

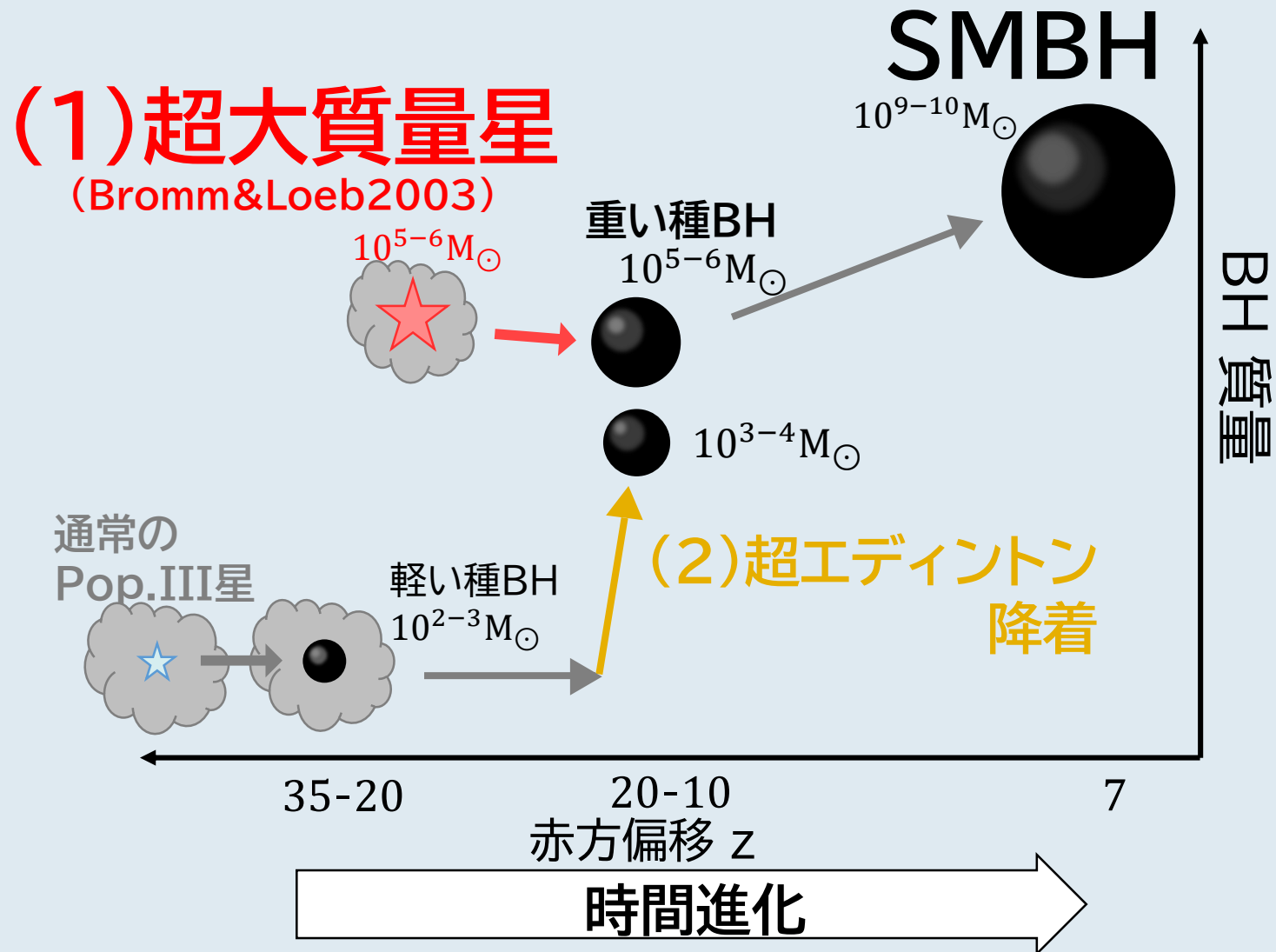
# cold accretionと輻射フィードバック による超大質量星形成

★  
喜友名正樹(京都大学D2)

共同研究者 細川隆史(京都大学)・鄭昇明(MPA)



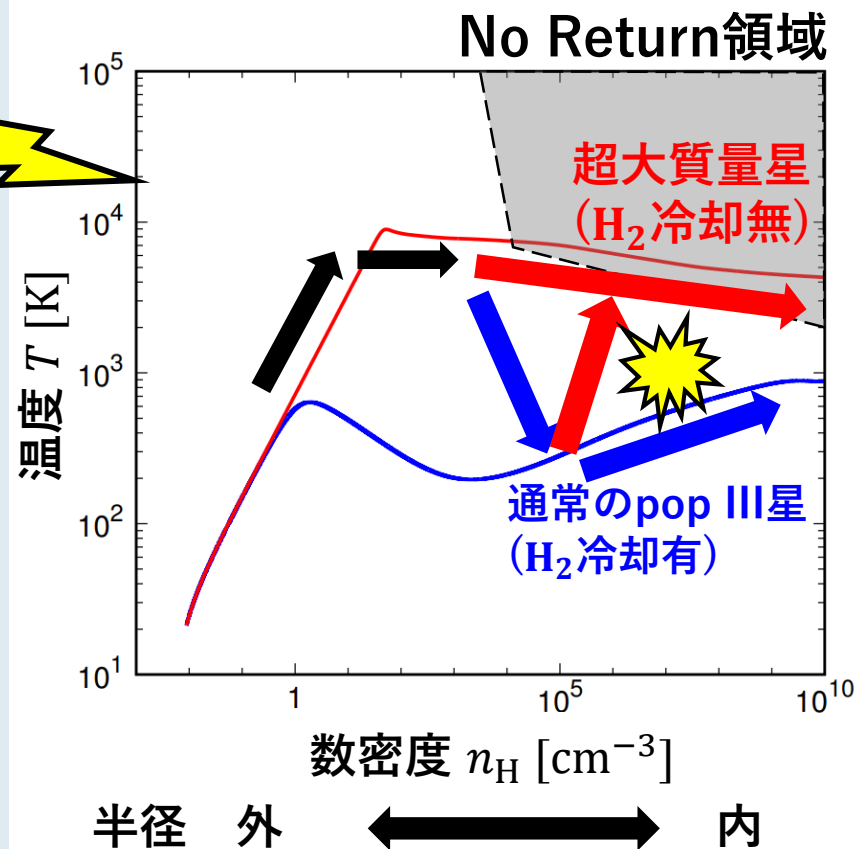
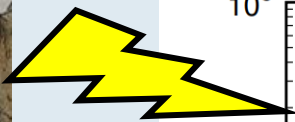
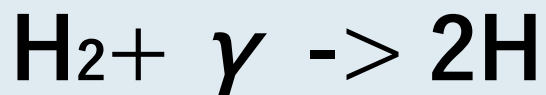
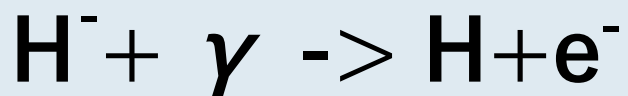
# イントロ SMBH形成シナリオ



# イントロ 超大質量星形成モデル



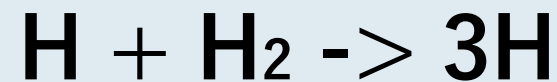
周囲の星/銀河の  
UV照射でH<sub>2</sub>光解離



VS



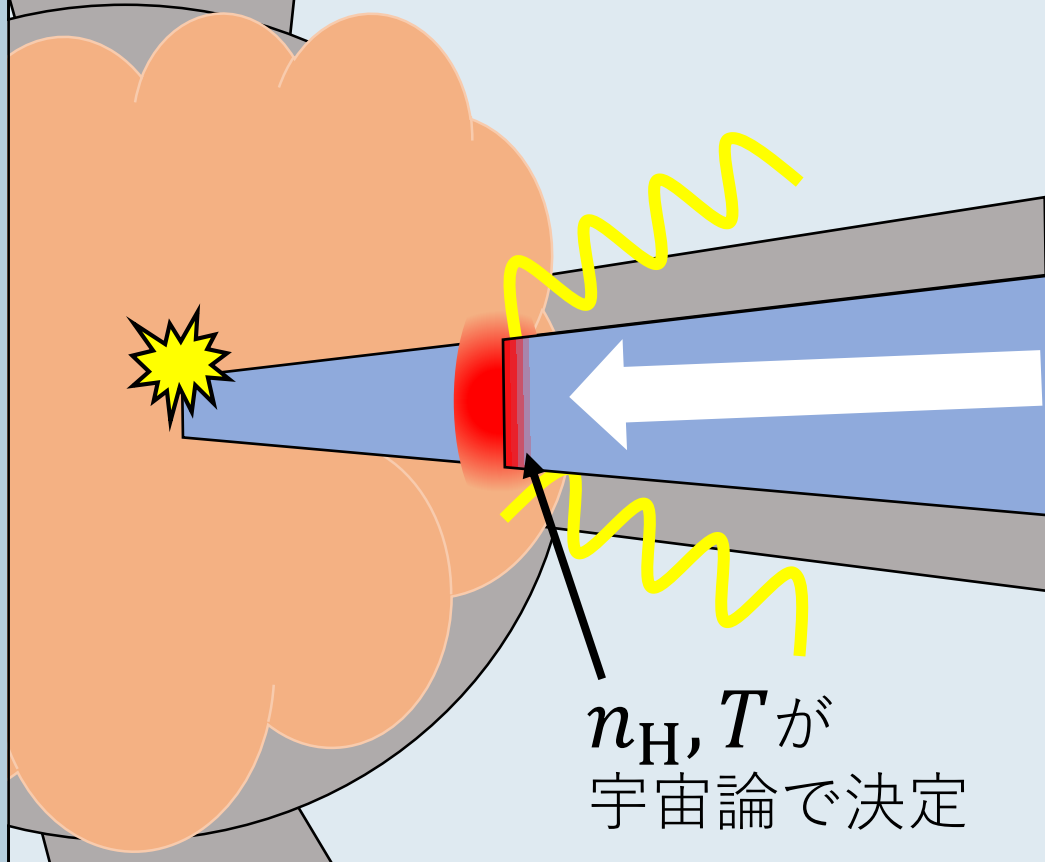
ショック加熱/衝突解離



cold accretionでこれが実現 (?)  
(Inayoshi & Omukai 2012)

# イントロ cold accretionモデル

## cold accretionとは



ガスの冷却時間 < ガス降着流の運動 time scale

の場合に降着流が  
ハロー中心まで貫通する現象

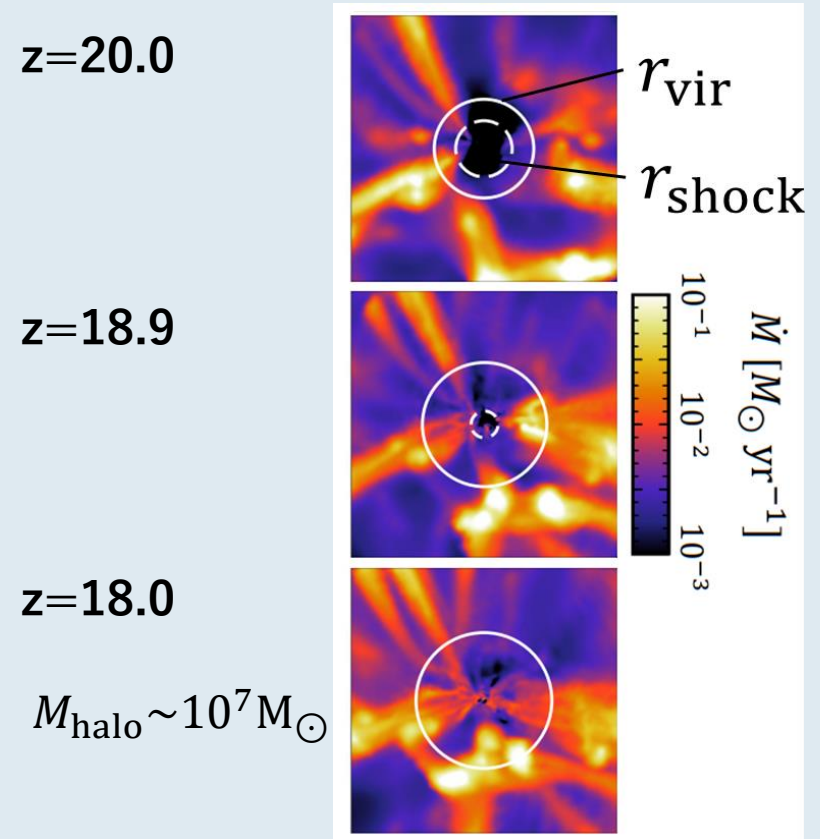
$M_{\text{halo}} \lesssim 10^{10-12} M_{\odot}$  でよく知られる  
(e.g. Birnboim & Dekel 2003)

これまでの研究(Kiyuna+2023)

# cold accretionで超大質量星形成できる？

3つの条件を調べる

1. 初期宇宙でcold accretion  
発現するか(○)
2. 高密度shockで  
No Return領域に入れるか
3. 重力不安定条件を満たすか

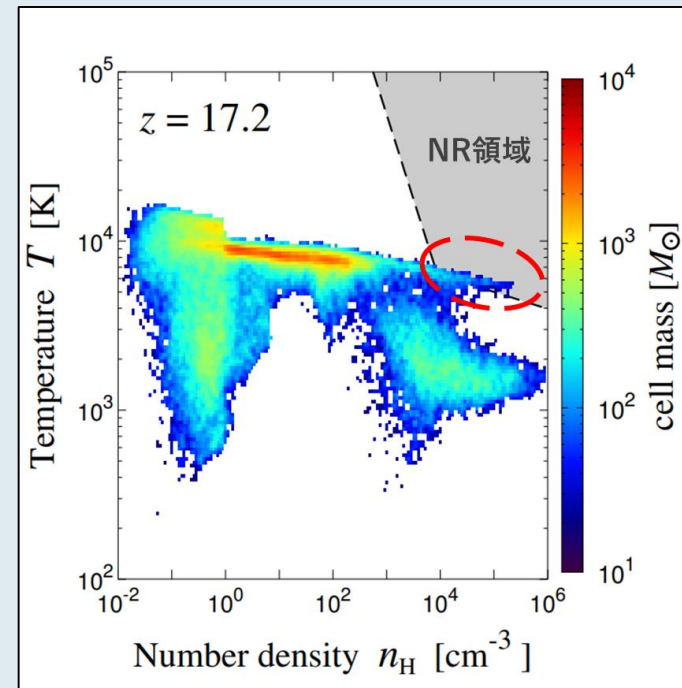


これまでの研究(Kiyuna+2023)

# cold accretionで超大質量星形成できる？

3つの条件を調べる

1. 初期宇宙でcold accretion  
発現するか(○)
2. 高密度shockで  
No Return領域に入れるか(○)
3. 重力不安定条件を満たすか





これまでの研究(Kiyuna+2023)

## cold accretionで超大質量星形成できる？

3つの条件を調べる

1. 初期宇宙でcold accretion  
発現するか(○)

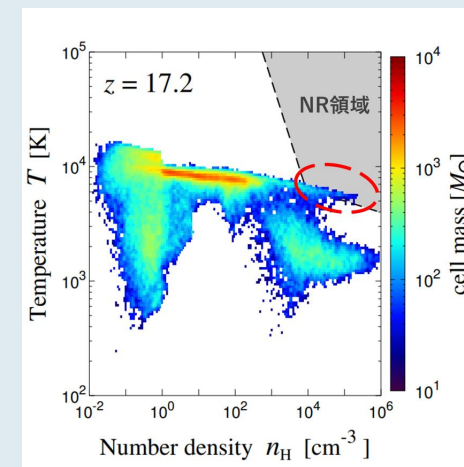
2. 高密度shockで  
No Return領域に入れるか(○)

3. 重力不安定条件を満たすか(△)

高温ガスと  
低温ガスが共存

低温ガスが分裂して  
通常のPop. IIIが~1-10個形成

高温ガスは $\lesssim 10^{4-5} M_{\odot}$ 存在  
ただし高温ガス主導の  
重力不安定は見られなかった

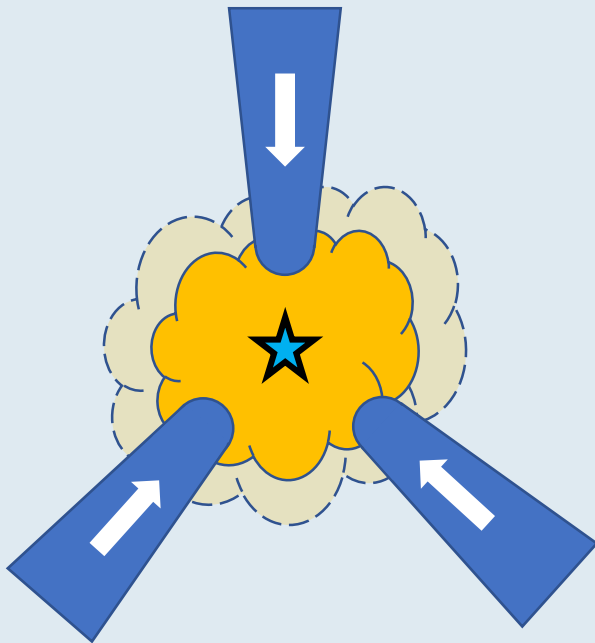


# 何が起きているか？

## 時間進化

$z=18.9$ ,  $M_{\text{halo}} \cong 10^7 M_{\odot}$

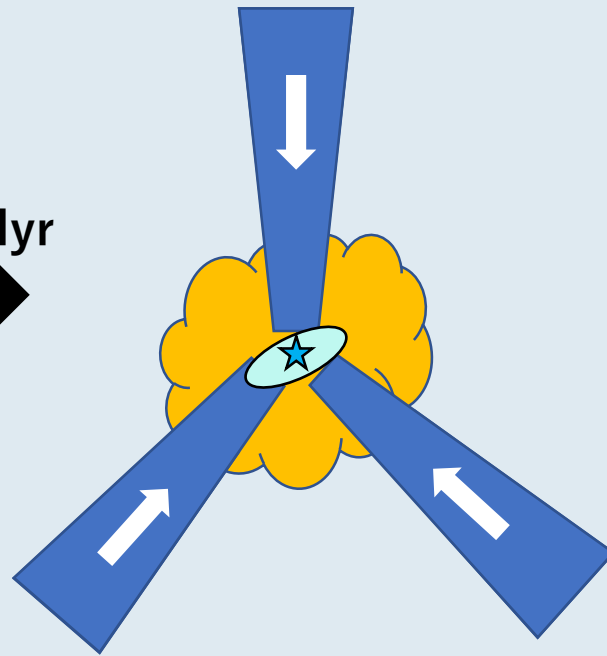
(1) Ly $\alpha$ の準静的冷却による  
最初の星形成(通常のPop.III)



14Myr

$z=18.0$

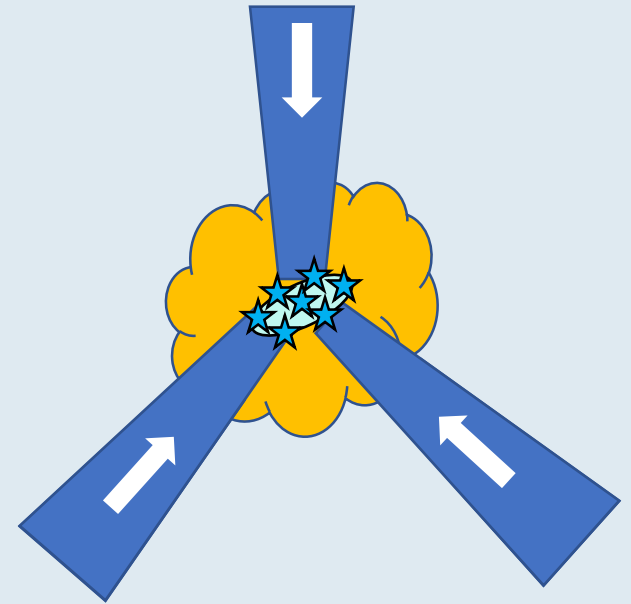
(2) cold accretion発現.  
降着流の貫通・円盤形成.



4Myr

$z=17.8$

(3) 2個目以降の星形成  
1-10個の通常のPop.III形成  
(超大質量星できる?)





# 何が起きているか？

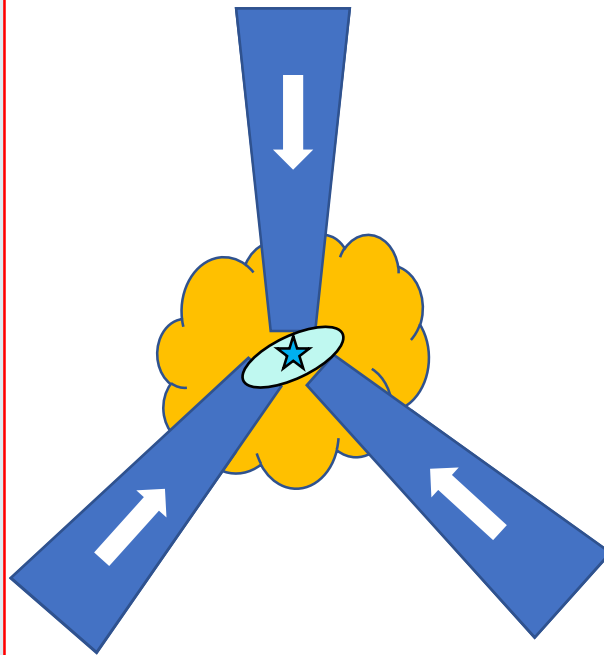
時間進化

これまでの計算は、  
先にできた星の輻射を無視。

⇒影響は避けられない。  
むしろ解くと有利？

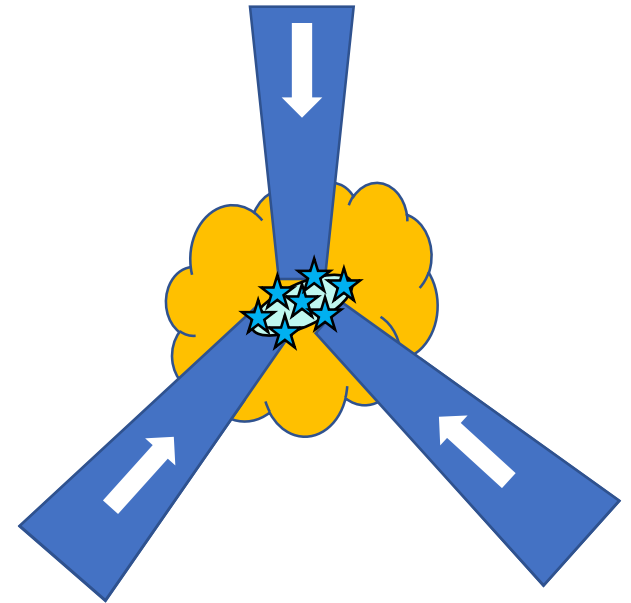
$z=18.0$

(2) cold accretion 発現。  
降着流の貫通・円盤形成。



$z=17.8$

(3) 2個目以降の星形成  
1-10個の通常のPop.III形成  
(超大質量星できる?)



# 予想される輻射FBの効果

- H<sub>2</sub>やH<sup>-</sup>の光解離  
→ 超大質量星形成に有利?
- Hの光電離  
→ H<sub>2</sub>形成を促進して不利?
- 光加熱によるガス構造変化  
→ 強すぎるとハローのガスが蒸発して不利?

輻射の設定次第. いろいろな設定を調べたいところ

# 計算方法

手法: “zoom-in”+“splitting”  
宇宙論的流体+輻射輸送 シミュレーション

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

最高分解能:  $m_{\text{br}} \sim 1M_{\odot}$ ,  
 $\lambda \sim 0.1\text{pc}$

以前と比べて  
精度10倍

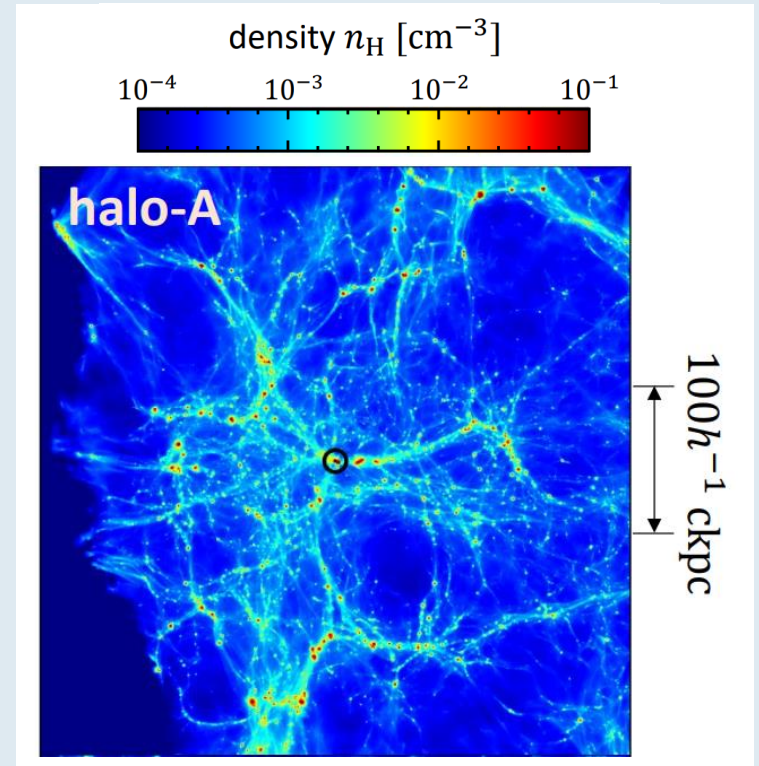
密度  $n_{\text{H}} \geq 2 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$  で  
sinkに置き換え.

今回は  
最も強気の場合

**sinkの輻射FB:**

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

**有効温度  $T_{\text{eff}} = 3 \times 10^4 \text{K}$  の黒体輻射.**

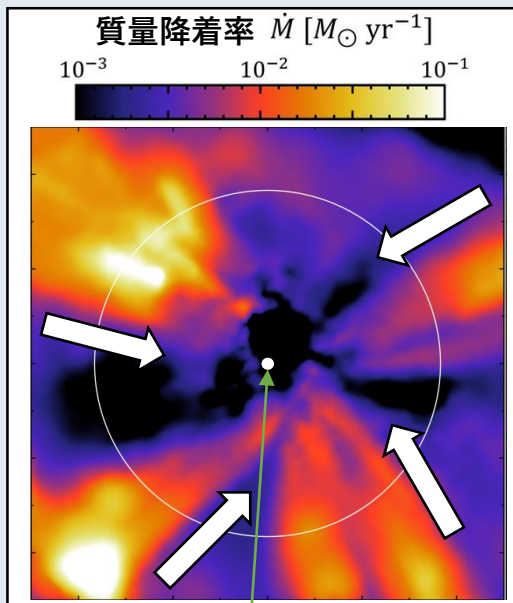


# 結果 全体の流れ

$\Delta t \sim 40 \text{ Myr}$

時間進化

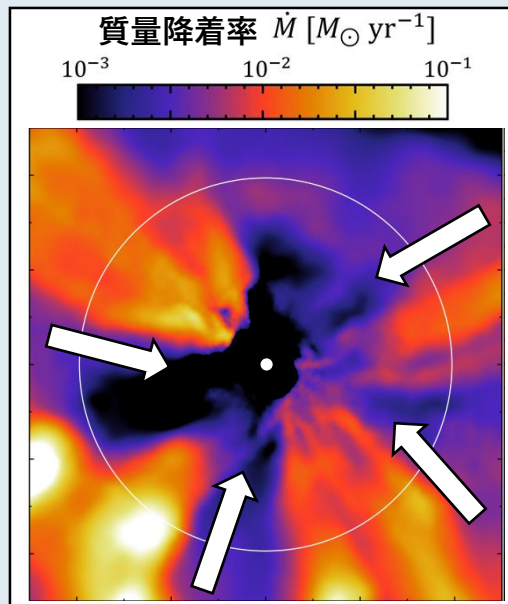
$z=18.9, M_{\text{halo}} \cong 10^7 M_{\odot}$



最初のsink形成

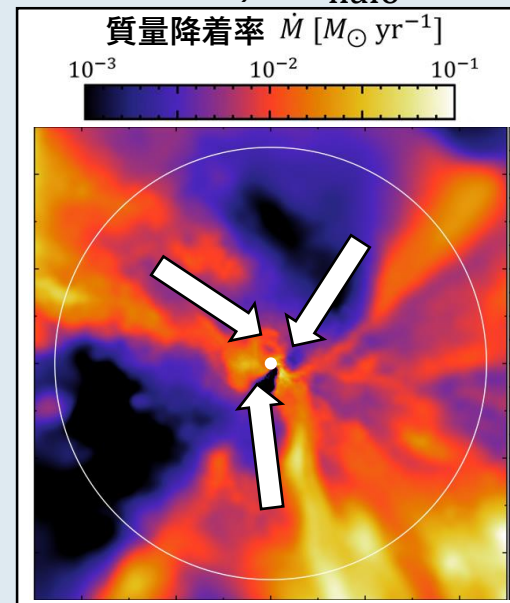
$m_{\text{sink}} \sim 3000 M_{\odot}$   
 $L \sim 4 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$

( $z=18.4$ )



しばらく星形成停止

$z=16.4, M_{\text{halo}} \cong 2 \times 10^7 M_{\odot}$

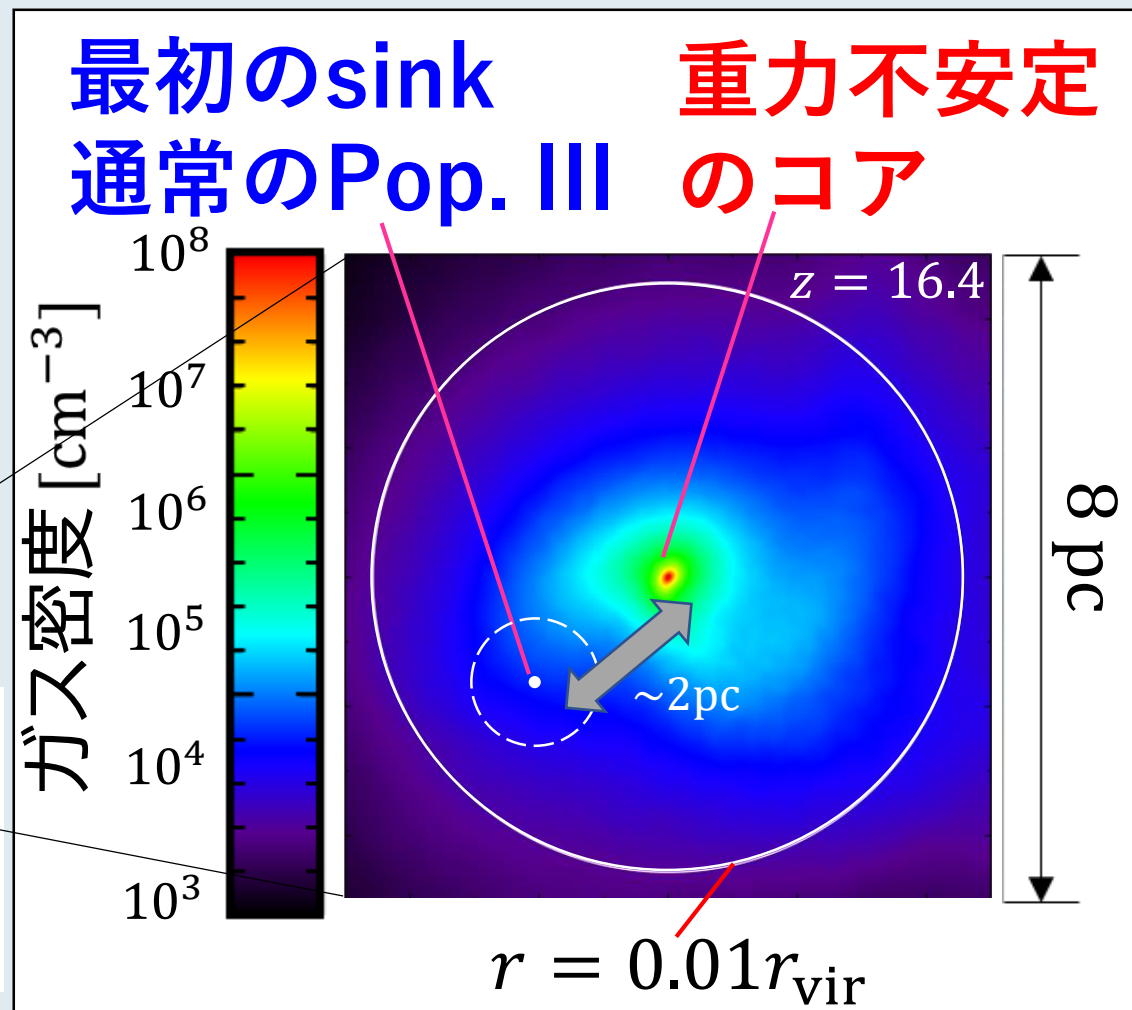
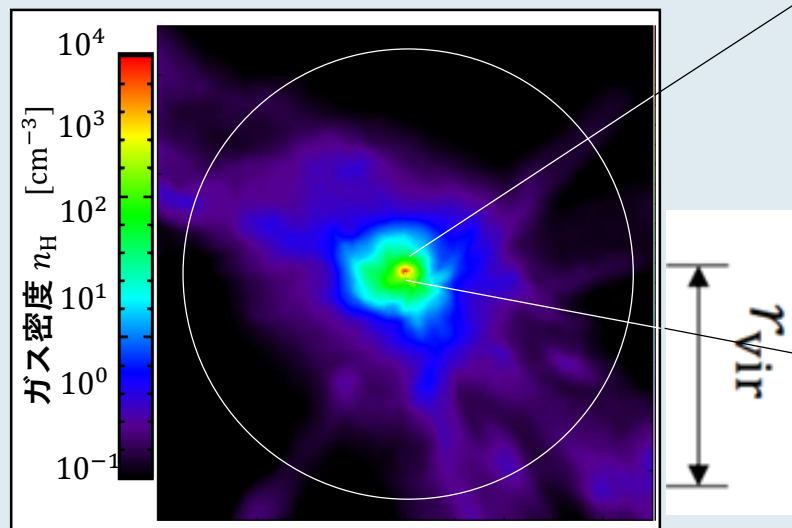


降着流貫通  
高温ガスが溜まる

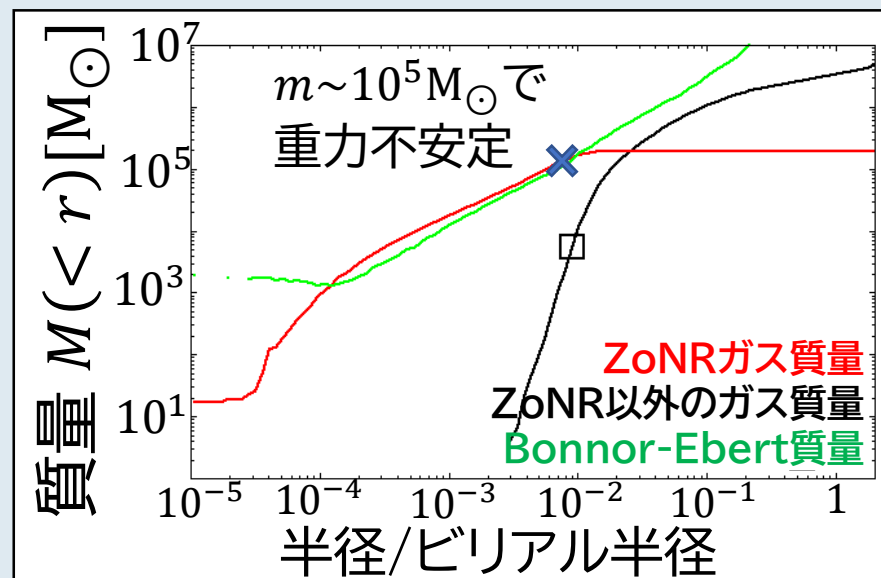
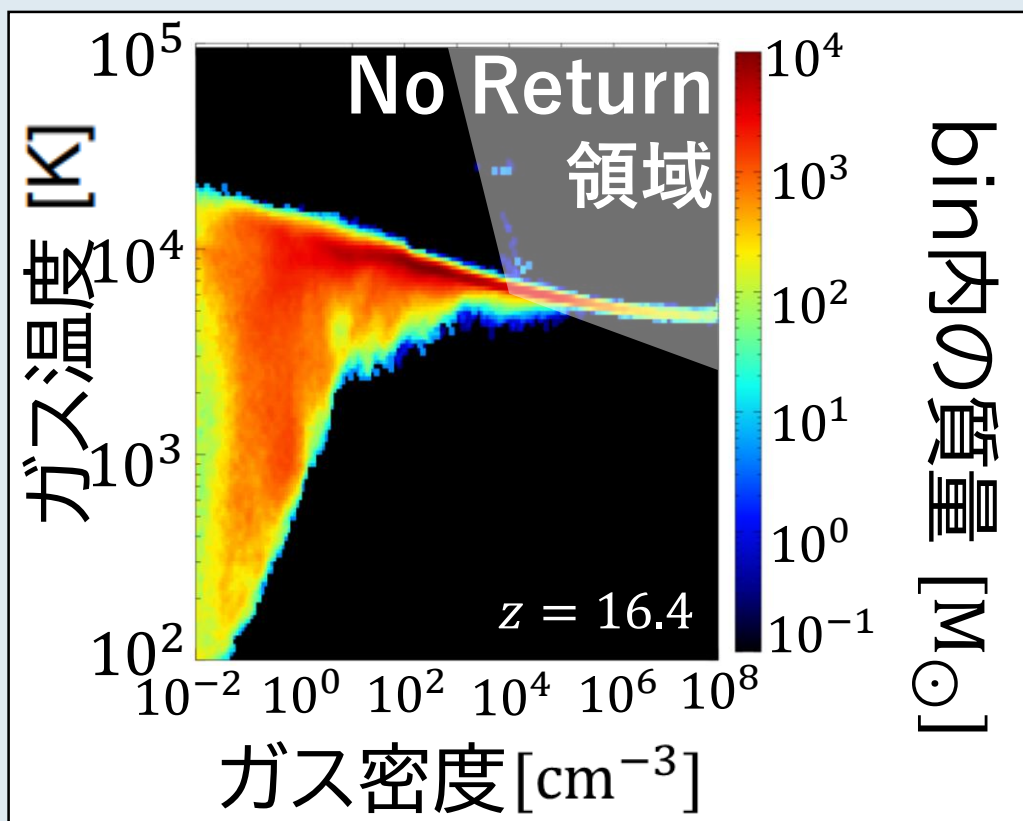
2つめのsink(超大質量星)形成

# 結果 超大質量星形成

ハロー中心のsink近縁に  
高温高密ガスが溜まり  
重力不安定が起こる



# 結果 超大質量星形成



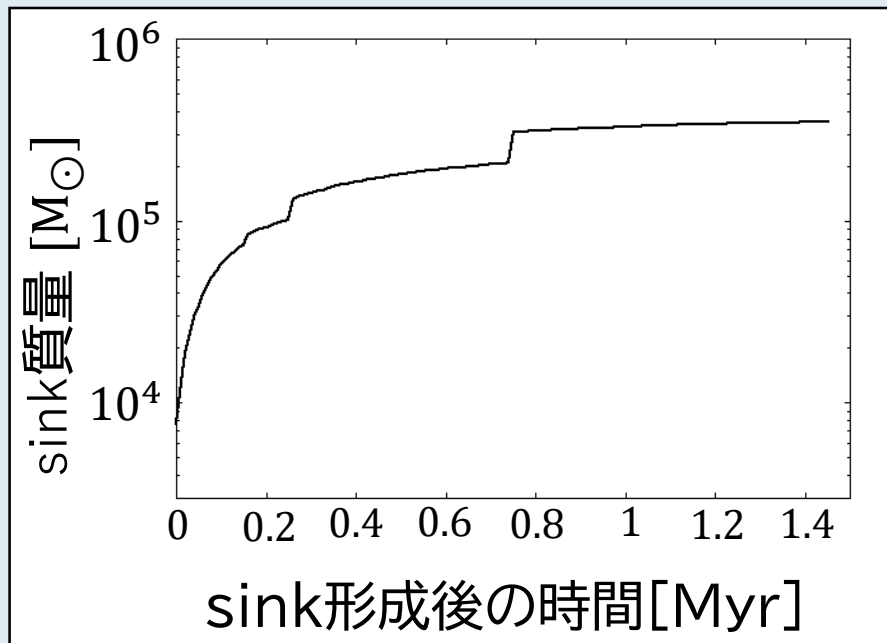
高温高密ガスだけで  
重力不安定になっている  
⇒ **超大質量星**

# 結果 超大質量星形成

sink半径  $\cong 0.2\text{pc}$  は Bondi半径

$$r_B \cong 1\text{pc} \left( \frac{m}{10^4 M_\odot} \right) \left( \frac{T}{8000\text{K}} \right)^{-1}$$

より小さいので、降着フェイズが追跡可能



$$\dot{m} \gtrsim 0.1 M_\odot \text{yr}^{-1}$$

計算時間内の最終質量

$$m = 3 \times 10^5 M_\odot$$



# おまけ 超大質量星形成

超大質量星は、実は超強力な光解離ソース

$$L_{UV} \sim L_{Edd} \sim 10^{43} \text{ erg s}^{-1} (m/10^5 M_{\odot}), \quad T_{\text{eff}} \sim 5000 \text{ K}$$

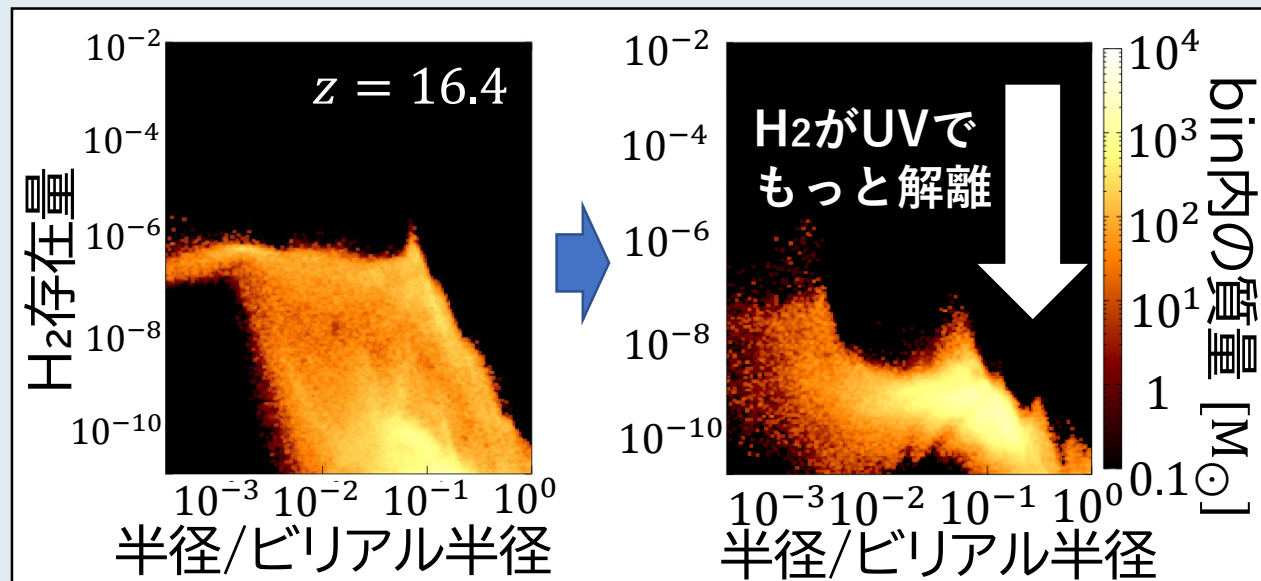
通常のPop.III光源と比べ、光解離周波数帯のfluxは $\sim 10^6$ 倍！

(Sugimura et al. 2014)

成長中のsinkを上記設定で光らせる

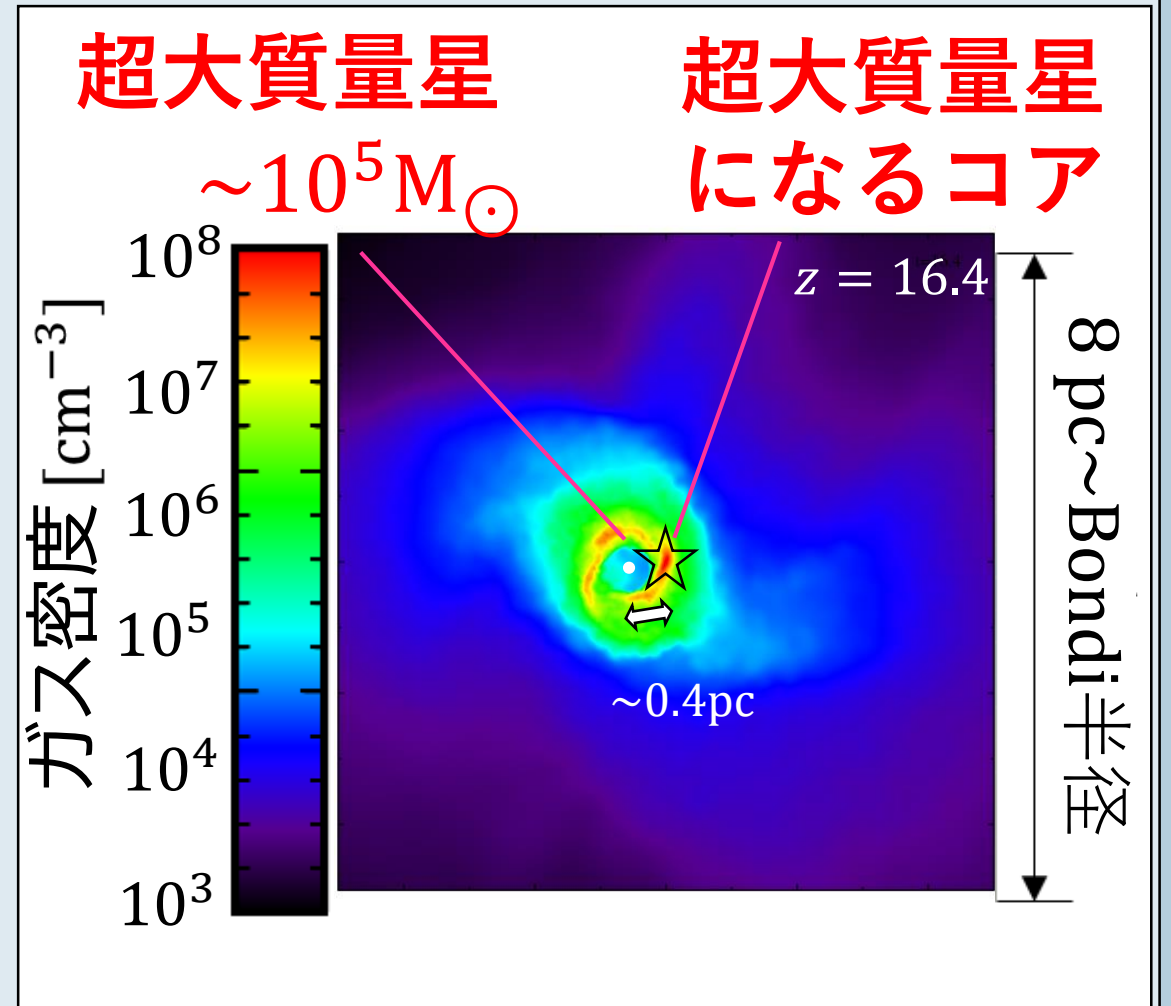
⇒ハロー内ガスがよりH<sub>2</sub>解離

超大質量星がいる限り  
より超大質量星形成に有利

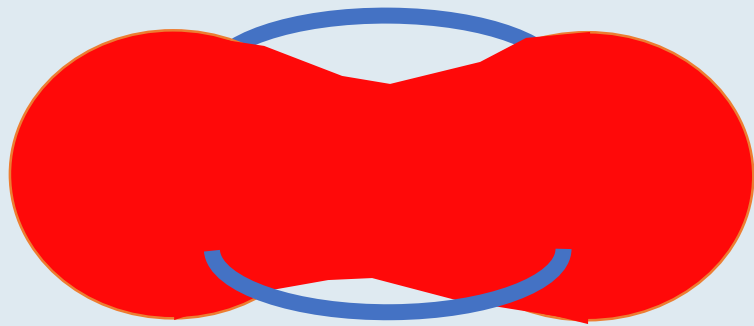


# おまけ 超大質量星形成

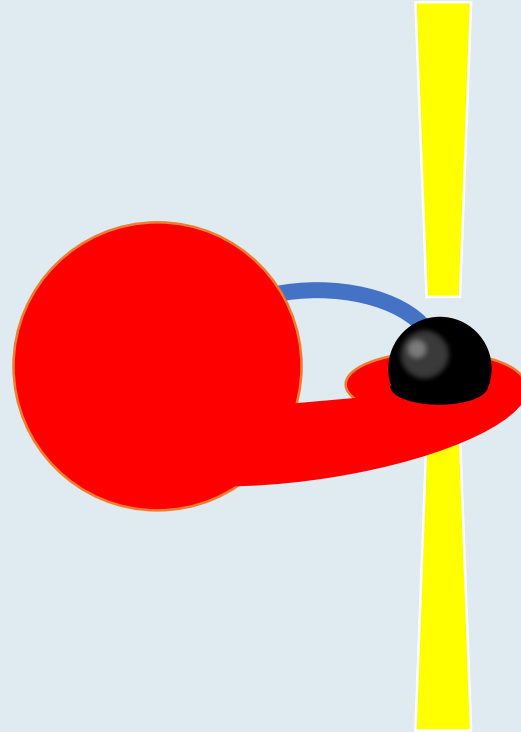
- 超大質量星のsink形成後,  
sinkまわりに円盤が形成
- 円盤分裂し  
**また超大質量星形成**  
( $t < 1\text{Myr}$ で $m \cong 10^5 M_{\odot}$ )  
最終的に  
 $m \cong 10^5 M_{\odot}, 2 \times 10^5 M_{\odot}$ の  
**超大質量星連星**



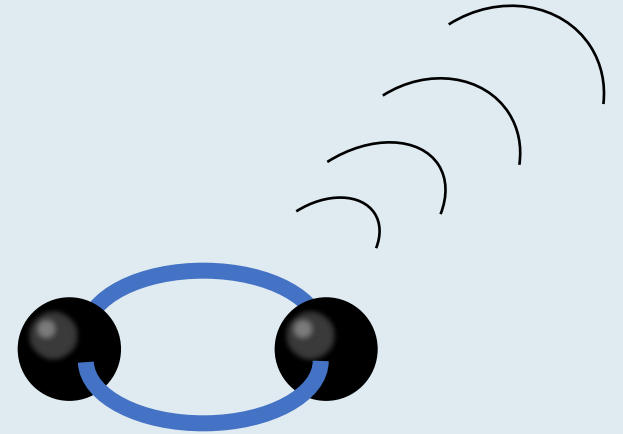
# おまけ



超大質量星連星？



超大質量星-MBH 連星？



MBH-MBH 連星？

# まとめ

これまでの初期宇宙のcold accretionと星形成の計算に、  
**先にできるPop.III星からの輻射FB**を入れて計算.

輻射FB設定: 今回はより強気.

$$L_{UV} = 4 \times 10^{41} \text{erg s}^{-1} (m/3000M_{\odot}), T_{\text{eff}} = 3 \times 10^4 \text{K}$$

## 結果

- 輻射FBで星形成が一旦停止  $\Rightarrow$  cold accretion貫通
- **超大質量星の形成を確認.  $m = 3 \times 10^5 M_{\odot}$**
- 超大質量星が一度できると強力にH<sub>2</sub>光解離  
円盤分裂で**次の超大質量星** 連星形成？

予備スライド

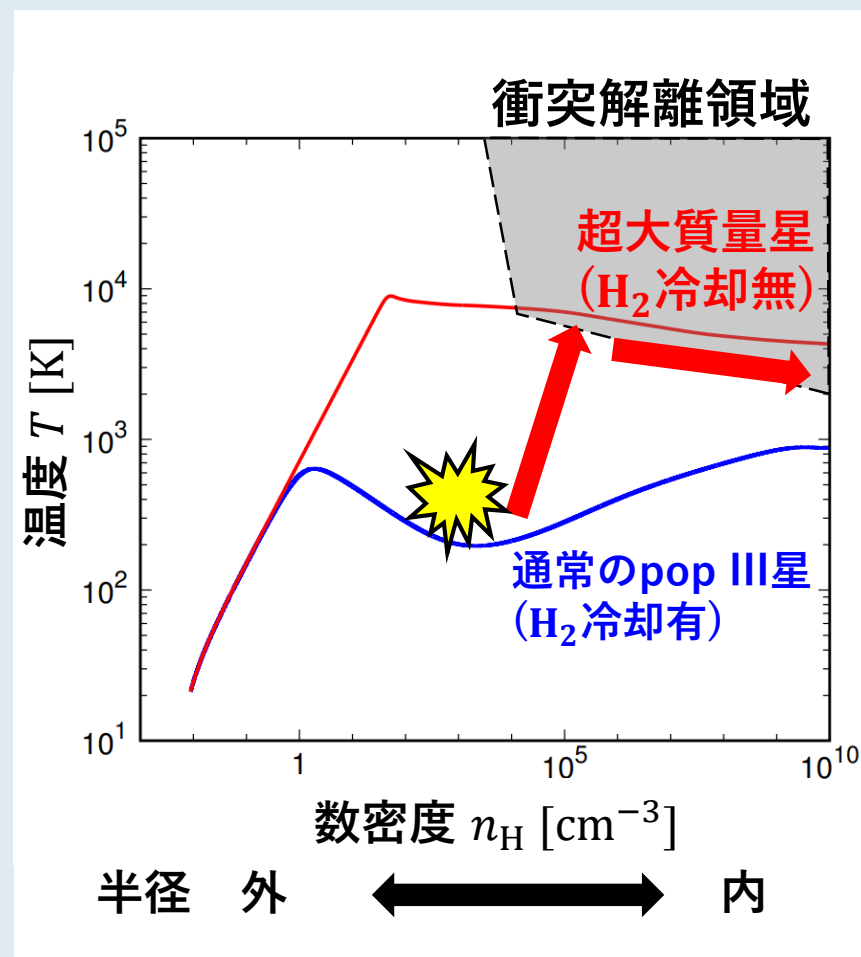
# イントロ 衝突解離モデル

高密度shockが起きれば, H<sub>2</sub>衝突解離  
(Inayoshi & Omukai 2012)



超ラッキーな状況として  
強い光源を仮定しなくても,  
超大質量星が形成可能(?)

cold accretionでこれが実現(?)



これまでの研究(Kiyuna+2023)

# cold accretionで超大質量星形成できる？

3つの条件を調べる

1. 初期宇宙でcold accretion  
発現するか
2. 高密度shockで  
No Return領域に入れるか
3. 重力不安定条件を満たすか

手法

宇宙論的”zoom-in”シミュレーション

コード: N体+SPH法“Gadget-3”(Springel 2005)

計算領域:  $(1 h^{-1} \text{cMpc})^3$

最高解像度:  $m_{\text{br}} \sim 10 M_{\odot}$

背景FUV:  $J_{21} = 10$

ガス密度が  $n_{\text{H}} = 2 \times 10^6 \text{cm}^{-3}$  を超えると  
sink粒子に置き換えて計算を続行.

sinkからのfeedbackは無し



# 本論 計算方法と設定

手法: “zoom-in”+”splitting”

宇宙論的流体+輻射輸送シミュレーション

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

計算領域:  $(1 h^{-1} \text{cMpc})^3$

最高解像度:  $m_{\text{br}} \sim 10 M_{\odot}$

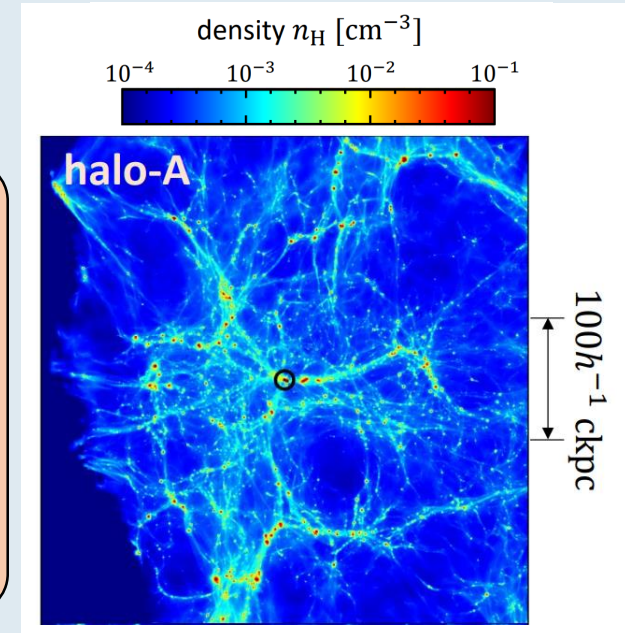
背景FUV:  $J_{21} = 10$

ガス密度が  $n_{\text{H}} = 2 \times 10^6 \text{cm}^{-3}$  を超えると  
sink粒子に置き換えて計算を続行.

**sinkからの輻射FBは**

**Eddington光度  $L_{\text{UV}} = 1.2 \text{e}38 \text{erg s}^{-1} (m/1 M_{\odot})$  と**

**有効温度  $T_{\text{eff}} = 3 \times 10^4 \text{K}$  の黒体輻射.**

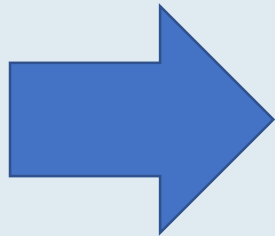
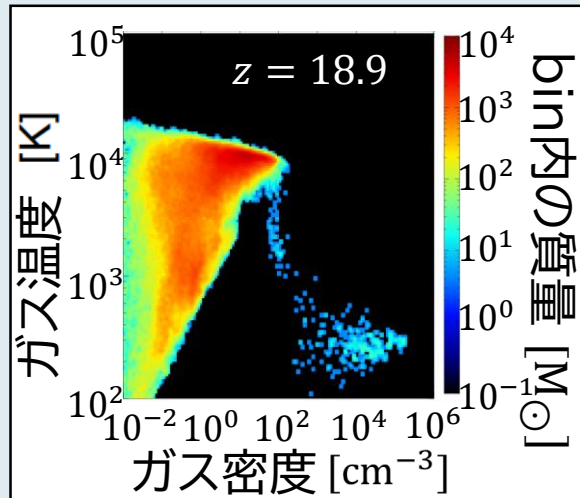


# 結果(1) 最初のsink形成

## 通常のPop.III形成

$$m_{\text{sink}} \sim 3000 M_{\odot}$$

$$L \sim 4 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$$

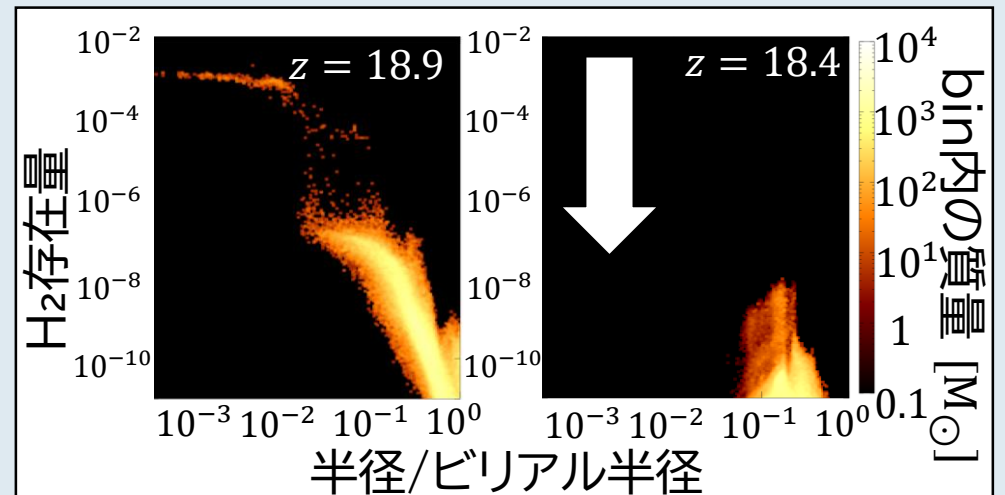
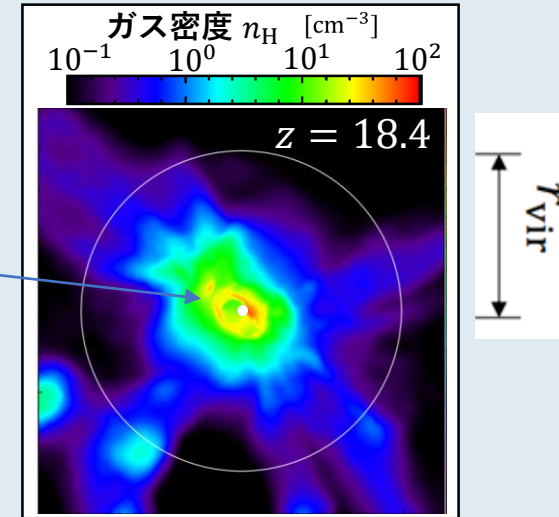


## 星形成停止

- ・ 光電離による加熱膨張.  
バブル  $r \sim 0.1 r_{\text{vir}}$

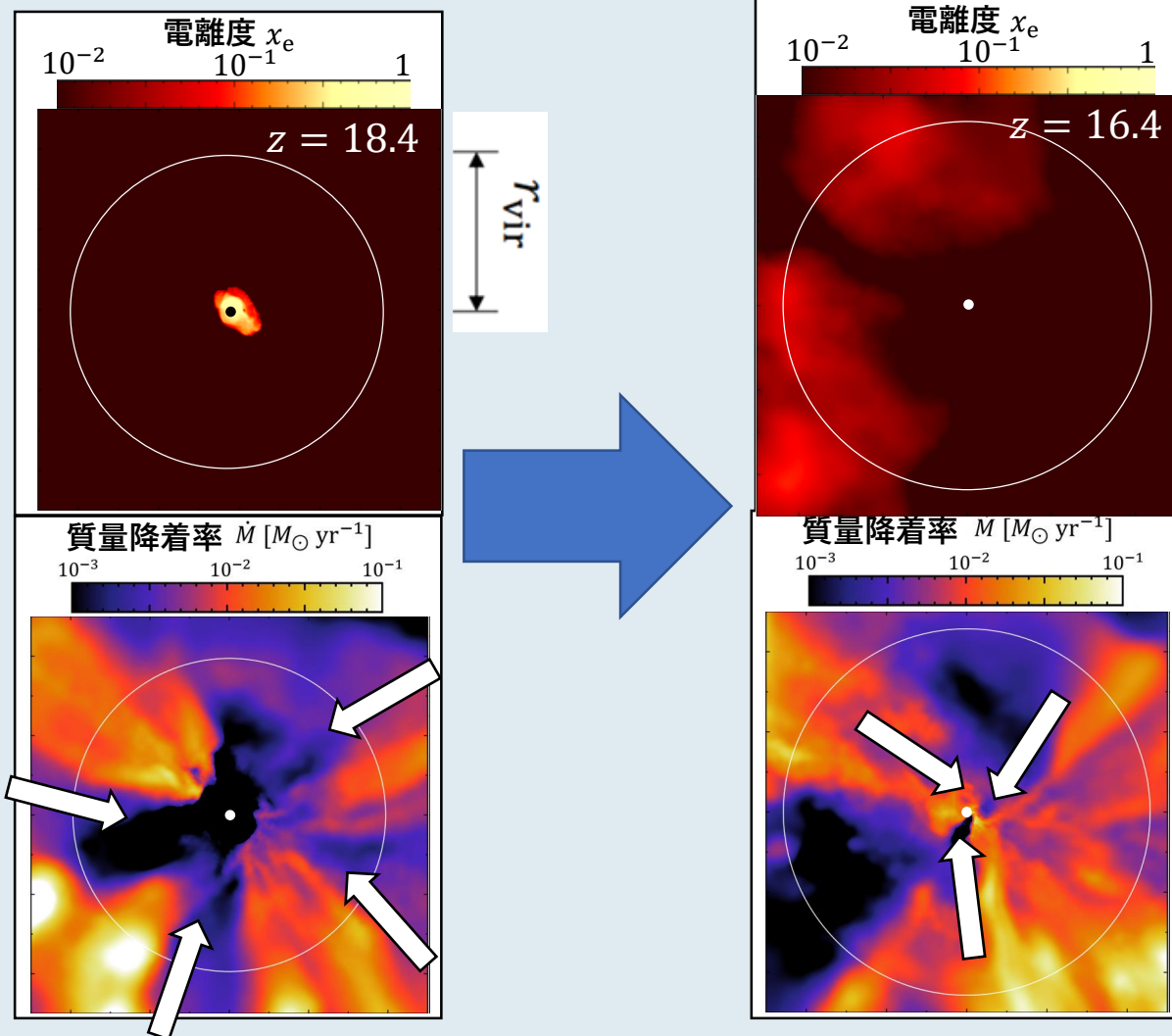
ハロー全体は蒸発しない

- ・  $\text{H}_2$ の光解離



## 結果(2) 降着流の貫通

sink形成当初は  
電離バブルと  
降着流のラム圧が  
拮抗するが...

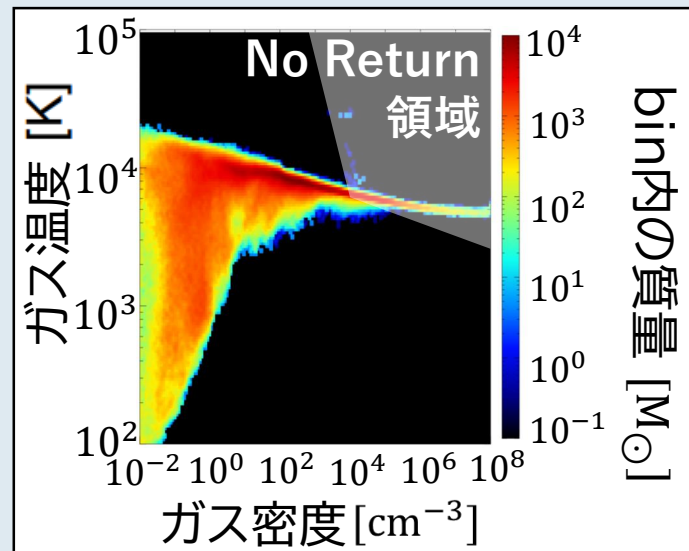
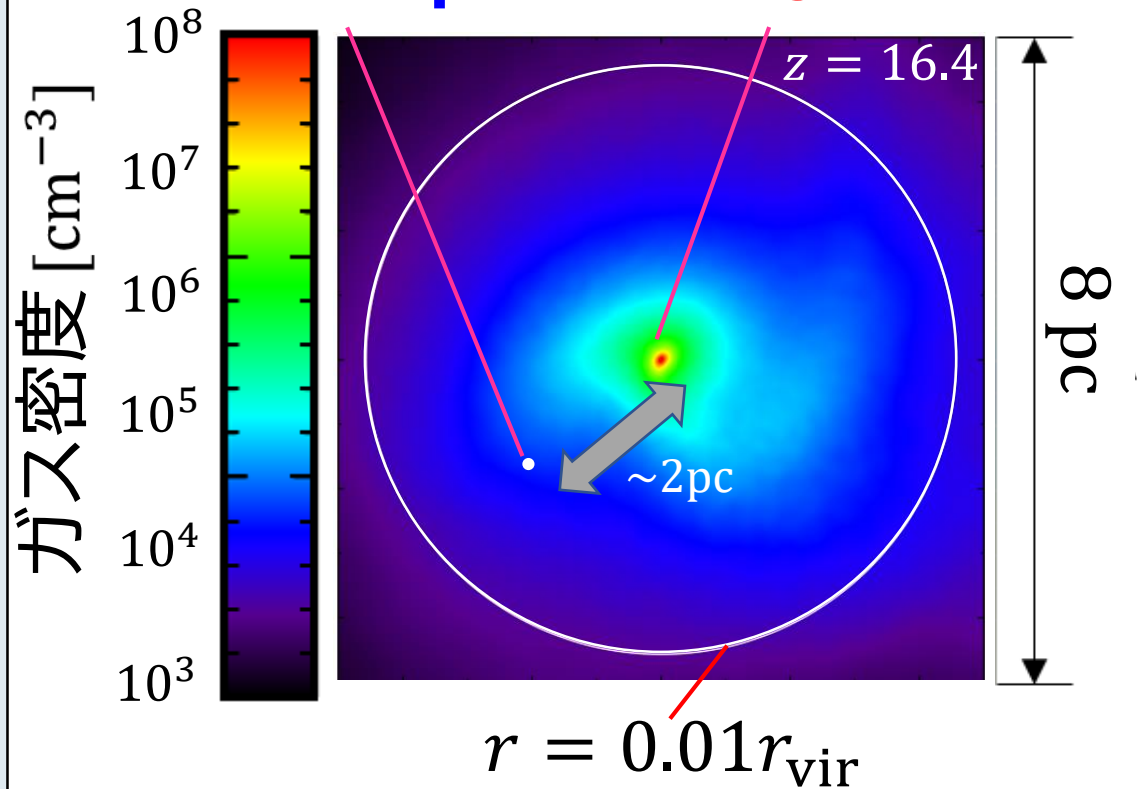


降着流が勝って  
電離バブルが収縮

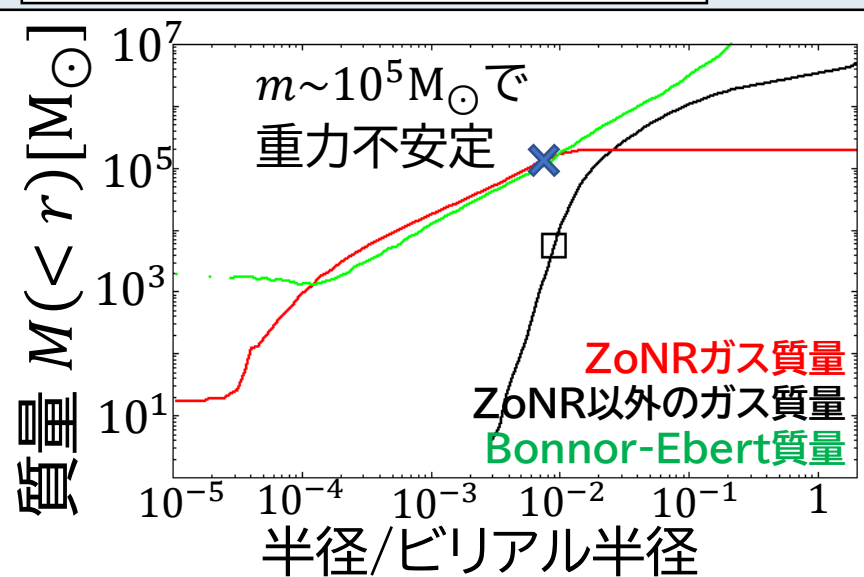
以降、ハロー中心の  
sink付近に  
 $n_{\text{H}} \gtrsim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  
 $T \cong 8000 \text{ K}$ の  
ガスが蓄積

# 結果 超大質量星形成

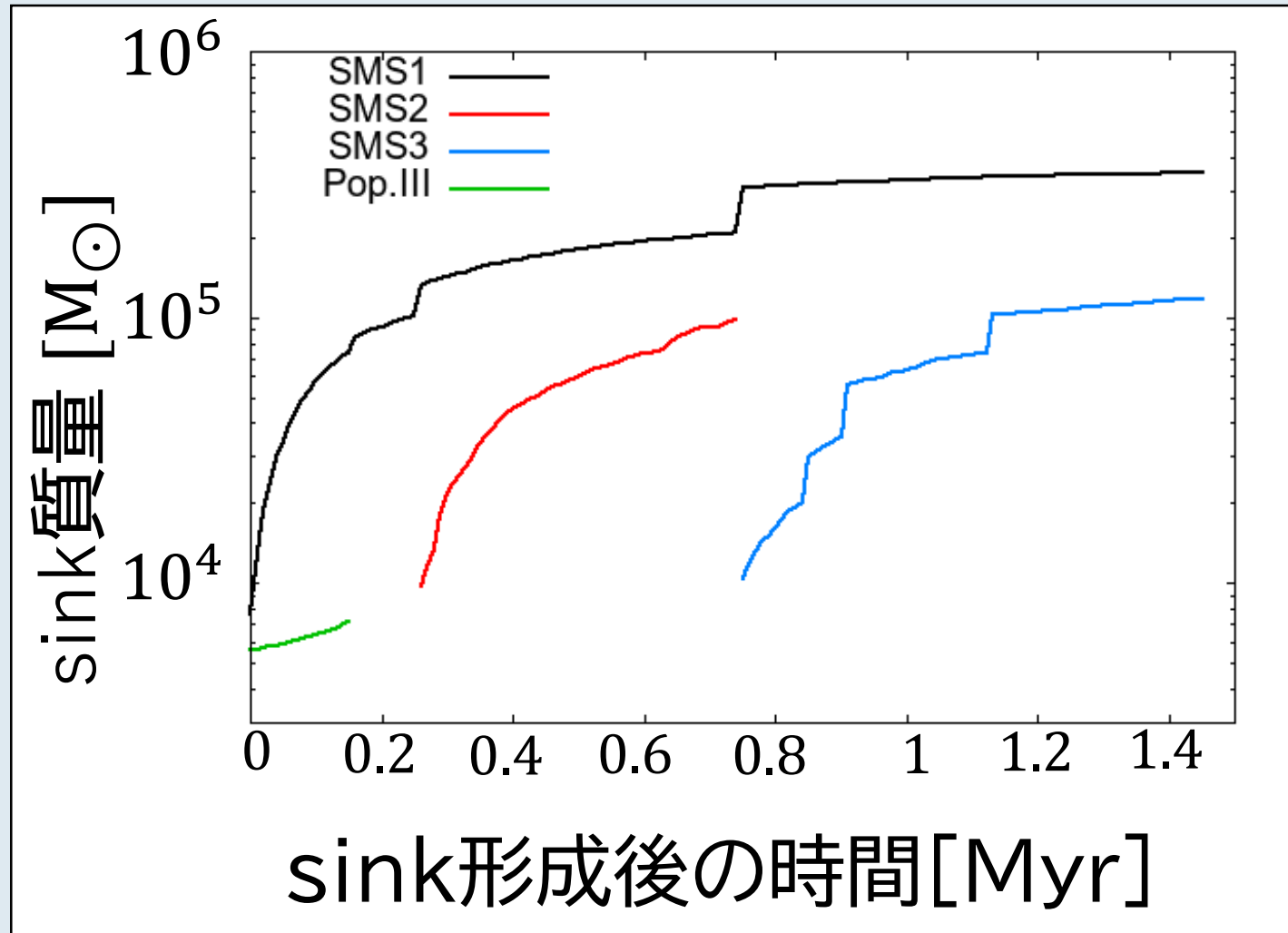
最初のsink 通常のPop. III  
 超大質量星 になるコア



最終質量  
 $m \sim 2 \times 10^5 M_{\odot}$



# 結果 超大質量星形成

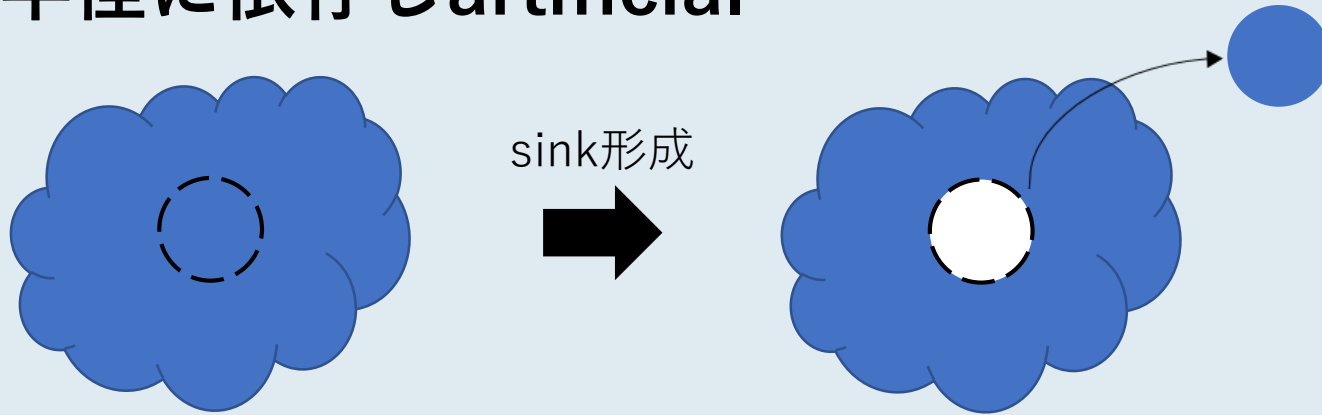


# 議論 最初のsink質量?

最初のsink質量 =  $3000M_{\odot}$  は,

形成時のsink半径内の質量の引き抜きで決定.

**sink半径に依存し artificial**



$$L = 4 \times 10^{41} \text{erg s}^{-1} \left( \frac{m}{3000M_{\odot}} \right)$$

は通常のPop.IIIのほぼ上限  
ちょっと強気すぎ

これを40Myr 引っ張るのもやや非物理的・・・いろいろなパラメータを試す