

# 宇宙論的環境下でのDirect Collapse シナリオによるSMBH の形成可能性

鄭 昇明, 平野 信吾, 細川 隆史, 吉田 直紀  
(東京大学)

# Motivation:

## Super Massive Black Hole at high-z

- $10^9 M_{\text{sun}}$  のSMBH が  $z \sim 7$  ( $= 0.8\text{Gyr}$ ) において既に存在。(⇒右図)

- 種BHへのEddington降着を考えると...

$$\dot{M} \propto M \rightarrow M = M_{\text{ini}} \exp(t / t_E)$$

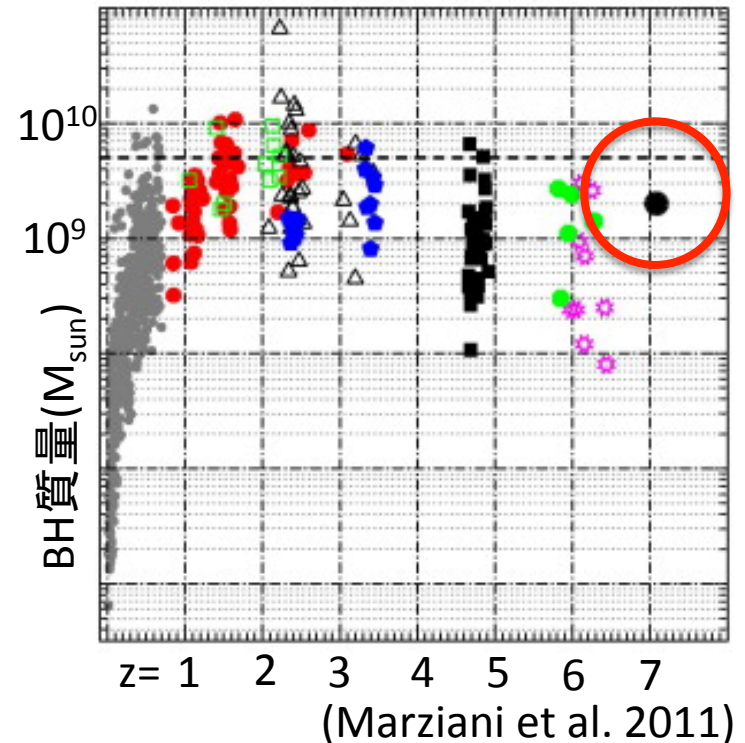
where  $t_E \sim 40\text{Myr}$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{PopII} \Rightarrow M_{\text{ini}} = 1 M_{\text{sun}} \Rightarrow \text{時間が足りない} \\ \text{PopIII} \Rightarrow M_{\text{ini}} = 100 M_{\text{sun}} \Rightarrow M_{\text{BH}} = 10^9 M_{\text{sun}} \text{ at } t=0.6\text{Gyr} \end{array} \right.$$

以上ではEddington降着が続くと仮定した。

しかし、この仮定は現実的でない。(様々なフィードバックのため)

⇒ より重たい種BHから始めると？



# Direct Collapse (DC)

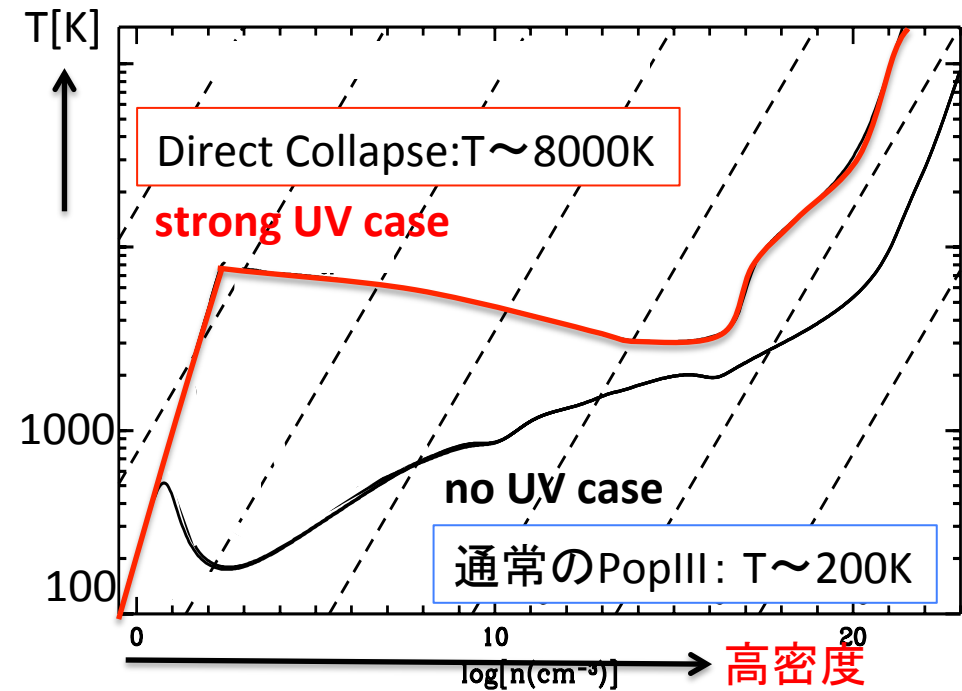
- 大質量星( $\sim 10^5 M_{\text{sun}}$ )の形成パス (at high-z)
  - 近傍銀河からの非常に強い輻射場
- ⇒ H<sub>2</sub>分子が解離 ⇒ atomic cooling path (赤い線)

- 高い降着率が実現

⇒  $\dot{M} \sim M_{\text{J}}/t_{\text{ff}} \sim c_{\text{s}}^3/G \propto T^{\frac{3}{2}}$

⇒ 降着率:  $0.1 \sim 1 M_{\text{sun}}/\text{yr}$

質量:  $\sim 10^5 M_{\text{sun}}$



(Omukai.2001)

# Condition for the Direct Collapse

1. 強い輻射を受けている

⇒ H<sub>2</sub>冷却 ✕

2. 重元素汚染されていない

(星形成を過去に起こしていない)

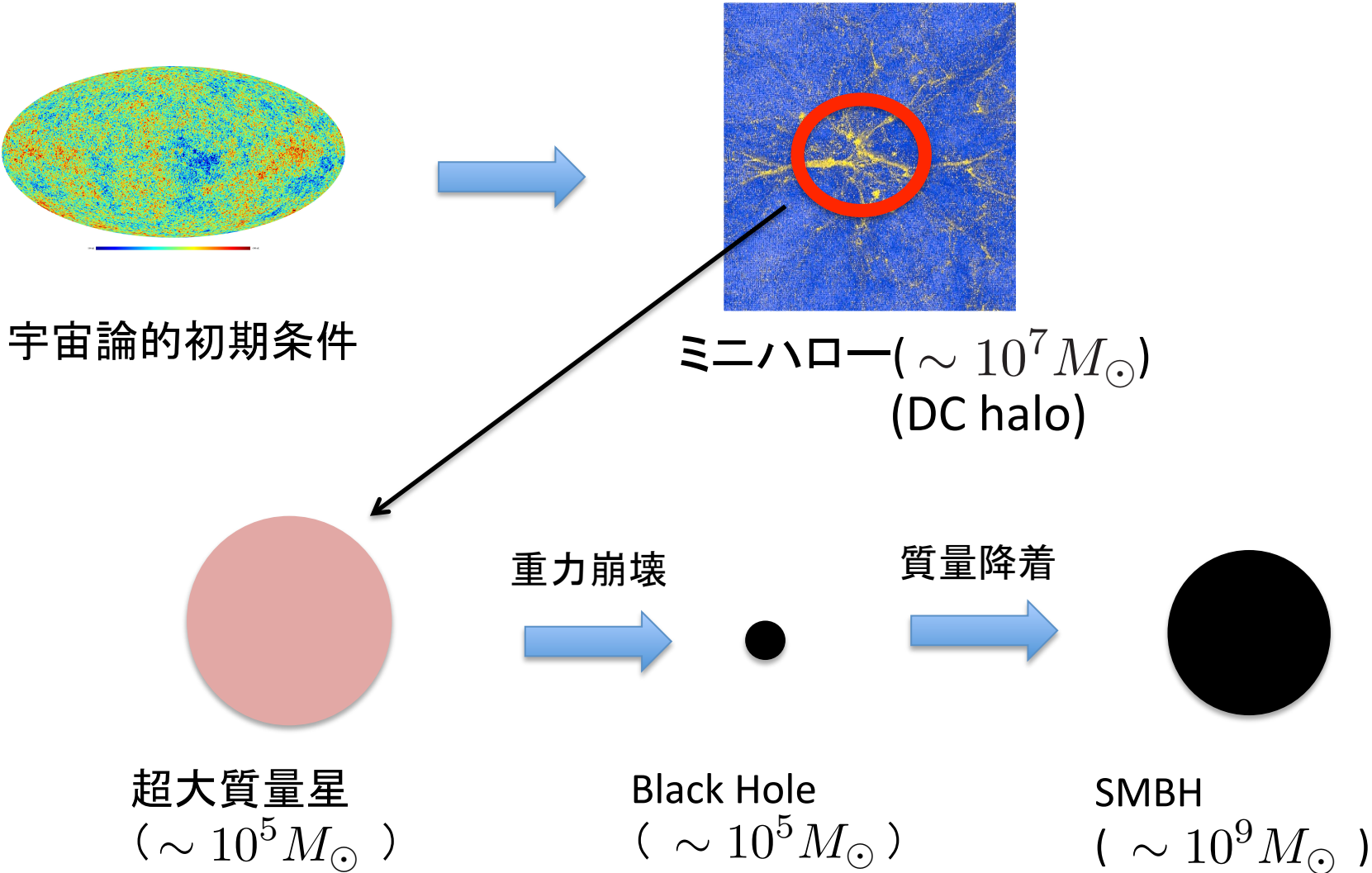
⇒ ダスト・金属輝線による冷却 ✕

3. Hostハローの質量 ( $T_{\text{vir}} \geq 8000\text{K}$ ,  $M_{\text{halo}} \sim 10^7 M_{\odot}$ )

⇒ H原子による冷却 ○

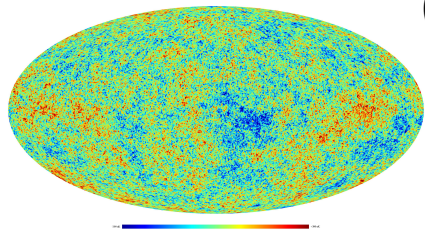
( $T > 8000\text{K}$ で有効)

# Direct Collapse Scenario (DC scenario)

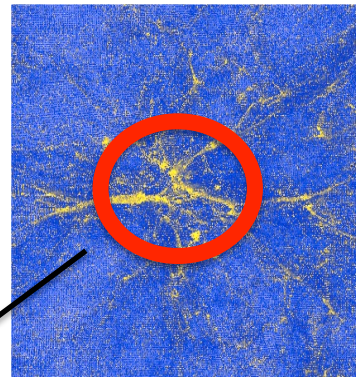


# Direct Collapse Scenario (DC scenario)

## 本研究

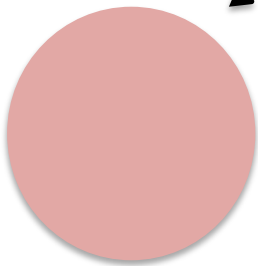


(Agarwal et al. 2012)  
(Johnson et al. 2013)



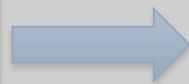
ミニハロー ( $\sim 10^7 M_\odot$ )  
(DC halo)

宇宙論的初期条件



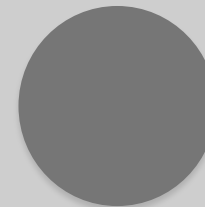
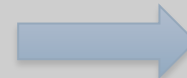
超大質量星  
( $\sim 10^5 M_\odot$ )

重力崩壊



Black Hole  
( $\sim 10^5 M_\odot$ )

質量降着



SMBH  
( $\sim 10^9 M_\odot$ )

# Purpose of this work

1. Direct Collapseを起こすハローは存在するか？

⇒宇宙論的N体計算

⇒DC候補ハローの分布

2. DC候補ハローにおけるガス雲の進化(星形成過程)

⇒流体計算

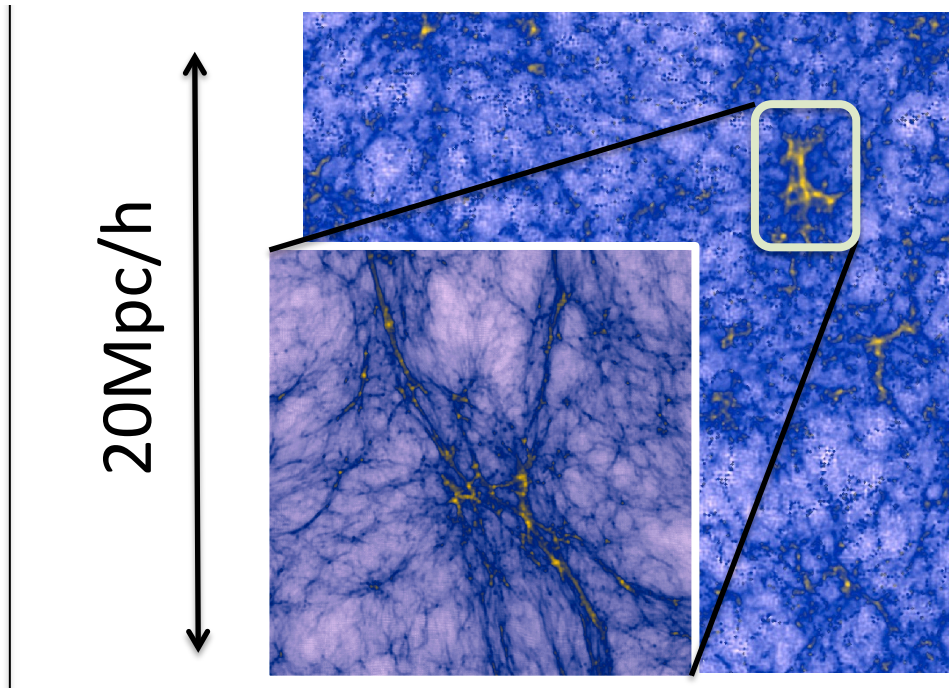
⇒Direct Collapseは実際に起こるか？

本研究では **ガス雲の進化**も合わせて計算することで、宇宙論的にDirect Collapseが起こりうるかを調べる。

# Direct Collapse candidate halo

- N体計算  $\Rightarrow$  DC候補ハローの探索
- 輻射場はハローの星形成史より計算(SAモデル)

N体計算(DMのみ)



ズームイン計算(Gadget-2)

ズームイン領域 :  $2(\text{Mpc}/h)^3$

粒子数 :  $8192^3$

粒子質量 :  $\sim 1.2 \times 10^3 M_{\odot}$

解像度 :  $\sim 1.2 \times 10^5 M_{\odot}$

( $> 100$  粒子 / ハロー)



# Merger Tree

## N体計算の結果より

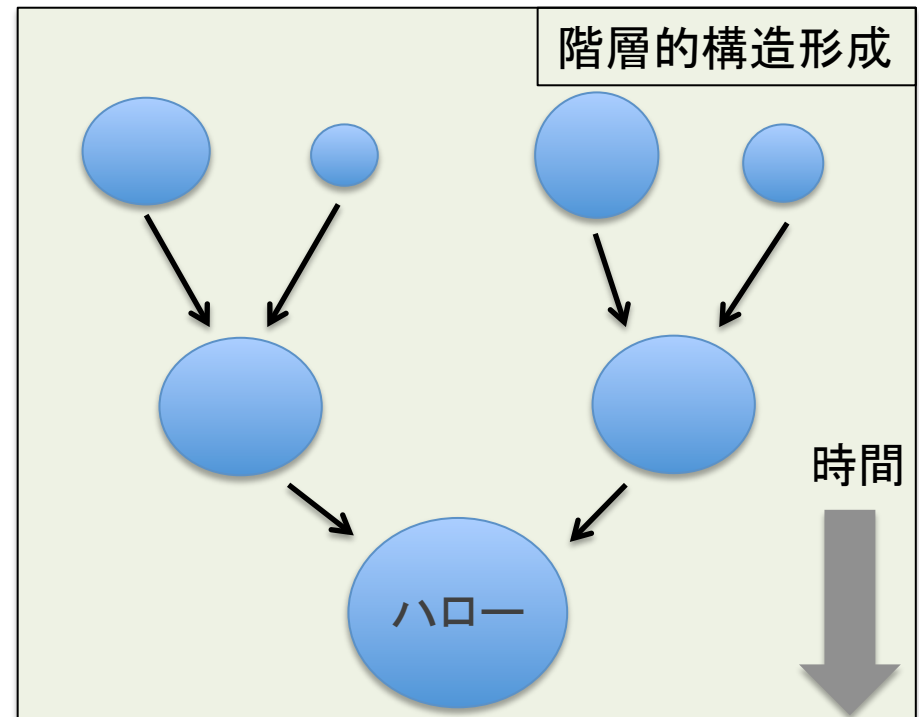
- merger-treeを構築  
(Springel et al, 2001)
- treeの上で、
  1. 銀河における星形成過程  
(SAモデル)
  2. 金属汚染の進行過程  
をモデル化

⇒ 1. 光源を同定

2. 輻射場を計算

3. DCハローの探索

(始原的、強い輻射を受けた、atomic cooling halo)



# The Condition for DC

## 1. 金属汚染

⇒ PopIIIはmini halo ( $M_{\text{halo}} \sim 10^5 M_{\text{sun}}$ ) で形成されると仮定

【実際には、輻射の影響も考慮 ⇒  $M_{\text{halo}} = M_{\text{halo}}(J_{21})$   
(O'shea & Norman, 2008)】

## 2. 光源の形成

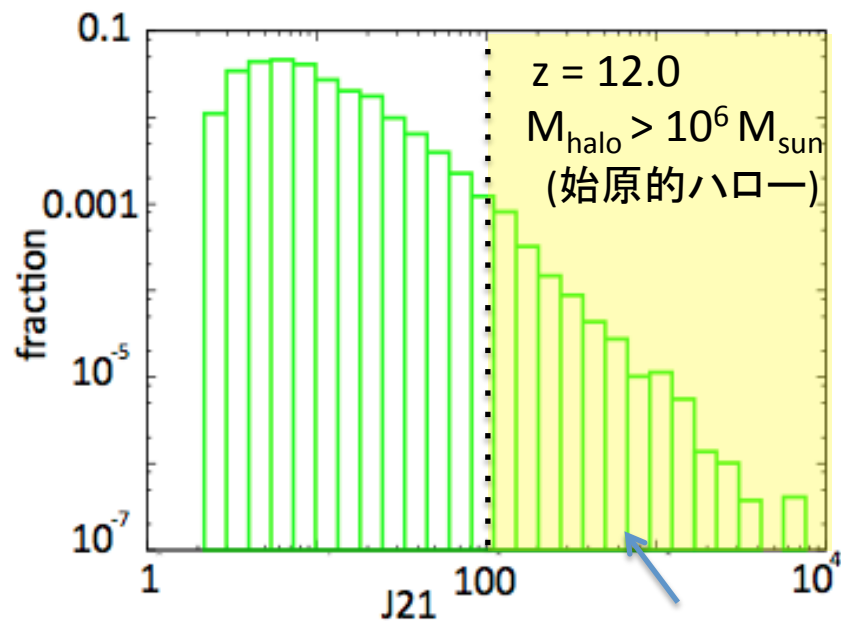
⇒ ハローにおける「ガスの冷却、星形成、フィードバック」の過程を準解析的に計算



# UV field

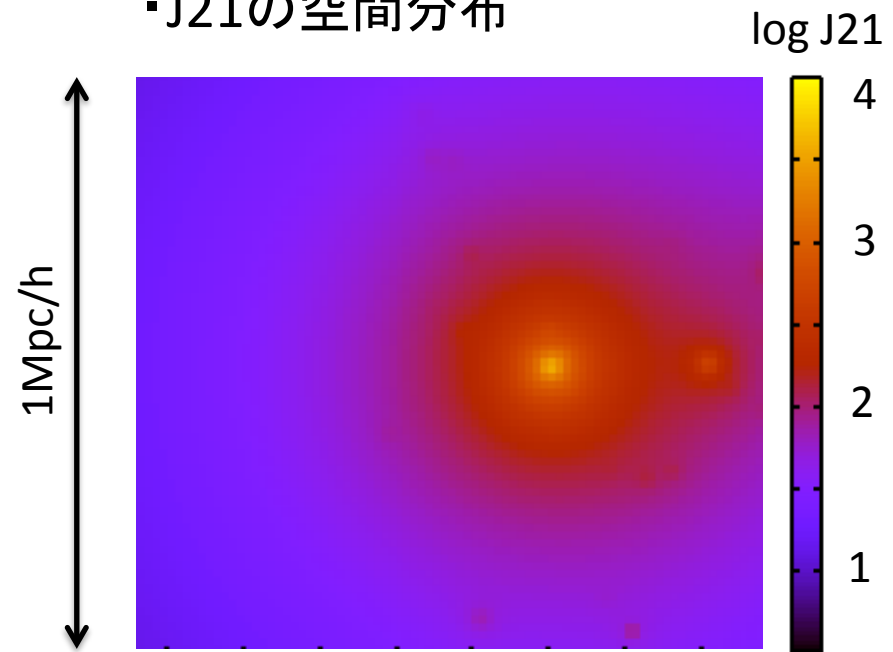
- 2つのズームイン領域について、 $z \sim 8$ まで計算

- ハロー中心におけるJ21の分布



DCが起こるのに十分な輻射場

- J21の空間分布



$$J_{21} = 10^{-21} \text{ erg/s/cm}^2/\text{Hz/str}$$

- DCに必要な輻射場  $\Rightarrow J_{21} > 100$  (Shang et al. 2010)

# DC candidate halo

- 10個のDC候補ハローが存在

	$M_{\text{halo}}[M_{\odot}]$	$z$	distance to the light source [kpc]	$t_{\text{ff}}[\text{Myr}]$
DC0	$8.6 \times 10^6$	16.2	3.0	40
DC1	$8.2 \times 10^6$	15.3	3.3	40
DC2	$9.1 \times 10^6$	13.8	7.3	120
DC3	$9.3 \times 10^6$	13.5	4.5	60
DC4	$1.0 \times 10^7$	12.4	3.7	40
DC5	$1.2 \times 10^7$	11.6	2.7	60
DC6	$1.1 \times 10^7$	13.7	2.7	50
DC7	$9.1 \times 10^6$	13.7	2.7	50
DC8	$1.0 \times 10^7$	12.8	3.9	90
DC9	$1.2 \times 10^7$	10.9	4.0	40



流体計算

⇒ 光源からの距離 $\sim 4\text{kpc}$ ,  $t_{\text{ff}} \sim 5000\text{万年}$   
(光源のビリアル半径 $\sim 2.5\text{kpc}$ )

# Evolution of gas cloud in DC halo

- DCハローの数  $\Rightarrow 10$
- 1つのサンプルに関して、ガス雲の進化を計算

セットアップ:

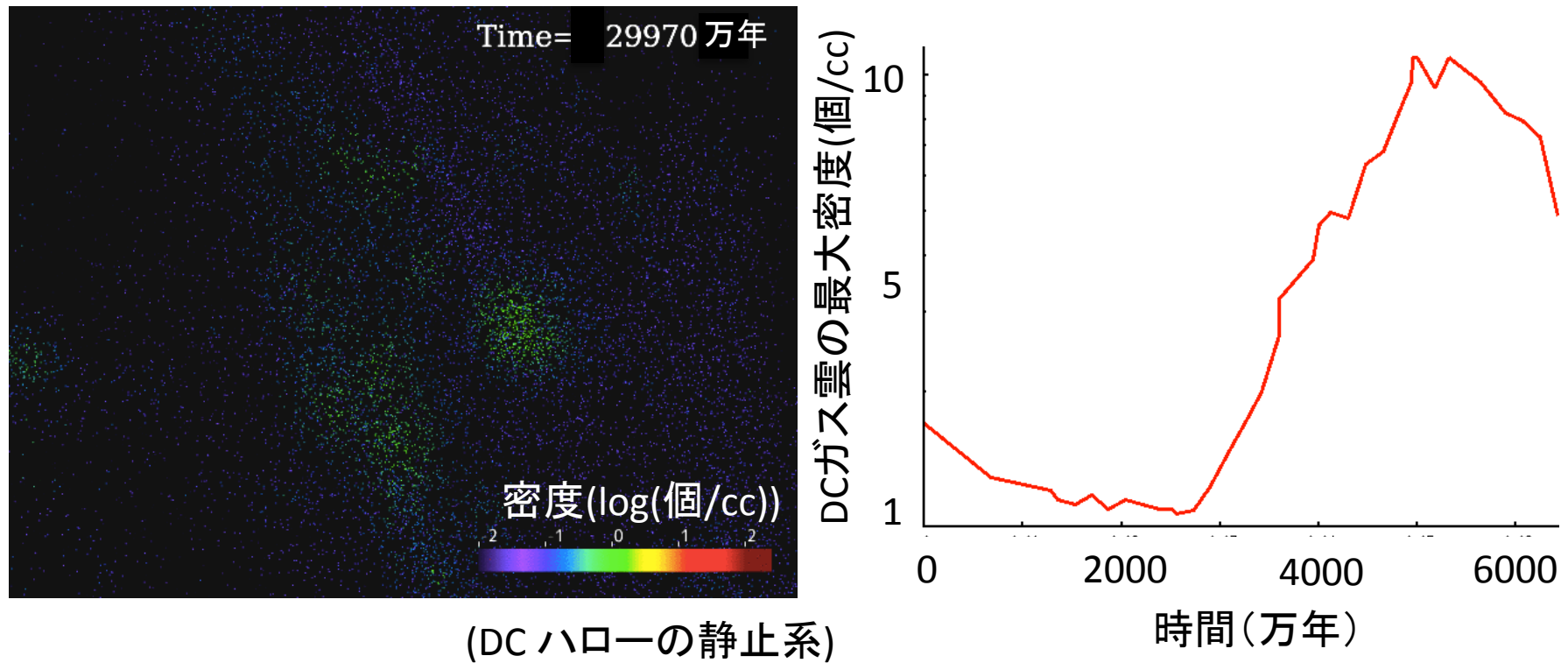
- Gadget3 (sph + N-body)
- 始原的化学反応ネットワーク (Yoshida et al. 2006)  
+ H<sub>2</sub>解離反応 (Omukai, 2001)
- 放射・化学反応による冷却過程

$\Rightarrow$  Direct Collapseは起きず

$\Rightarrow$  DC候補ハローが重たい光源ハローに近すぎるのが原因と考えられる。

# DCガス雲の進化

- ・DCハローのビリアル温度が8000K達した後、7000万年の進化を計算



⇒6000～7000万年で光源に落ち込む。

# Why Direct Collapse didn't occur?

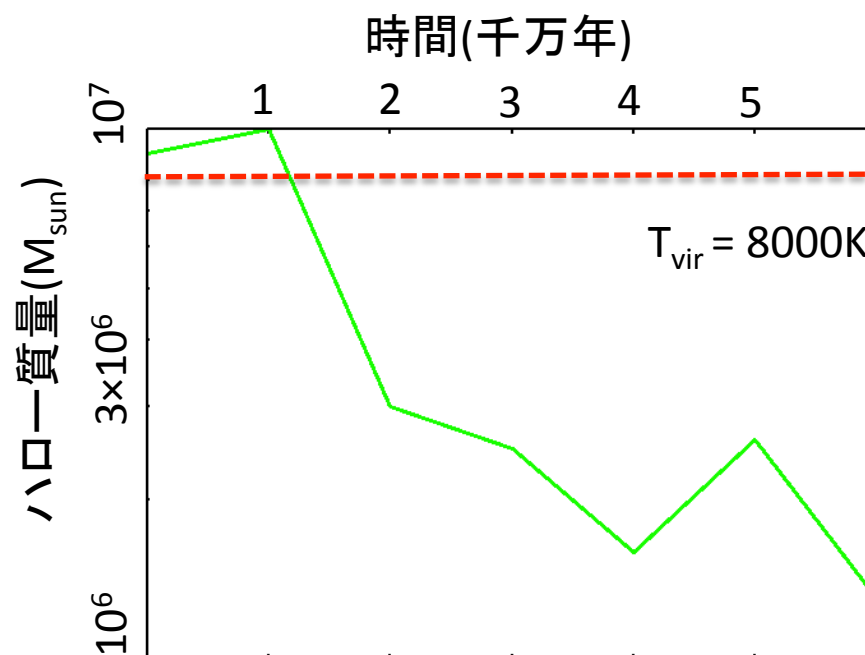
- ・崩壊にかかる時間  $\Rightarrow$  ガス雲の dynamical time 程度  
(Hirano et al. 2015)

$$t_{\text{dyn}} = 3.4 \times 10^7 \text{ yr} \left( \frac{n_{\text{H,vir}}}{1/\text{cc}} \right)^{-0.5} \Rightarrow 2000 \sim 3000 \text{ 万年}$$

## 1. 光源ハローからの潮汐力

DC候補ハローの質量が光源ハローの潮汐力によって減少する。

$\Rightarrow$  水素原子冷却が効かなくなる。



# 光源ハローからの潮汐力

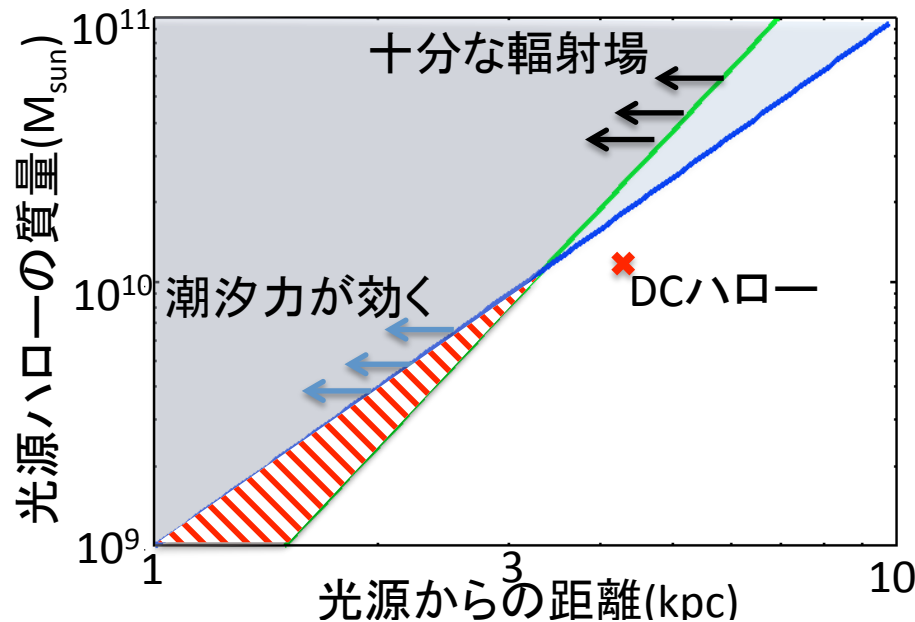
- 潮汐半径  $r_{\text{tid}}$  (DCハロー)

$$r_{\text{tid}} = \sqrt[3]{\frac{m}{3M}} R = 0.28 \text{kpc} \left( \frac{R}{4 \text{kpc}} \right)$$

( $M = 10^{10} M_{\text{sun}}$ ,  $m = 10^7 M_{\text{sun}}$  を仮定)

$$r_{\text{vir}} = 0.21 \text{kpc} \left( \frac{15}{1+z} \right)$$

$\Rightarrow R \sim 3 \text{kpc}$ より、潮汐力が効き始める



DCに必要な輻射場:

$$J_{21} (\propto M/R^2) > J_{\text{crit}} = 100$$

(Iliev et al, 2006)

潮汐力:  $r_{\text{tid}} < r_{\text{vir}}$

$$\Rightarrow M/R^3 > 4 \times 10^8 M_{\text{sun}} / \text{kpc}^3$$



# まとめ

1. N体計算よりMerger Treeを構築し、DC候補ハローを探索。  
⇒DC候補ハローの数  $< 10$ 個/ $(4(\text{Mpc}/h)^3)$   
⇒先行研究とconsistent
2. DC候補ハローにおけるガス雲の進化を計算  
⇒1例について計算  
⇒Direct Collapse起こらず、光源ハローとmergeしてしまう

