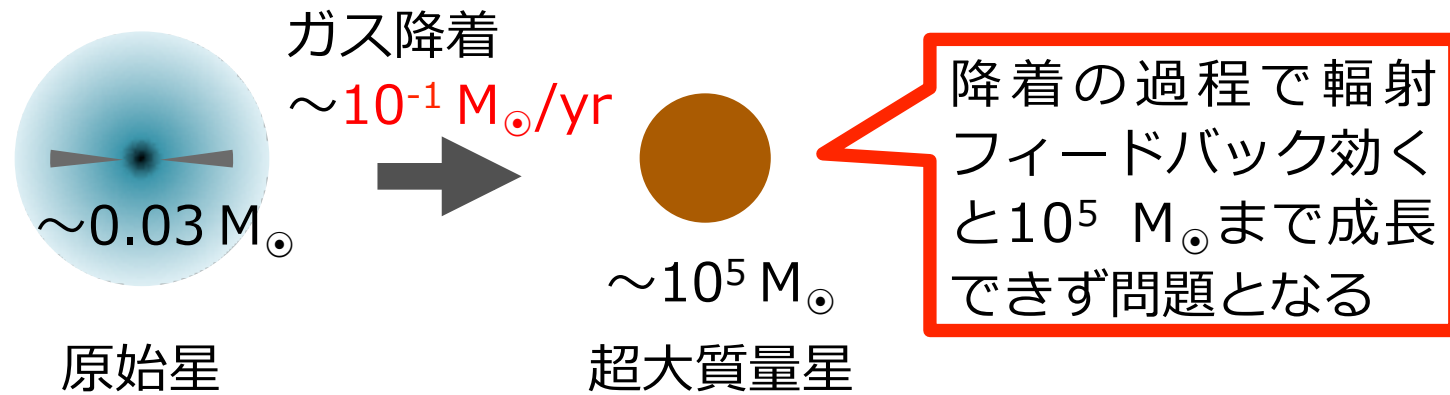
$$\dot{M} \gtrsim 2 \times 10^{-1} M_{\odot}/\text{yr}$$

通常の初代星形成では
典型的に $10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$

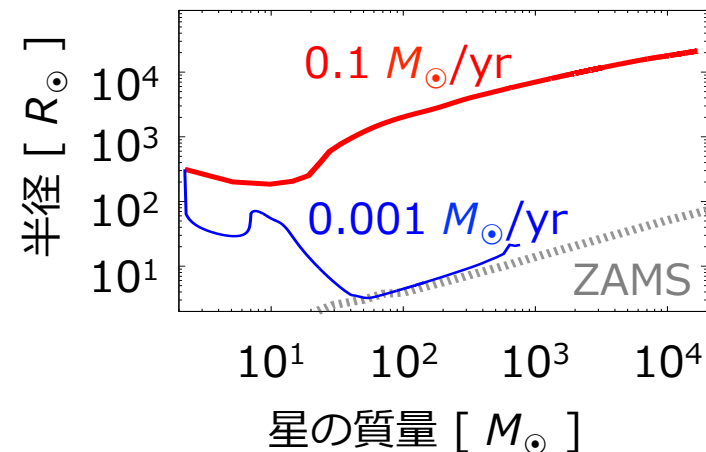
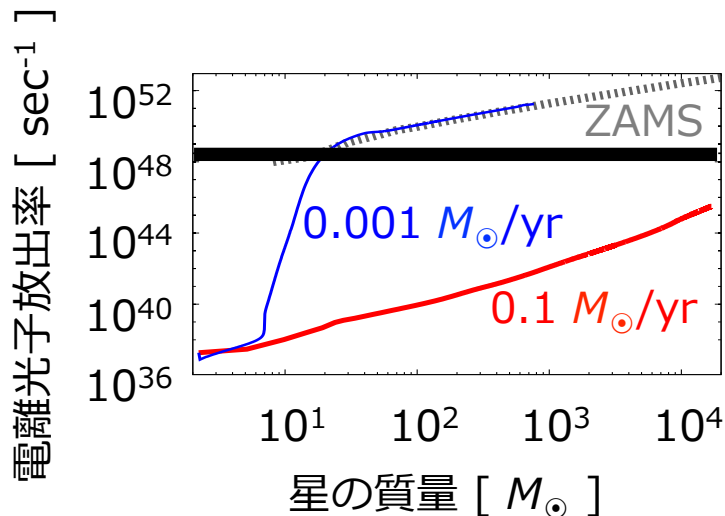
より大きな種BHから
成長させるので成長
時間の問題起きにくい

Direct Collapseモデルにおける輻射フィードバック

- 通常の初代星形成では降着段階で輻射フィードバック効く
- Direct collapseモデルでもフィードバック効く可能性あり

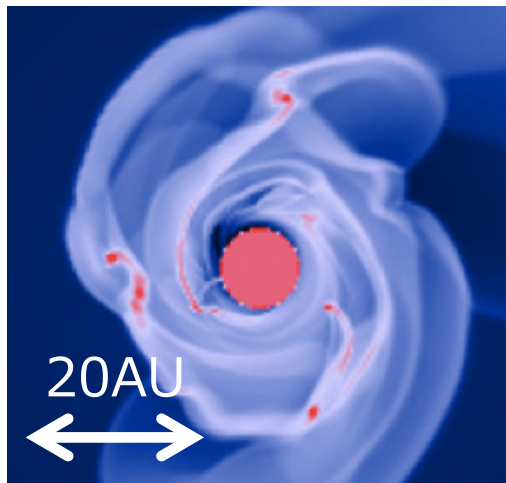


- 降着率一定で $\sim 0.04 M_{\odot}/\text{yr}$ 以上ではフィードバックは重要でない (Hosokawa et al. 2012、2013)

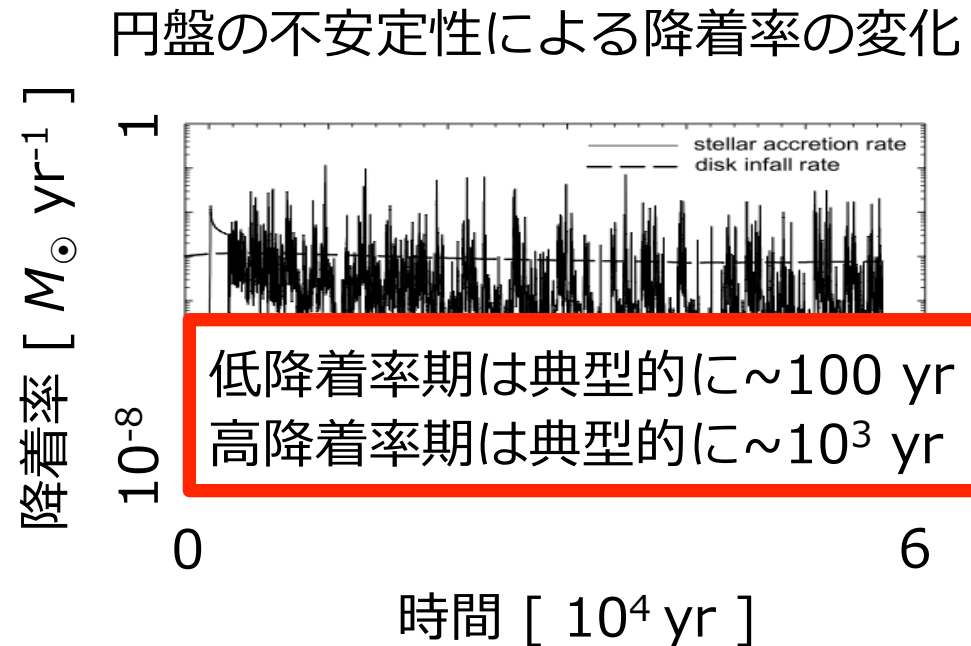


降着率が変動する場合：バースト降着

- バースト降着：円盤が分裂、分裂片が星に落ち込み起きる
- バースト降着が起きることは現在の星形成でも通常の初代星形成でも2次元シミュレーションにより確認されている



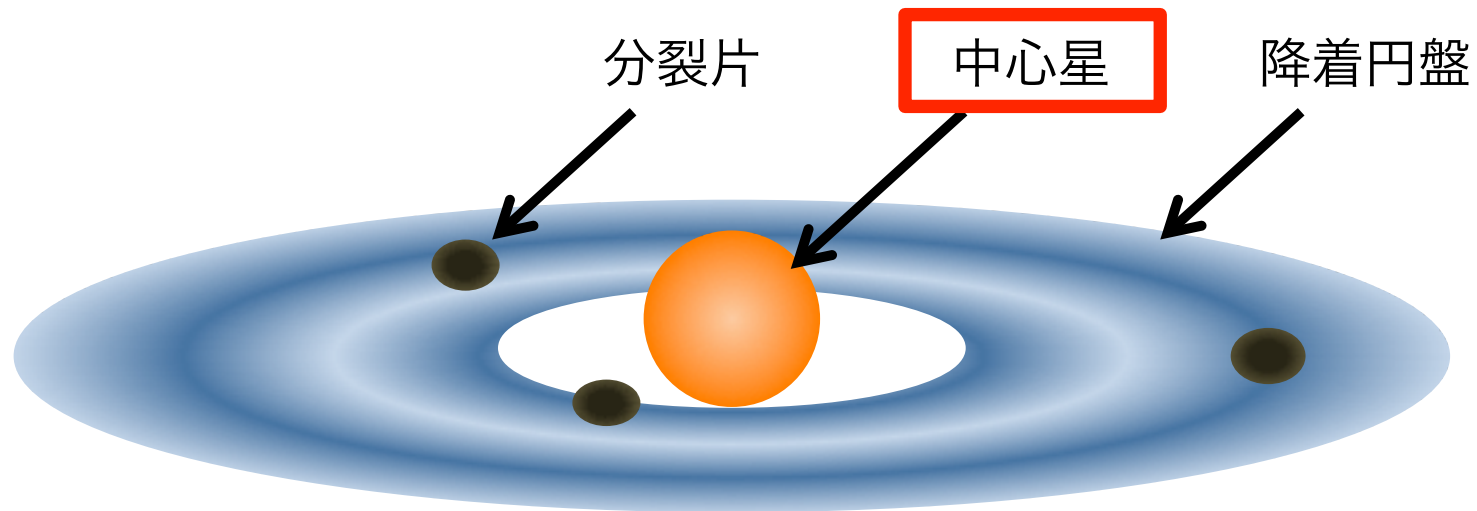
Vorobyov et al. 2013



- Atomic-cooling halo中の星形成で円盤の分裂が起きることは3次元流体シミュレーションにより示されている(Regan et al. 2014)

本研究の主な目的・考える状況

- バースト降着の場合での星進化計算でどのような場合に輻射フィードバックが効くかどうか明らかにする



- 計算では星の内部と大気のみを考える
- 分裂片の降着によるバースト降着は、降着率のモデルを作り、手で与えることで考慮する

数値計算コード (Stellar)

- 1次元の星の進化計算コード (Yorke氏作成、細川氏改良 & 提供) を使う、Henyeey法利用
- 星内部の進化を決める式を同時に解く
- 慣性項は星の表面付近以外で問題とならないので無視する

質量保存の式

$$\frac{\partial r}{\partial m} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

運動量保存の式

$$\cancel{\frac{1}{4\pi r^2} \frac{\partial^2 r}{\partial t^2}} = -\frac{\partial P}{\partial m} - \frac{Gm}{4\pi r^4}$$

エネルギー保存の式

$$\frac{\partial l}{\partial m} = E_{\text{nuc}} - c_P \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\delta}{\rho} \frac{\partial P}{\partial t}$$

エネルギー輸送の式

$$\frac{\partial T}{\partial m} = -\frac{GmT}{4\pi r^4 P} \nabla$$

輻射優勢なら

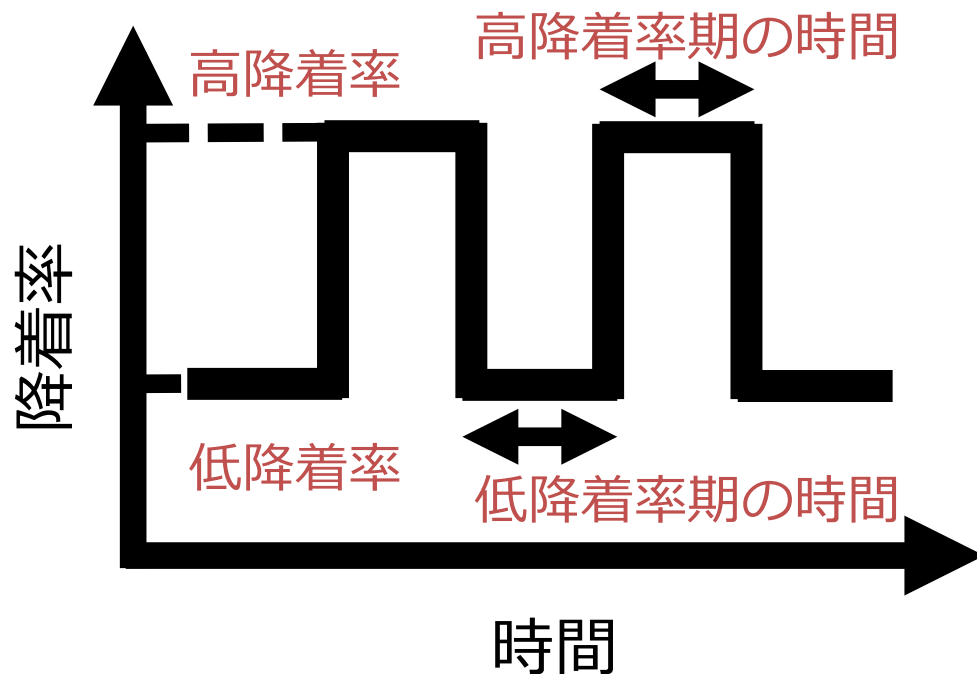
$$\nabla_{\text{rad}} = \frac{3}{16\pi acG} \frac{\kappa l P}{m T^4}$$

物質の組成変化の式

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = \frac{m_i}{\rho} \left(\sum_j r_{ji} - \sum_k r_{ik} \right), \quad i = 1, \dots, I$$

バースト降着のモデル化

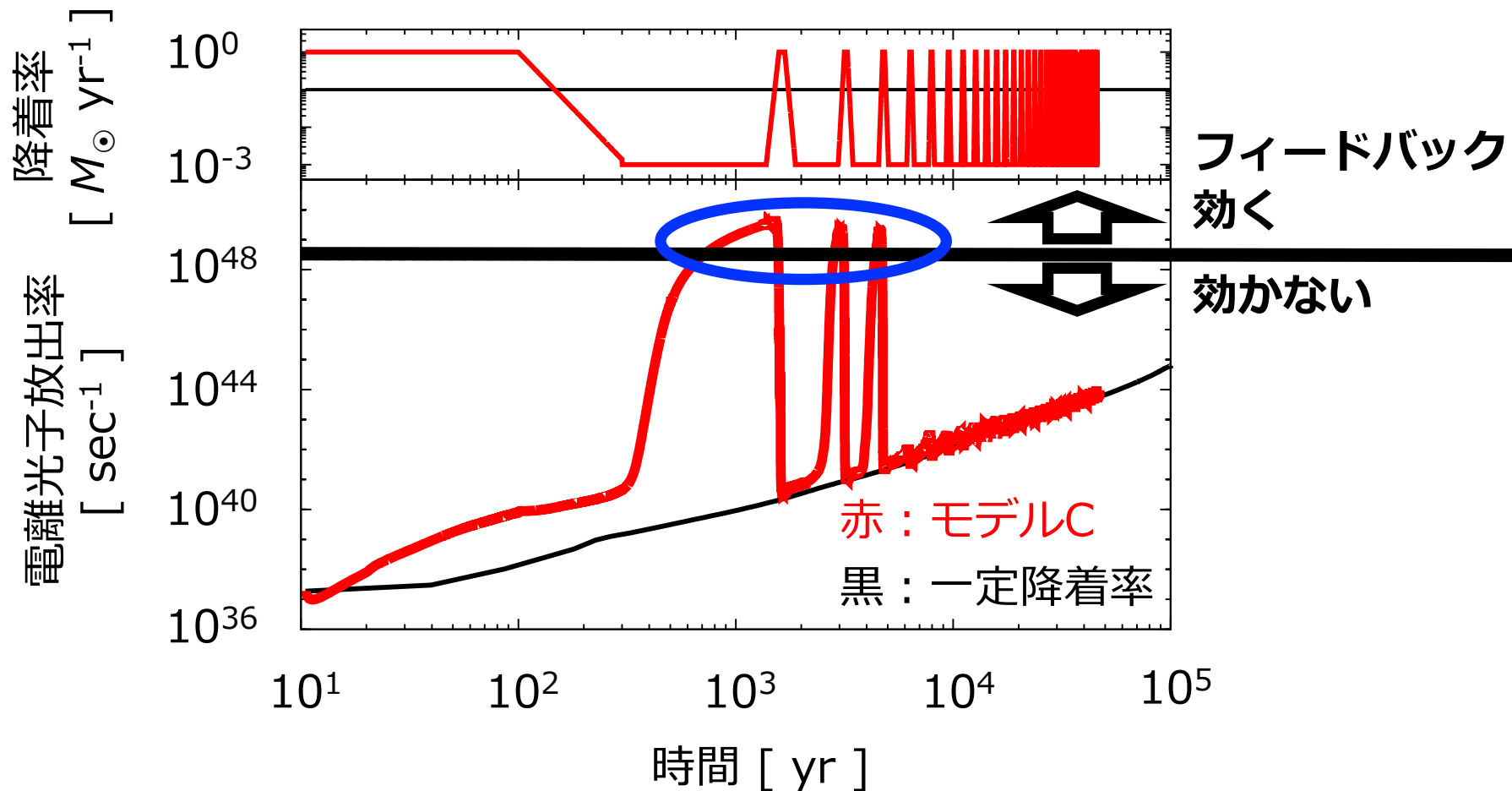
- 主に4つのパラメータを設定（下図）
- 平均降着率はatomic-cooling halo中の星形成降着段階を想定して $0.1 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ とする
- ここでは低降着率期が1080 yrのモデルCに着目して説明する



| モデル名 | A | B | C | D |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 高降着率の期間 [yr] | 25 | 50 | 100 | 500 |
| 低降着率の期間 [yr] | 270 | 540 | 1080 | 5400 |
| 高降着率 [M_{\odot}/yr] | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 低降着率 [M_{\odot}/yr] | 10^{-3} | 10^{-3} | 10^{-3} | 10^{-3} |
| 遷移時間 [yr] | 50 | 100 | 200 | 1000 |
| 輻射効率 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.01 |

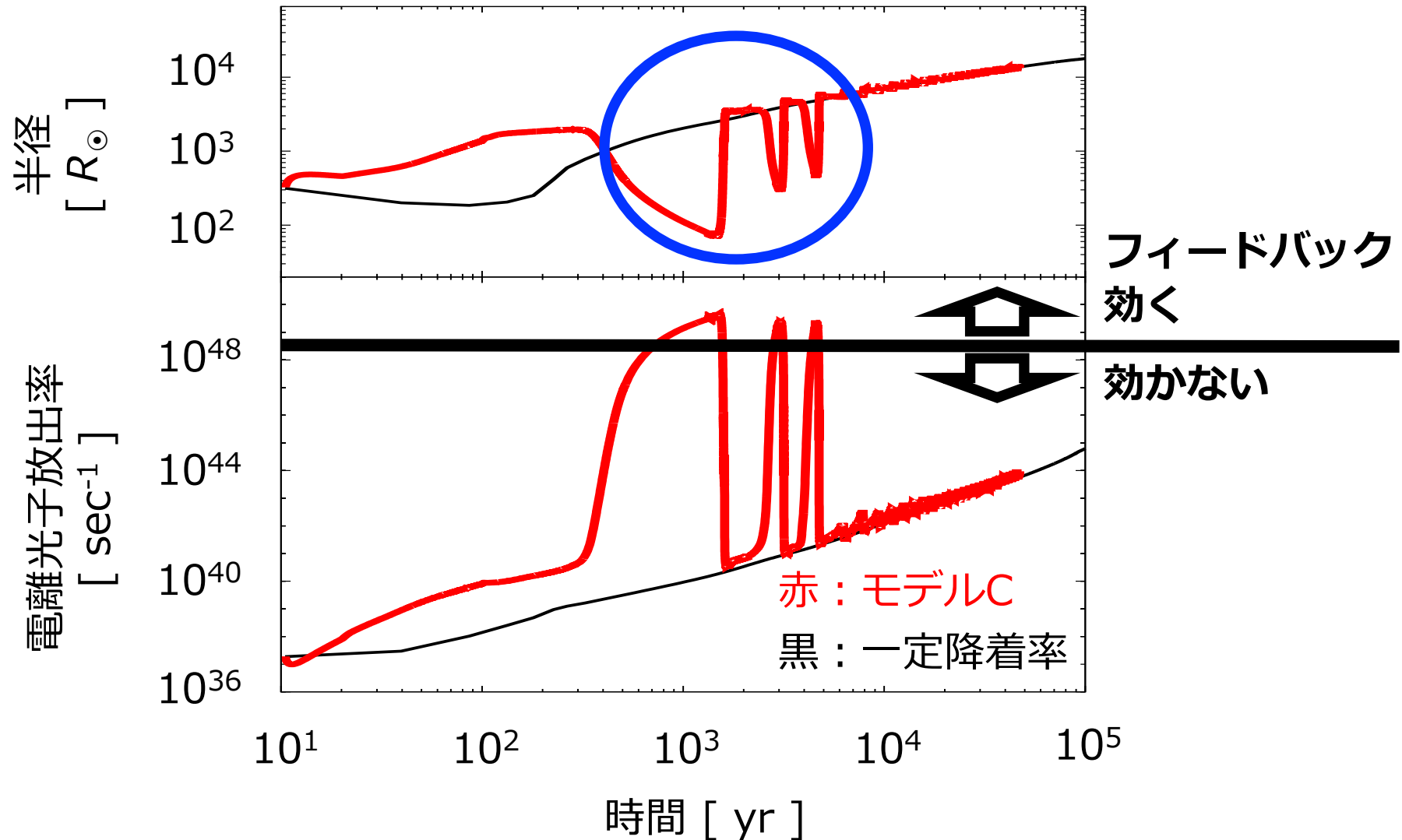
星の進化過程でのフィードバック

- バースト降着モデルCでは星の進化の過程で、低降着率期に輻射フィードバックが効く可能性がある



低降着率期に電離光子放出率が大きくなる理由

- 半径が縮み表面温度が上がるので電離格子放出率が大きくなる



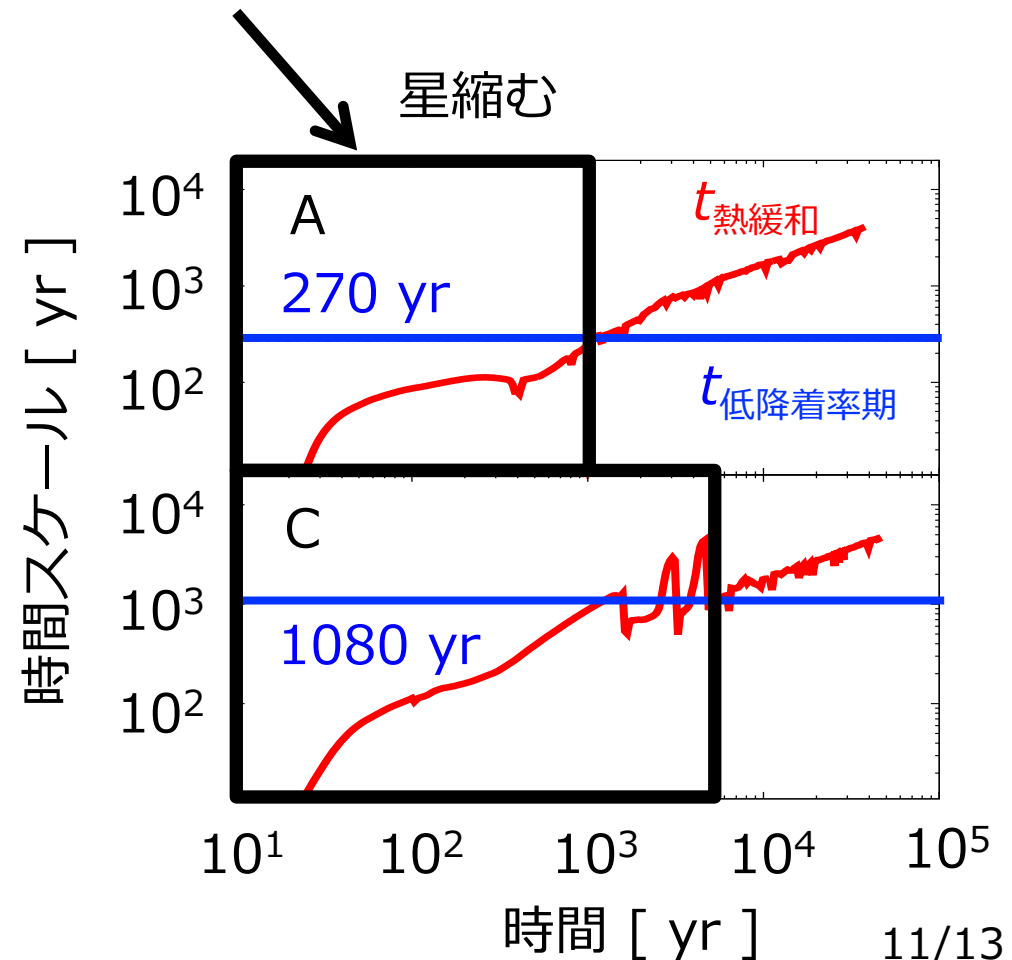
星が収縮する条件

- 星が熱緩和する時に星は収縮する
- これは式では

$$t_{\text{低降着率期}} > t_{\text{熱緩和}}$$

という条件

- $t_{\text{熱緩和}}$ は時間とともに大きくなる
- そのため $t_{\text{低降着率期}}$ が長いほど星が収縮するチャンスが多くフィードバックも効きやすい
- 計算により $t_{\text{低降着率期}} \sim 1000 \text{ yr}$ がフィードバック効く臨界値



現実の $t_{\text{低降着率期}}$ はどのくらいか？

- Inayoshi & Haiman (2014) によると、atomic-cooling halo中で、円盤の分裂片が出来てから中心星へ落ち込むまでの時間は最も長く見積もって

$$t_{\text{mig}} \sim 4 \times 10^3 \text{ yr}$$

- 分裂片が円盤中に複数あることを考えると、 $t_{\text{低降着率期}}$ はこの値よりずっと小さくなると考えられる
- その場合に輻射フィードバックが効くかどうかは自明でない
- 実際に $t_{\text{低降着率期}}$ がどのくらいになるか知るためには、多次元流体シミュレーションを行う必要がある

結論

- 一定降着率では $0.1 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ でフィードバックが効かない一方で、時間変動降着率の場合では低降着率期が $\sim 10^3$ yr以上でフィードバックが効く可能性があることが分かった
- 実際に $t_{\text{低降着率期}}$ がどのくらいになるか知るためには、多次元流体シミュレーションを行う必要がある