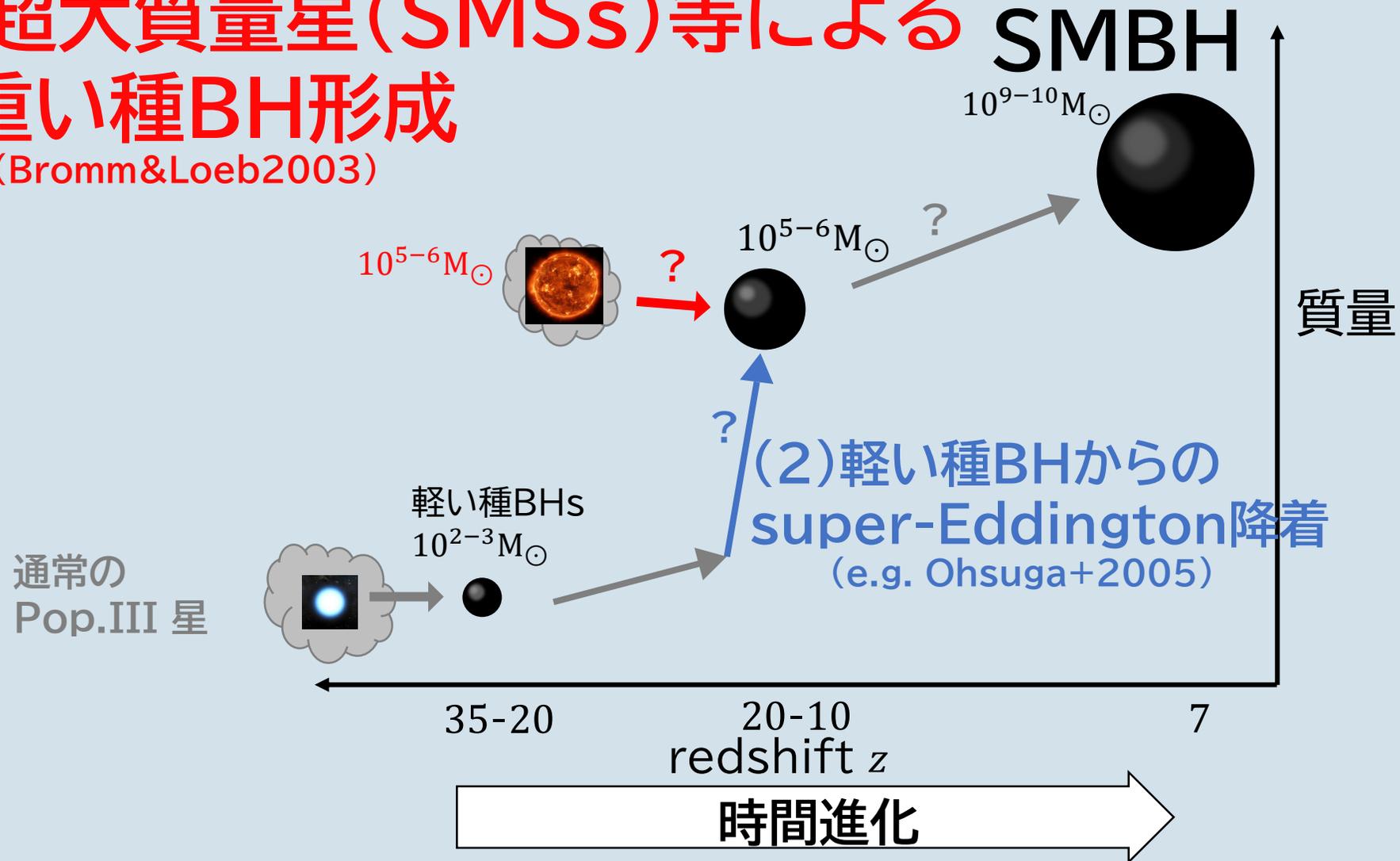
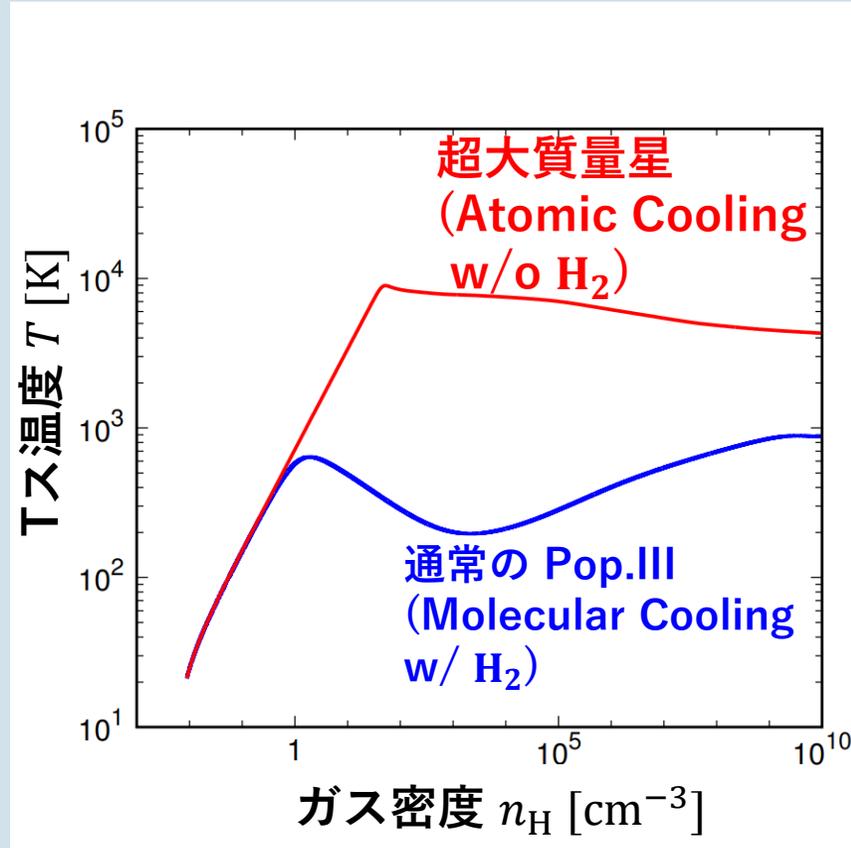


# SMBH と 重い種BH シナリオ

(1) 超大質量星 (SMSs) 等による  
重い種BH形成  
(Bromm&Loeb2003)



# 始原ガス(ゼロ金属量)からの星形成

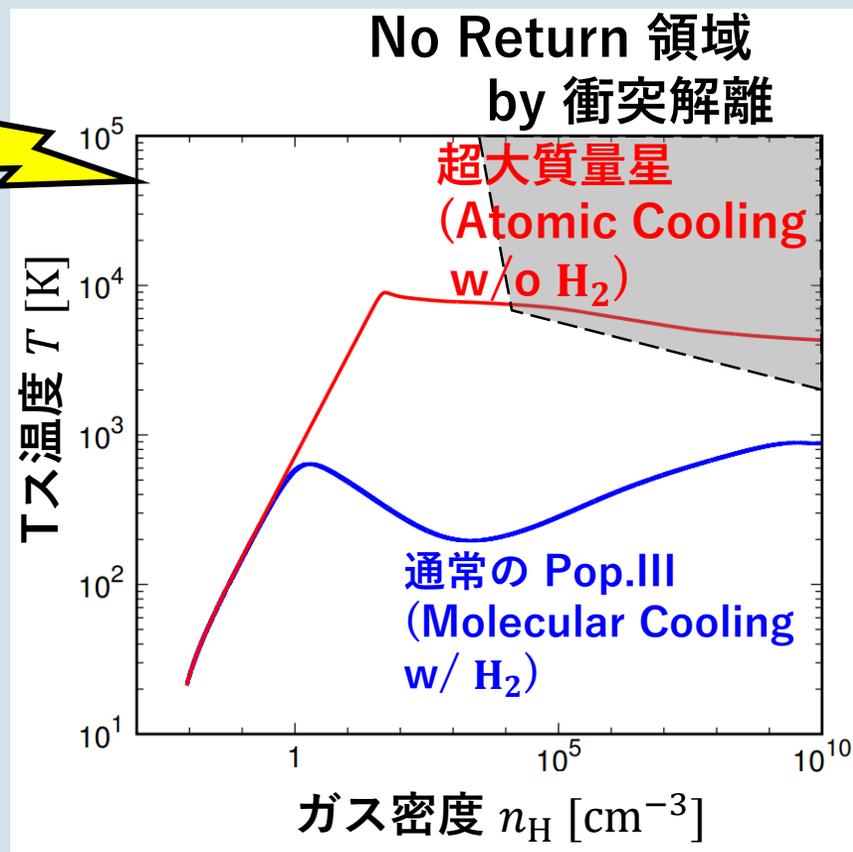


# H2分子の解離方法



## 光解離

(e.g. Omukai 2001,  
Bromm & Loeb 2003)

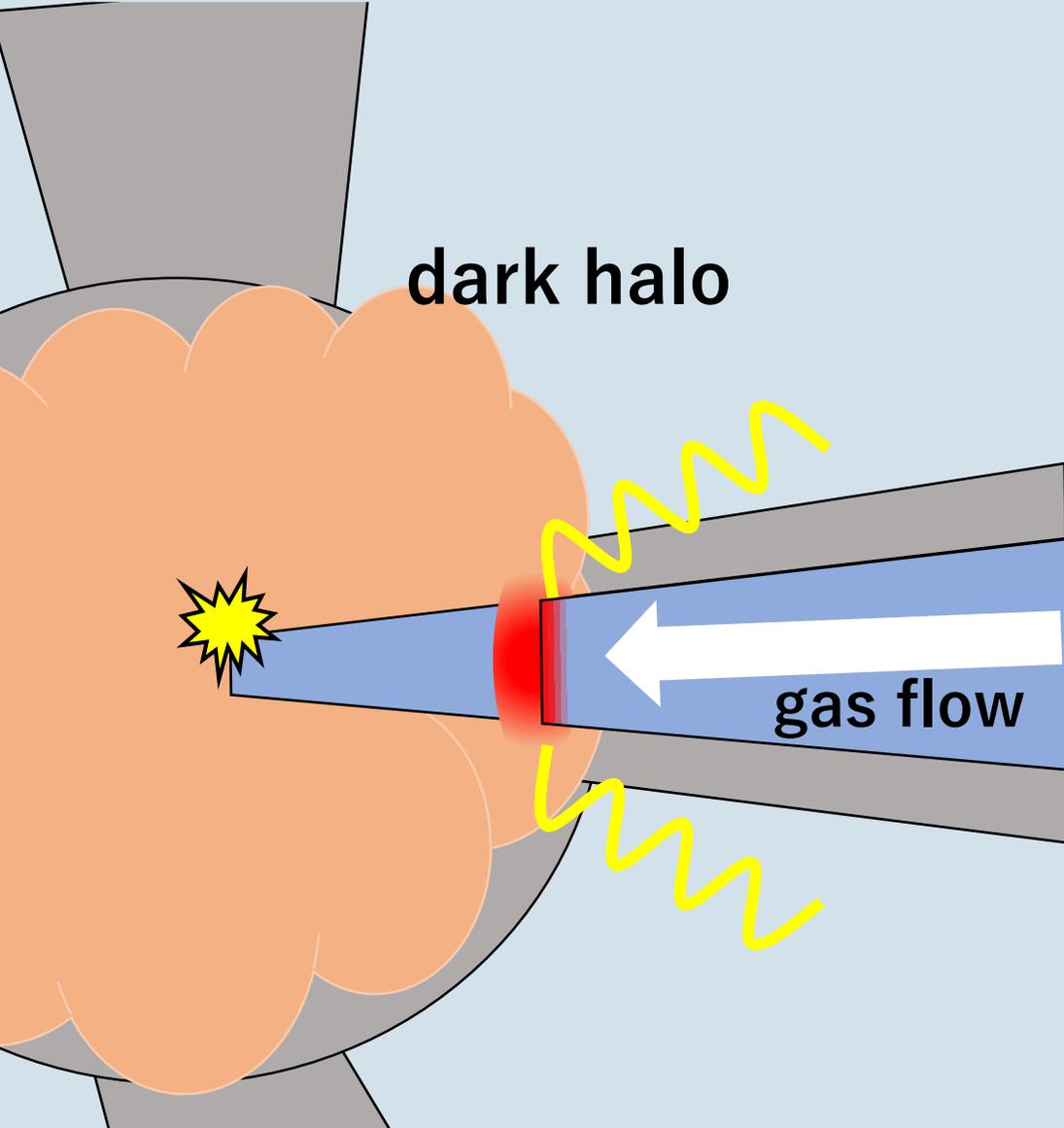


## 力学的なショック加熱 衝突解離



cold accretionにより高温高密ガスができて衝突解離が可能になる(?)  
(Inayoshi & Omukai 2012)

# cold accretion とは



dark halo

gas flow

ガスの  
(Ly $\alpha$ )冷却時間  $\ll$  落下時間  $r/v$

が満たされる場合

降着流がハローを貫通して  
ハロー中心へ流入する現象

low- $z$ の銀河進化研究では

$$M_{\text{halo}} \lesssim 10^{10-11} M_{\odot}$$

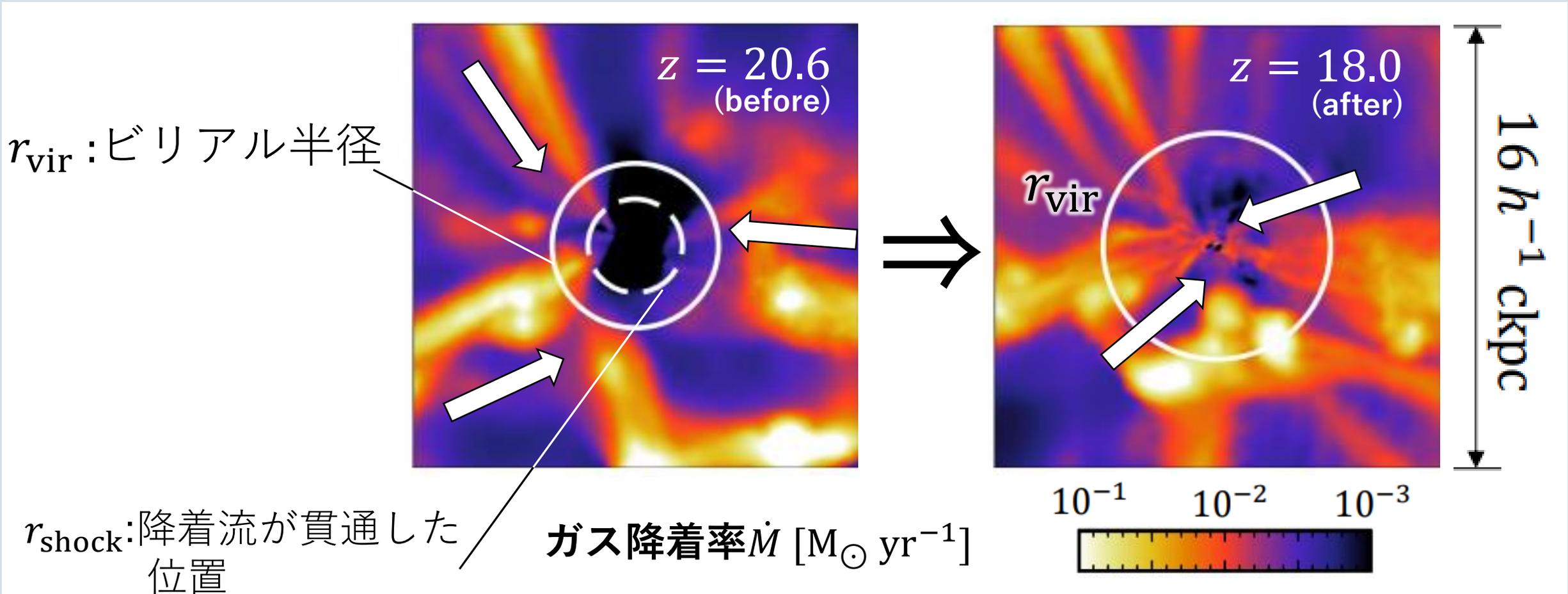
で起こることが知られる

(e.g. Birnboim & Dekel 2003)

# これまでの研究(Kiyuna+2023)

初期宇宙でもcold accretionが起こる? ⇒ ○

以下の図は  $z = 18.0, M_{\text{halo}} \simeq 10^7 M_{\odot}$  のケース



# これまでの研究(Kiyuna+2023)

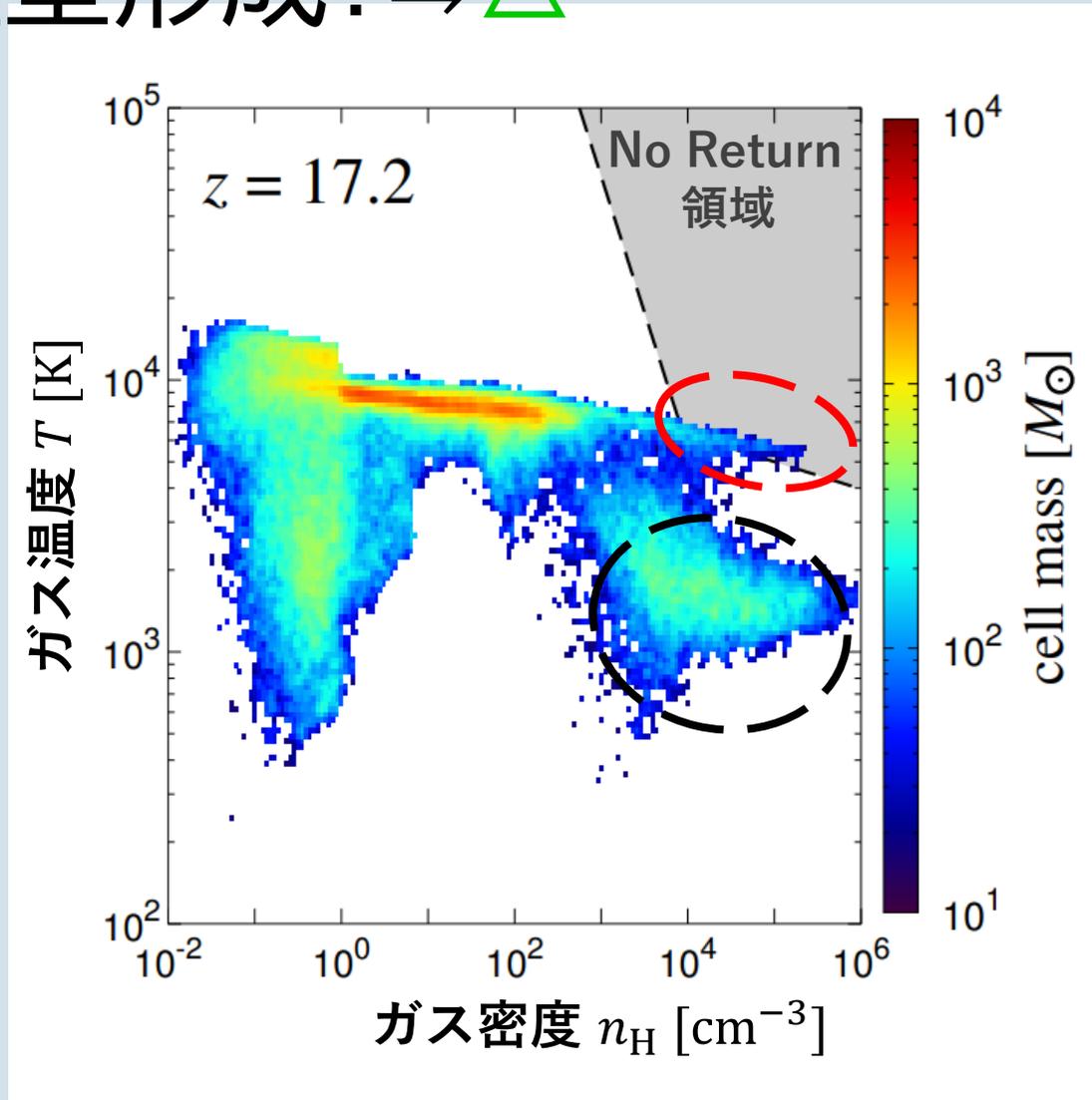
cold accretion で超大質量星形成?⇒△

**H<sub>2</sub>が衝突解離されたガスもあるが、  
質量でsub-dominant.**

衝突解離の効率は期待ほど良くなかった

H<sub>2</sub>が多い低温ガス ( $T \lesssim 10^3$  K)  
の質量がdominantで、  
**超大質量星は形成されず  
通常の Pop.III 星が形成.**

このようにできる星からの  
輻射フィードバックを考慮すれば  
超大質量星形成可能？



# 手法

これまでの宇宙論シミュレーションに**輻射フィードバックを追加**  
UVのH2自己遮蔽効果が重要となるので  
**流体と点光源からの輻射輸送をconsistentに解く**

## 計算法

コード: N-body+SPH“Gadget-3”(Springel 2005)  
+RT (Susa 2006, Chon & Latif 2017)

計算領域:  $(1 h^{-1} \text{cMpc})^3$

解像度:  $m_{\text{br}} \sim 10 h^{-1} M_{\odot}$  ( $\lambda \sim 0.1 \text{pc}$ )

sink形成条件:  $n_{\text{H}} \geq 10^8 \text{cm}^{-3}$

LW 背景強度:  $J_{21} = 10$

**sink(星)粒子からの輻射フィードバック:**

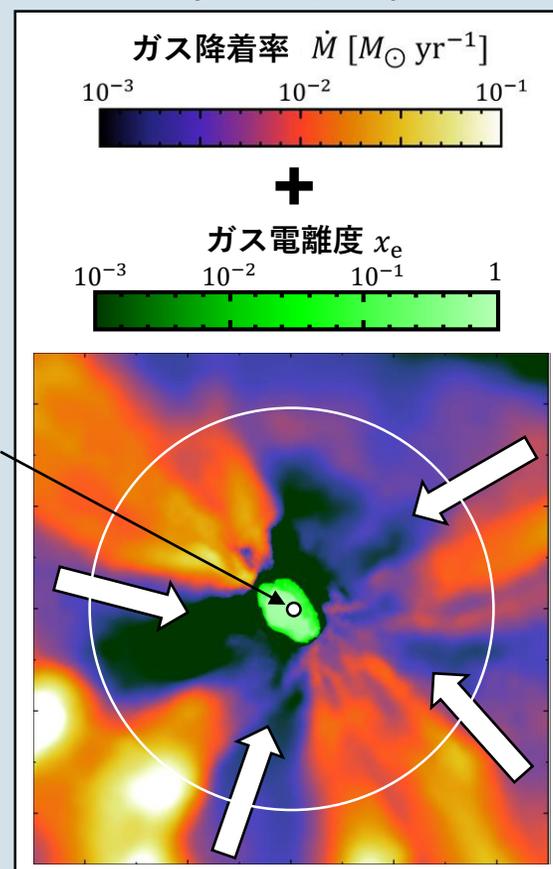
光度はEddington  $L(m) = 1.2 \times 10^{38} \text{erg s}^{-1} (m/1M_{\odot})$

質量降着率に応じて, 有効温度  $T_{\text{eff}} = 5000, 3 \times 10^4, 10^5 \text{K}$ .

通常の Pop.III

Pop.III 星,  
超大質量星を  
mimic

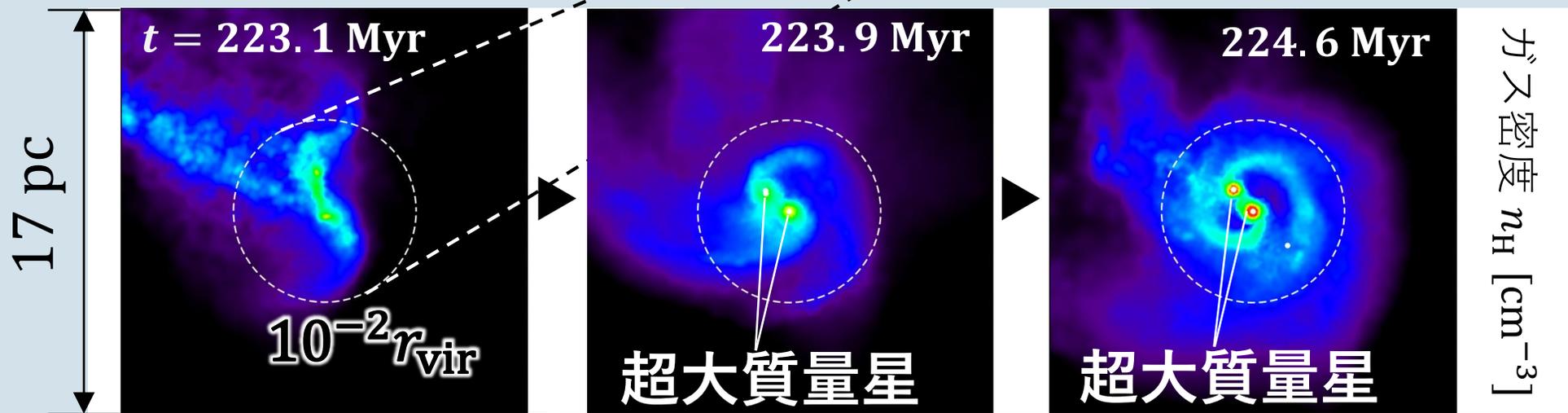
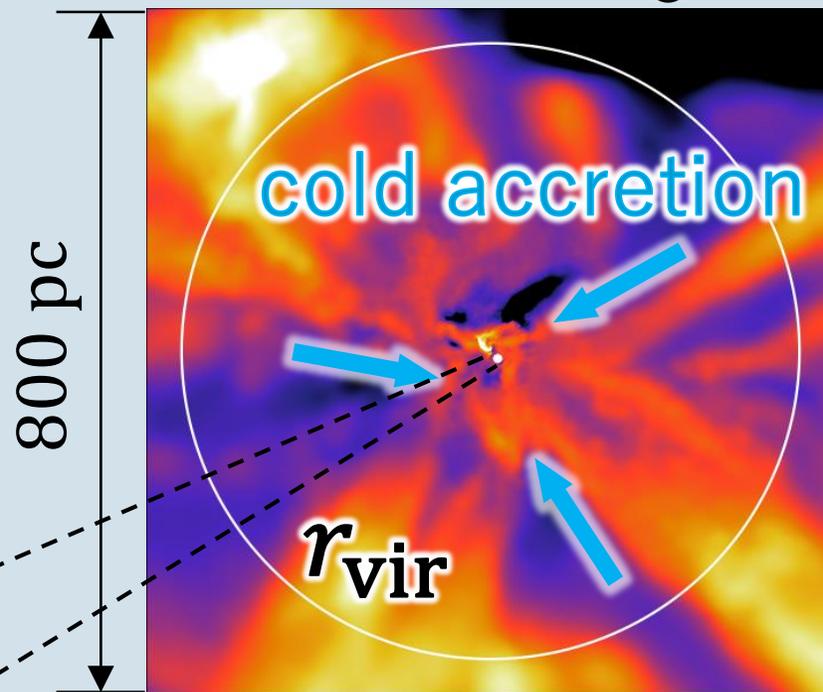
( $z=18.4$ )



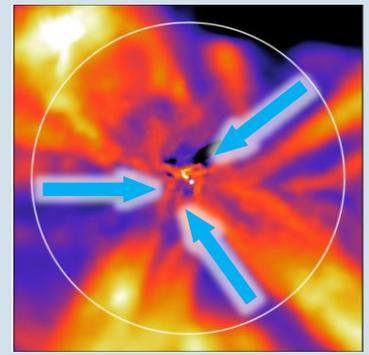
# 結果 超大質量星が形成！

質量降着率  $\dot{M} [M_{\odot} \text{ yr}^{-1}]$

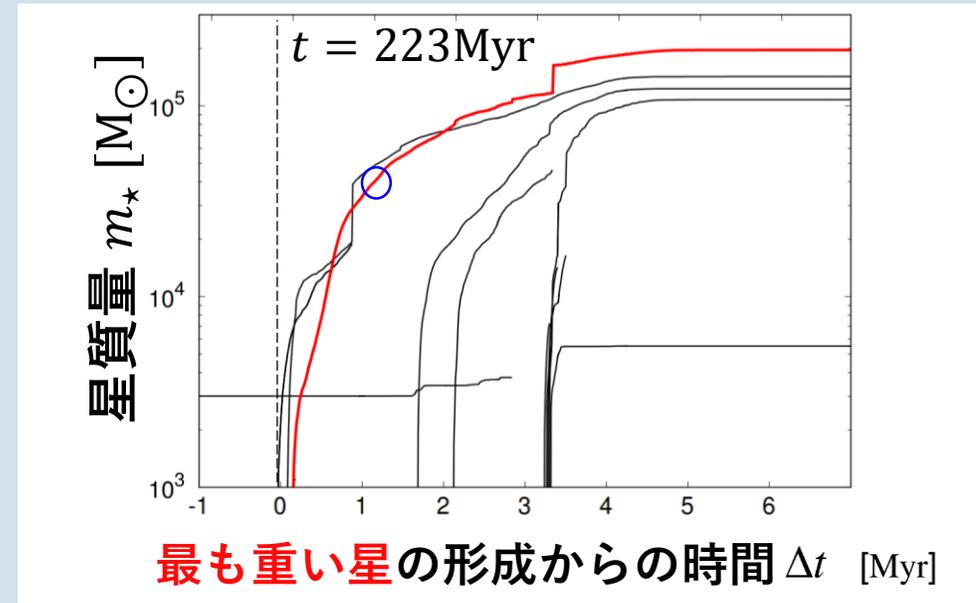
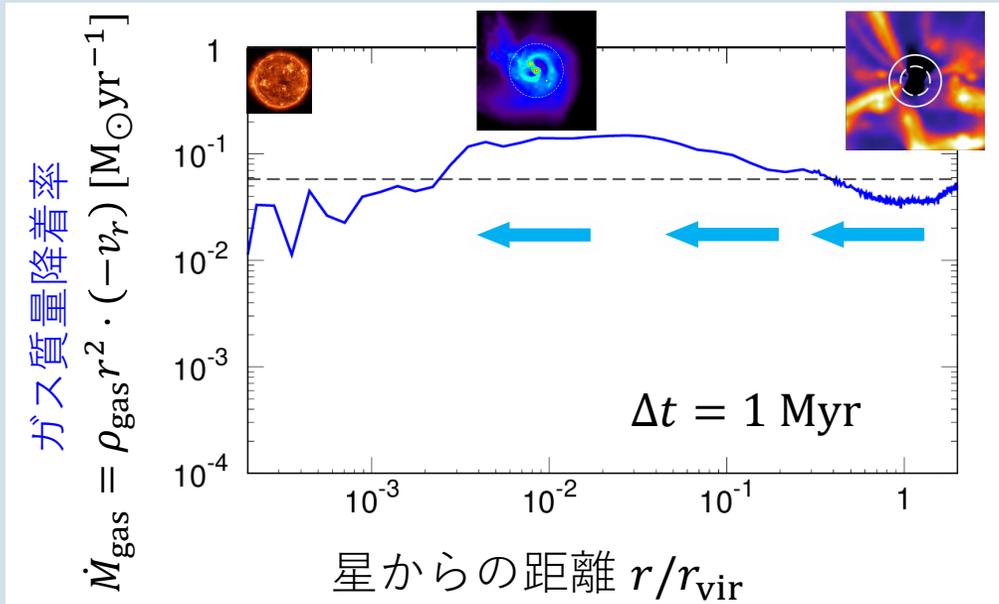
通常の Pop.III星ができた場所へ  
cold accretionでガスが流入し  
重力不安定を起こして  
 $m \gtrsim 10^5 M_{\odot}$ の超大質量星に.



# 結果 超大質量星の降着成長



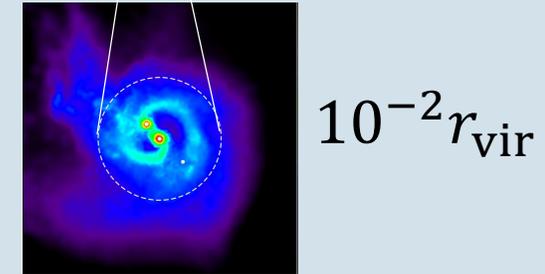
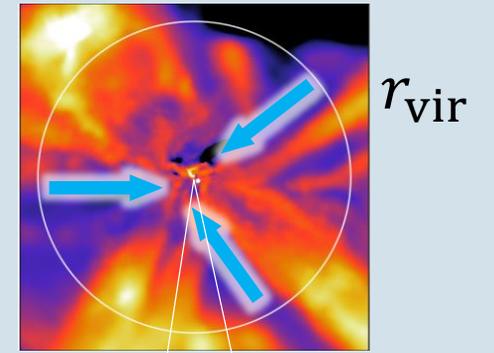
※Bondi半径を分解して降着段階が追跡可能



- 広いスケール  $r \sim 10^{-4} - 1 r_{\text{vir}}$  かつ
  - 長期 ( $\sim$ 星の寿命 3Myr) に渡って
- 星粒子へ  $\dot{m} \sim 0.01 - 0.1 \text{ M}_{\odot} \text{yr}^{-1}$  の大降着率が維持

# 大降着率の要因 cold accretion

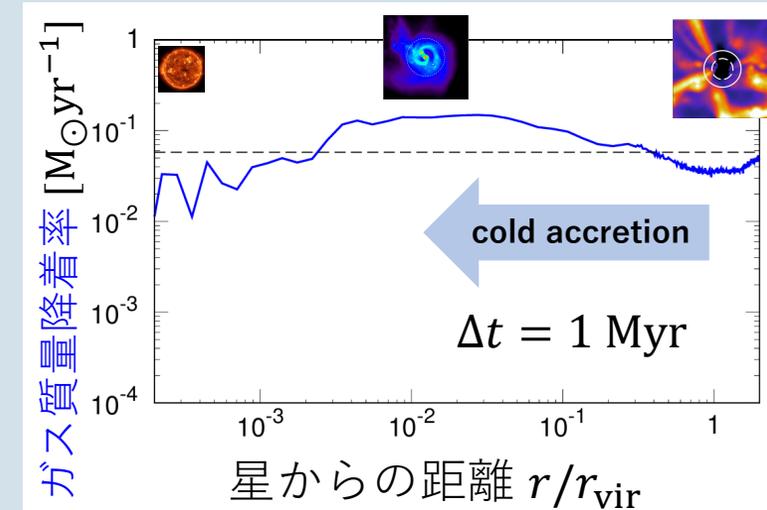
- ✓ 大規模構造からハローへ降着するガスは **cold accretion** を介してハロー中心へ定常的に直接届けられる



大スケールからのガス質量降着率の見積もり

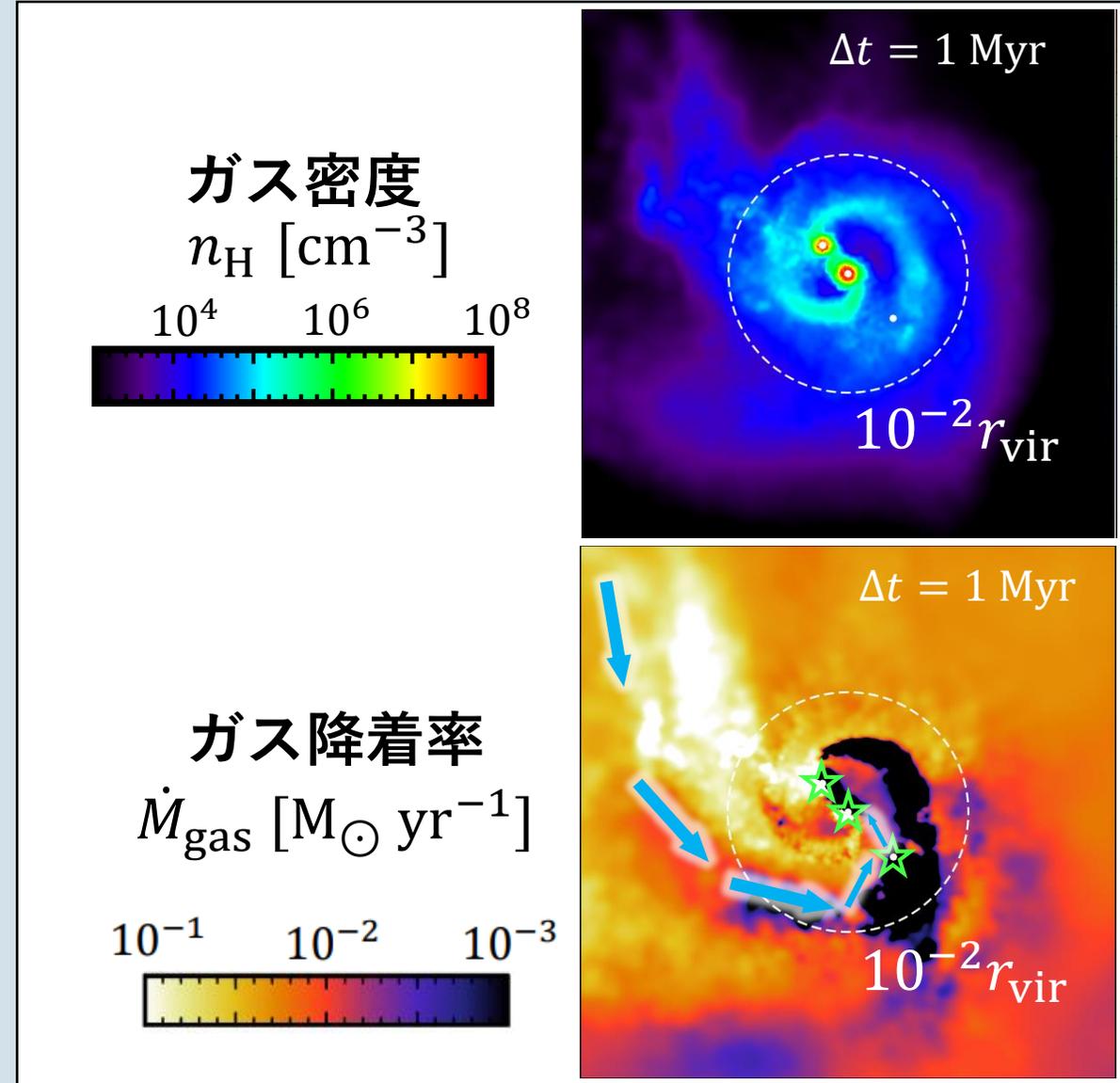
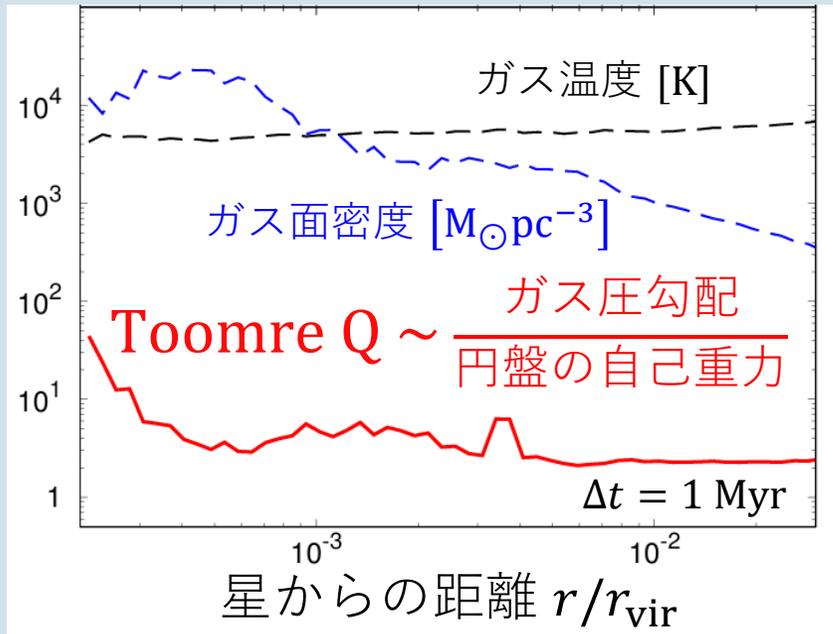
$$\dot{M}_{\text{gas}} \sim \frac{f_{\text{br}} M_{\text{halo}}}{t} \simeq 0.04 M_{\odot} \text{yr}^{-1} (T_{\text{vir}} / 10^4 \text{K})^{3/2}$$

ただし、この効果は角運動量が効くスケール ( $\gtrsim 0.01 r_{\text{vir}}$ ) まで



# 大降着率の要因 spiral armのトルク

- ✓ ガス面密度が高いため  
自己重力でガス円盤に腕が立つ  
⇒ 円盤中心へ質量輸送



# 大降着率の要因 spiral armのトルク

✓ 円盤を介したガス降着率の見積もり  $\dot{M}_{\text{disc}}$

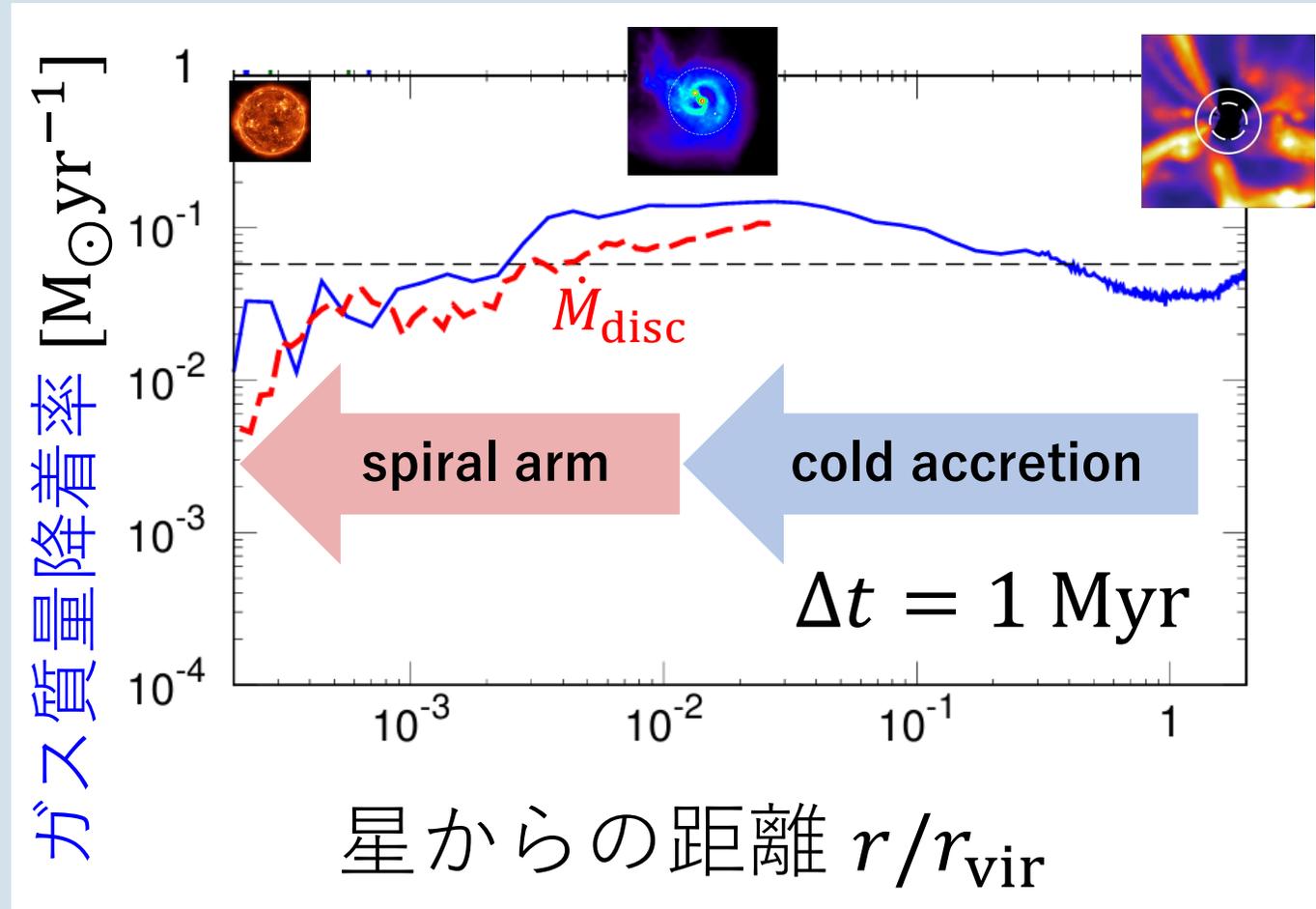
$$\dot{M}_{\text{disc}} = \alpha \Sigma_{\text{gas}} c_s^2 \Omega^{-1}$$

$$\text{※ Toomre } Q \simeq \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma_{\text{gas}}}$$

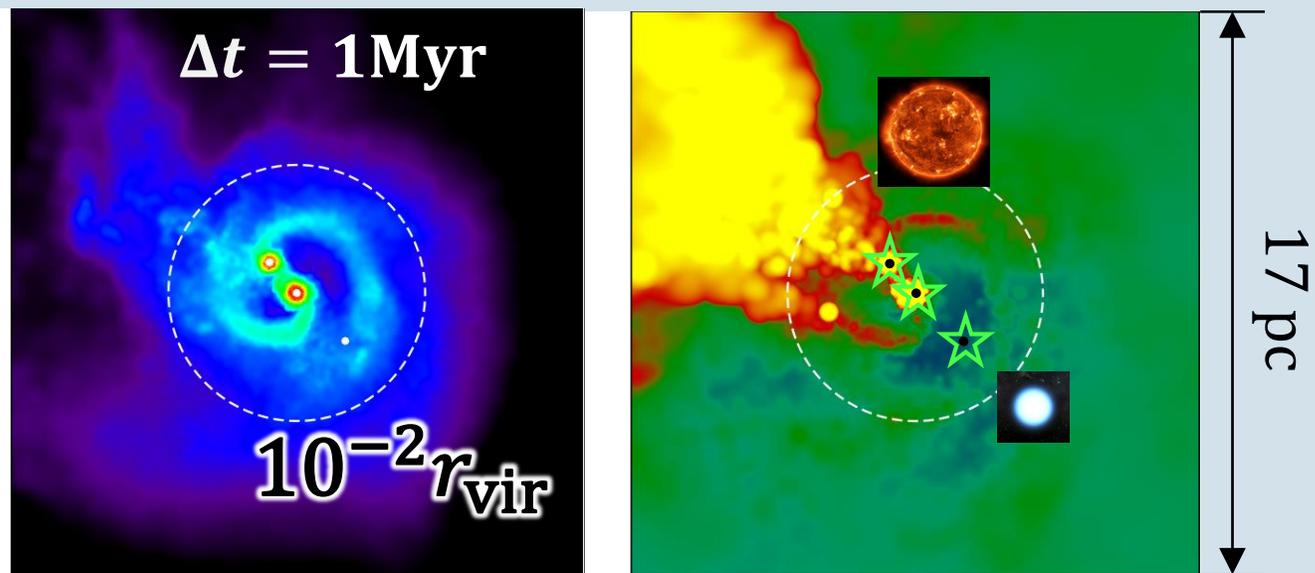
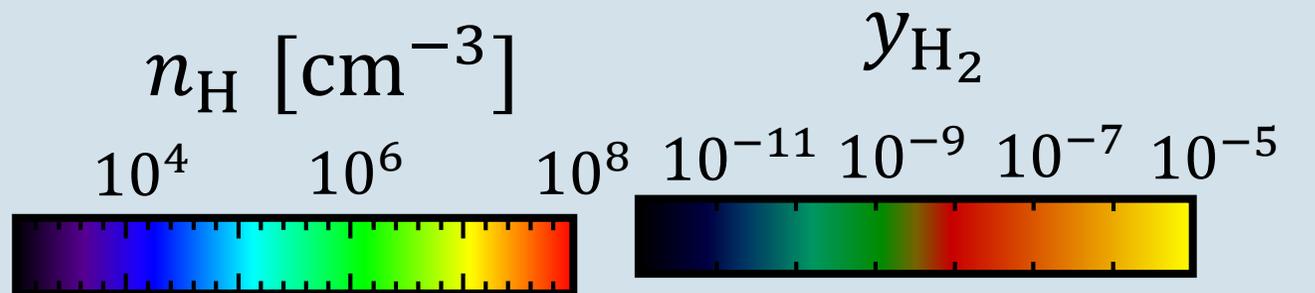
$$\simeq \frac{\alpha}{\pi Q} \frac{c_s^3}{G}$$

$$\sim 0.07 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \left( \frac{T}{8000\text{K}} \right)^{3/2} \frac{\alpha}{Q}$$

✓ ガス円盤が高温なことが効いている



# 大降着率の要因 輻射フィードバック



H<sub>2</sub>, H<sup>-</sup> 光解離で

✓ **ガス円盤をH<sub>2</sub>-freeに**

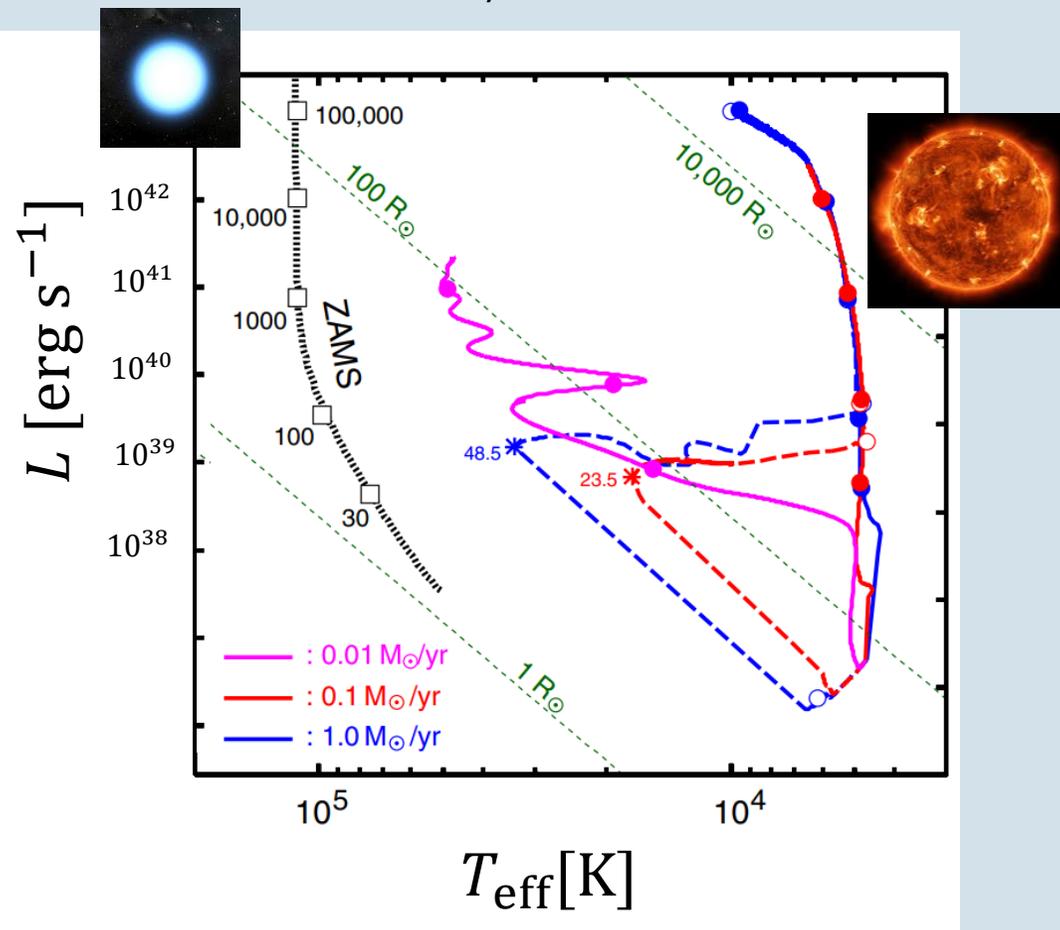
✓ 円盤分裂を防止

✓ 円盤での大降着率を実現

星が高密ガス円盤に埋まっているおかげで、  
電離バブルは星付近に限定

# 議論 (原始)星の状態と輻射スペクトル

星からの輻射の有効温度は  
質量降着率に応じて与える  
(Omukai+2008, Hosokawa+2013)

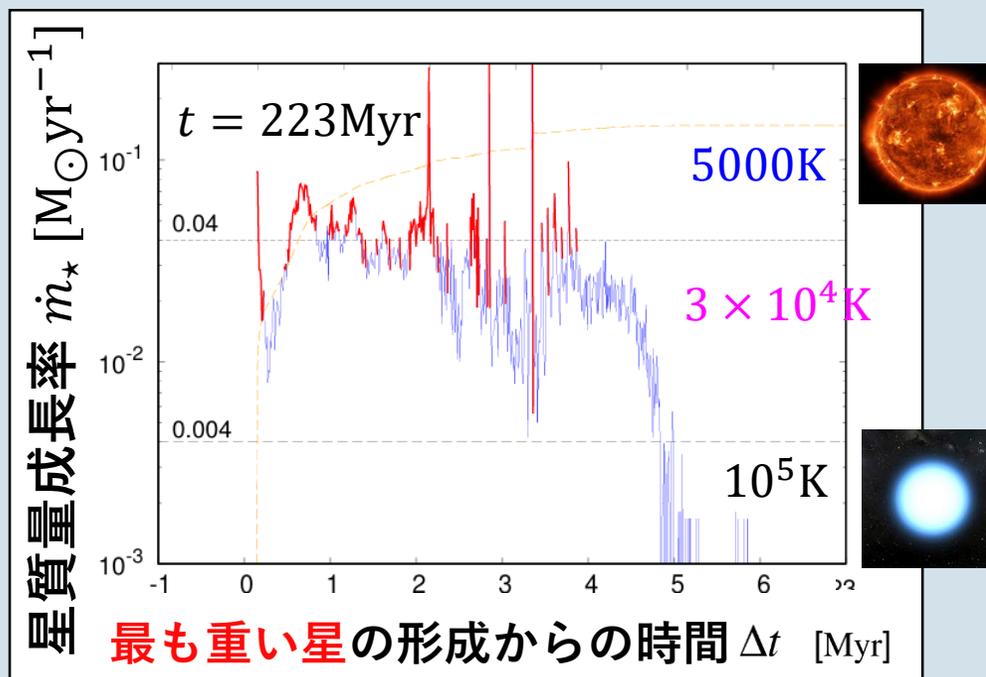


$T_{\text{eff}} = 5000\text{K}$  for  $\dot{M} > 0.04 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$   
(H<sup>-</sup> 光解離に効果的)

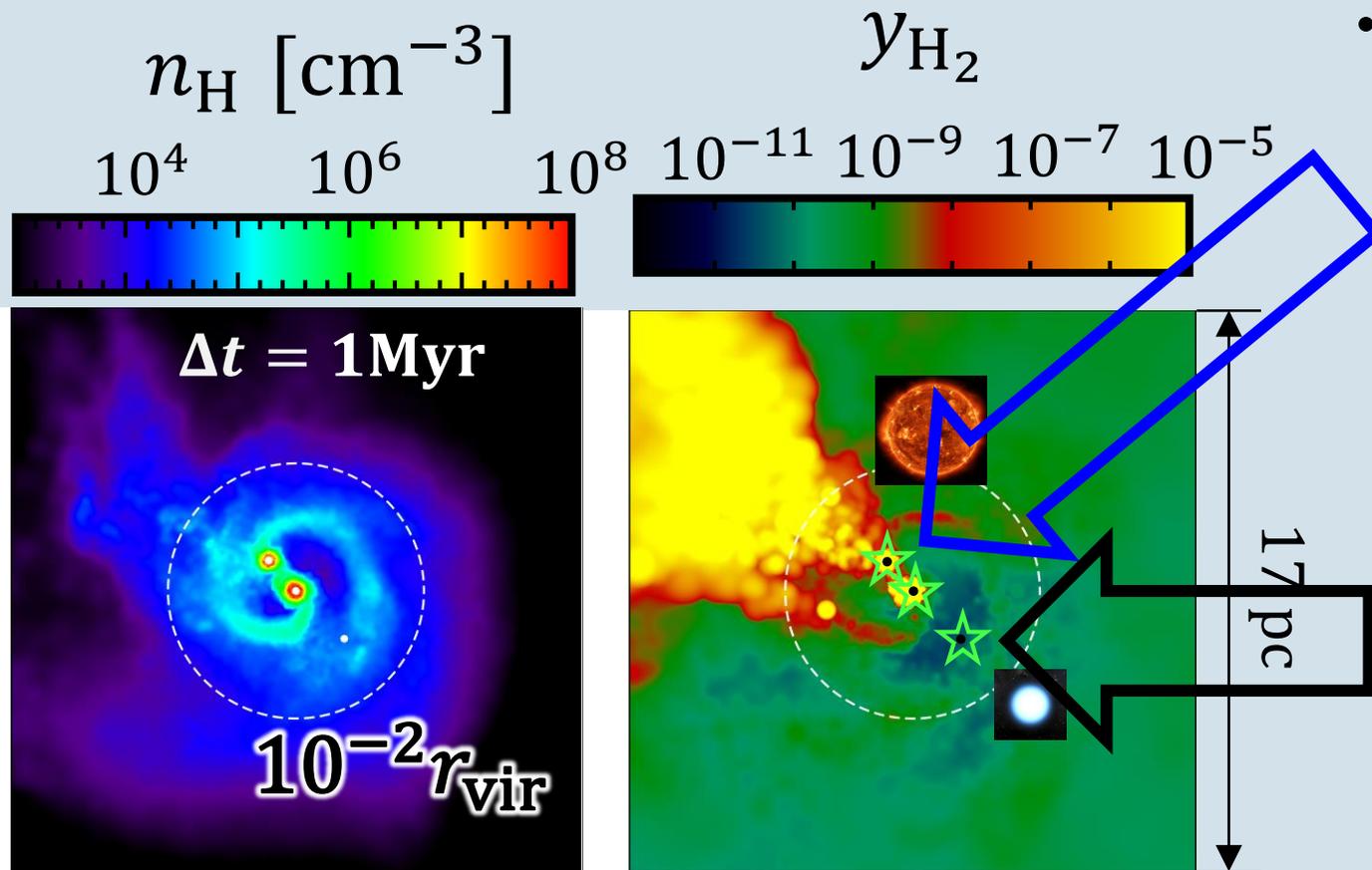
$T_{\text{eff}} = 3 \times 10^4\text{K}$  (振動状態)  
for  $0.004 < \dot{M} < 0.04 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$   
(H<sup>-</sup> と H<sub>2</sub> の光解離がそこそこ効く)



$T_{\text{eff}} = 10^5\text{K}$  for  $\dot{M} < 0.004 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$   
(H<sub>2</sub> 光解離に効果的)



# 議論 どの星からの輻射フィードバック？



- H<sup>-</sup>光解離に効きやすいのは  
今まさに大降着率で成長中の  
超大質量星 ( $T_{\text{eff}} = 5000\text{K}$ )
- H<sub>2</sub>光解離に効きやすいのは  
比較的低密ガスにおいて  
H<sub>2</sub> self-shieldingを受けづらい  
通常のPop.III星 ( $T_{\text{eff}} = 10^5\text{K}$ )
- 質量降着率が中間的な場合  
( $T_{\text{eff}} = 3 \times 10^4\text{K}$ )は  
H<sub>2</sub>とH<sup>-</sup>両方にそこそこ効く

# Summary

星の輻射フィードバックを加味した宇宙論シミュレーションにより  
**cold accretion**発現後に  $m \gtrsim 10^5 M_{\odot}$  の複数の超大質量星が形成

これは

- **cold accretion**によるハロー外から中心円盤までのガス輸送
- **円盤内でのarmのトルクによるガス輸送**
- **輻射フィードバックによるH<sub>2</sub>光解離**  
(円盤を高温維持)

により**定常的な大降着率**  $\sim 0.01-0.1 M_{\odot}\text{yr}^{-1}$  で実現

⇒ 重い種BHをハロー中心に自然にseeding. その後の成長にも有利

