

# 初期宇宙における 巨大ブラックホールの種形成

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

- $10^9 M_\odot$  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...

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

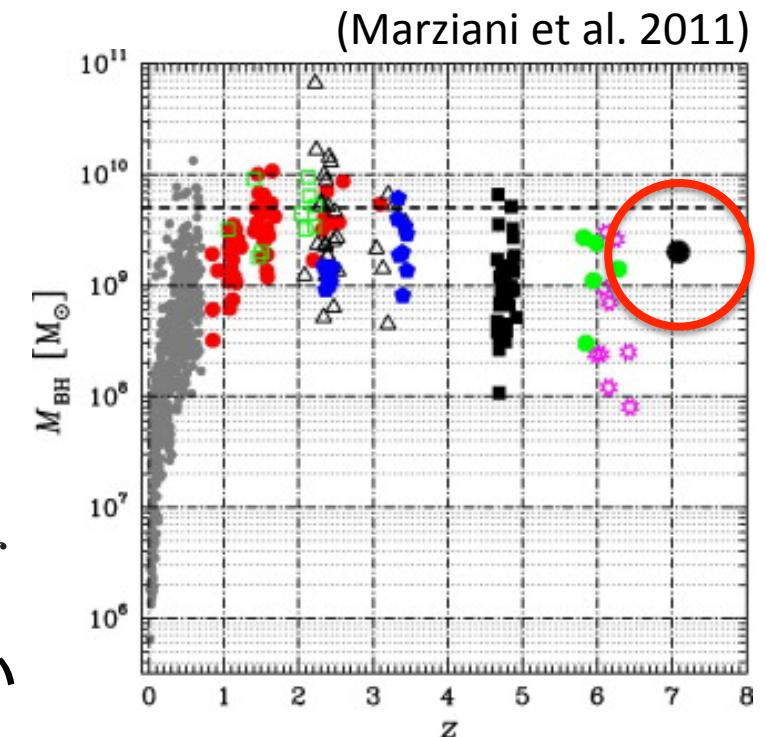
where  $t_E \sim 40\text{Myr}$

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

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)

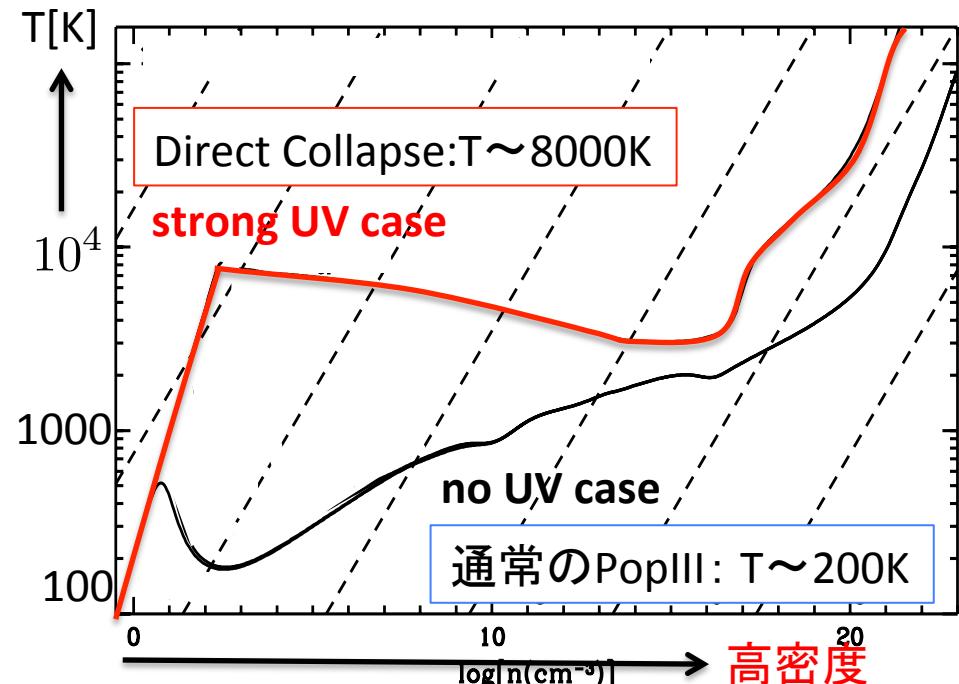
- 大質量星( $\sim 10^5 M_\odot$ )の形成パス (at high-z)
- 近傍銀河からの非常に強い輻射場  
 $\Rightarrow \text{H}_2\text{分子が解離} \Rightarrow \text{atomic cooling path}$  (赤い線)

- 高い降着率が実現

$$\Rightarrow \dot{M} \sim M_J/t_{\text{ff}} \sim c_s^3/G \propto T^{\frac{3}{2}}$$

$$\Rightarrow \text{降着率: } 0.1 \sim 1 M_\odot/\text{yr}$$

質量:  $\sim 10^5 M_\odot$

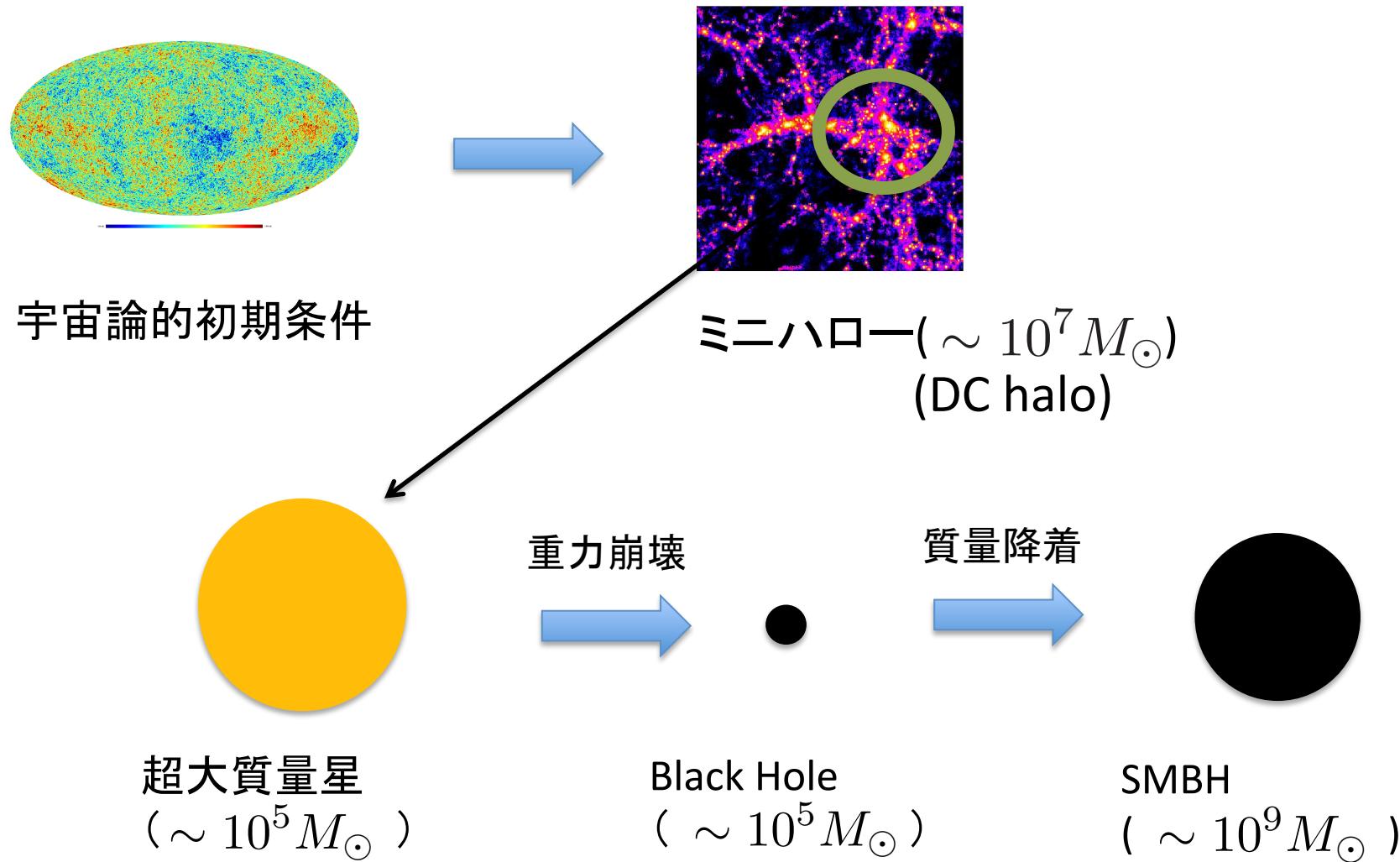


(Omukai.2001)

# Condition for the Direct Collapse

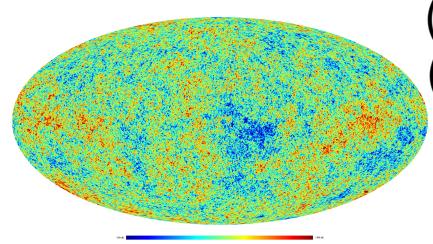
1. 強い輻射を受けている  
⇒ H<sub>2</sub>冷却 
2. 重元素汚染されていない  
(星形成を過去に起こしていない)  
⇒ ダスト・金属輝線による冷却 
3. Hostハローの質量 ( $T_{\text{vir}} \geq 8000\text{K}$ ,  $M_{\text{halo}} \sim 10^7 M_{\odot}$ )  
⇒ H原子による冷却   
(T > 8000Kで有効)

# Direct Collapse Scenario (DC scenario)

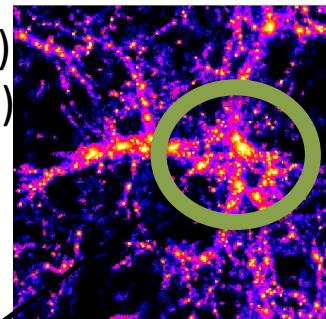


# Direct Collapse Scenario (DC scenario)

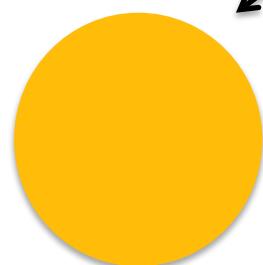
本研究



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



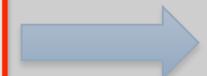
宇宙論的初期条件



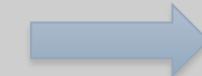
超大質量星  
( $\sim 10^5 M_{\odot}$ )

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

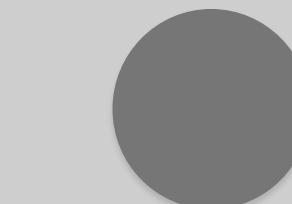
重力崩壊



質量降着



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



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？

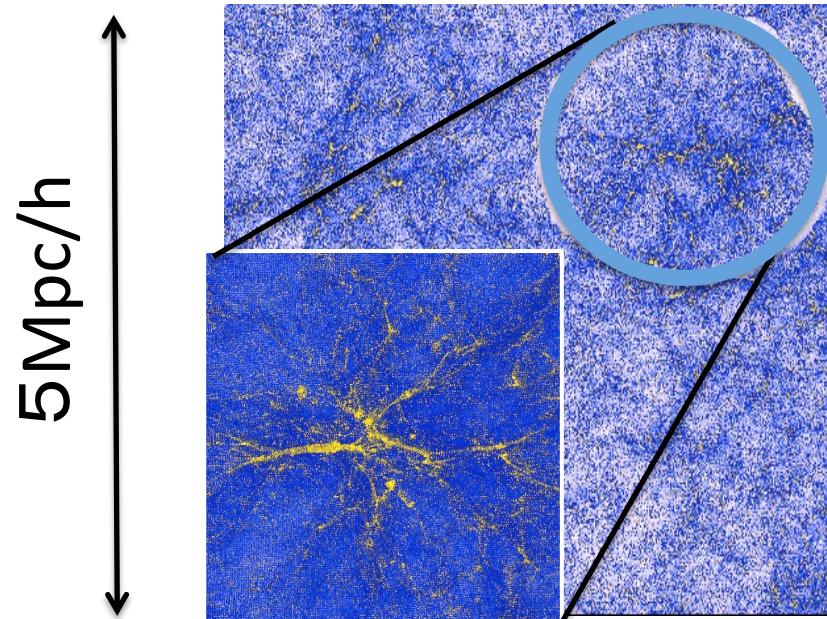
先行研究では1に焦点を当てている。

本研究では、**ガス雲の進化**も合わせて計算する。

# Direct Collapse candidate halo

- N体計算  $\Rightarrow$  DC候補ハローの探索
- 輻射場はDMの分布より計算(後述)

N体計算(DMのみ) \_\_\_\_\_



ズームイン計算(Gadget-2)

ズームイン領域 : 半径  $1.2 \text{ Mpc}$

粒子数 :  $2048^3$

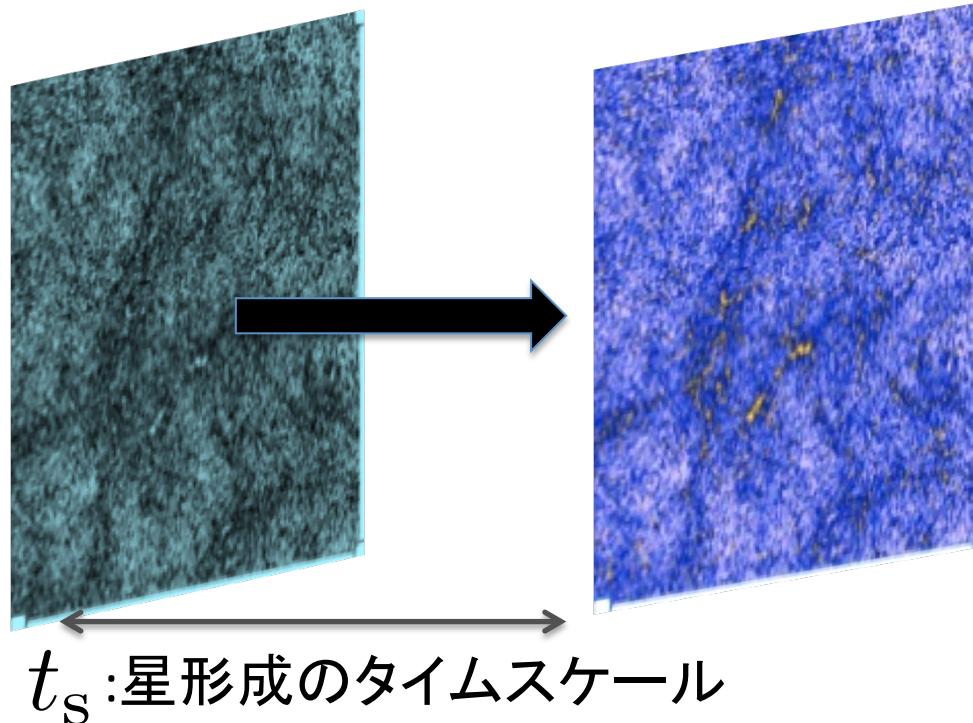
粒子質量 :  $\sim 1.2 \times 10^3 M_\odot$

解像度 :  $\sim 1.2 \times 10^5 M_\odot$

( $> 100$  粒子 / ハロー)  
8

# Calculation of UV field

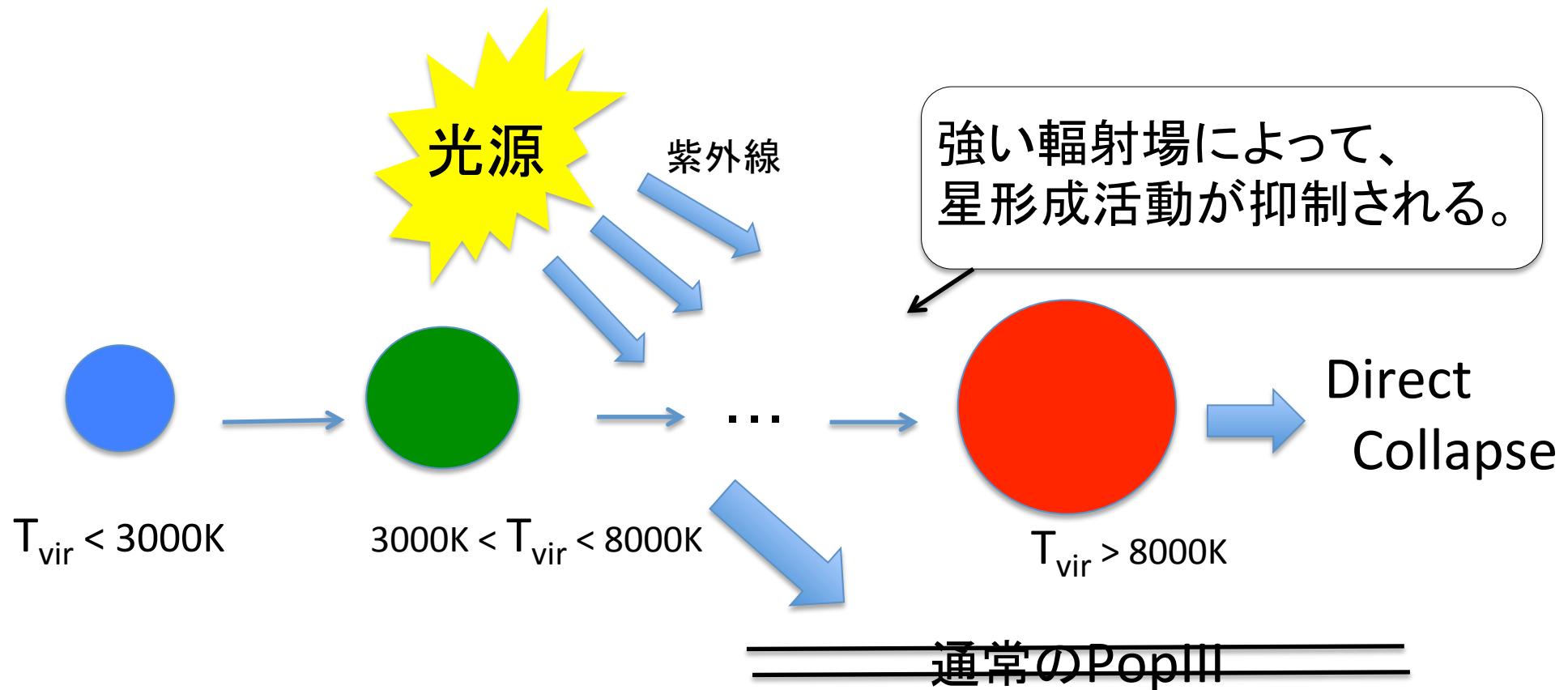
- DMハローは $\varepsilon_{\text{duty}}$ の確率で光っている。  
 $\varepsilon_{\text{duty}}$ : (星形成のタイムスケール)/(Hubble time)  
～0.2
- ハローの光度 ⇒ mass-to-light ratio 一定  
(Iliev et al. 2006)



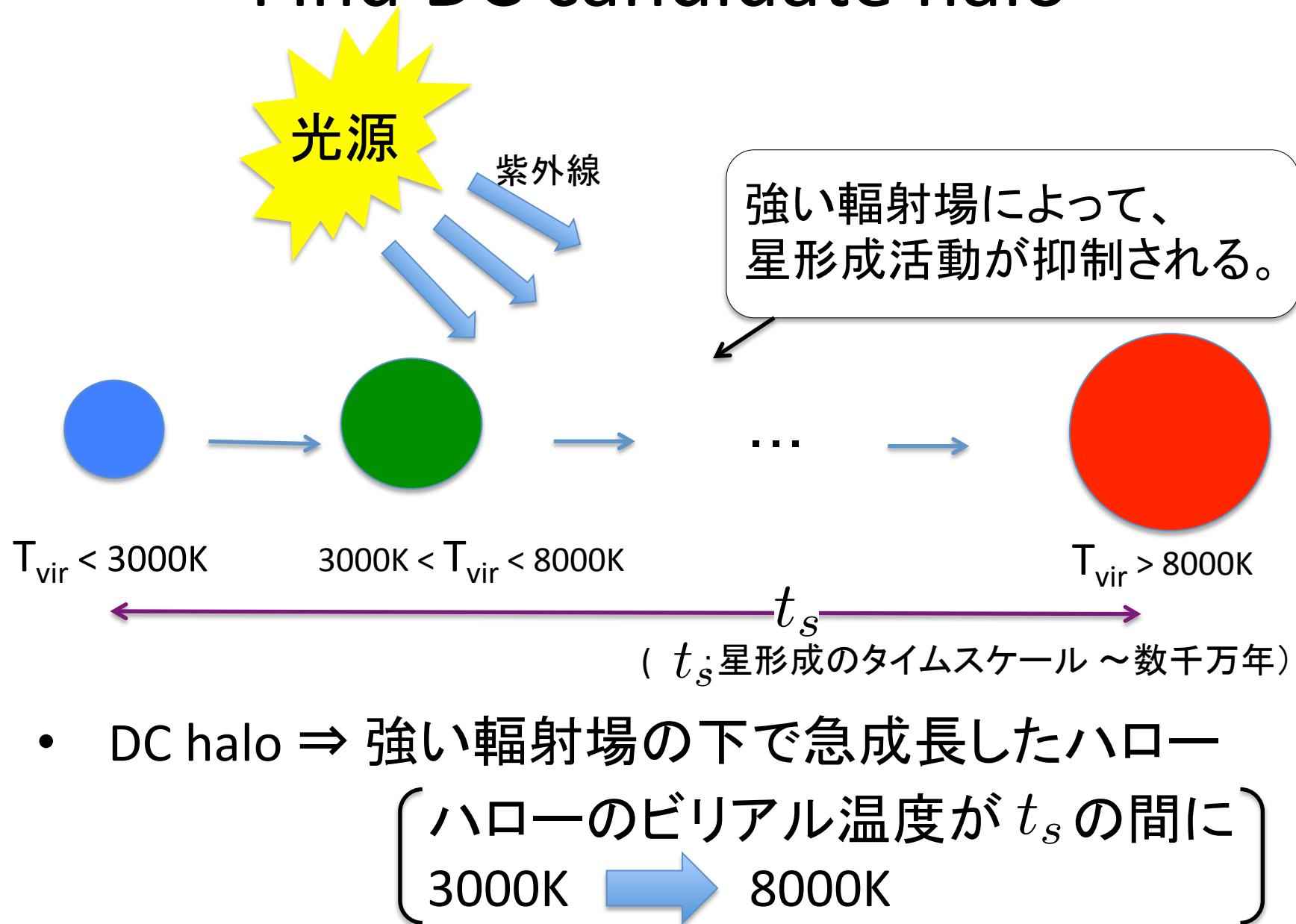
2つのsnapshotを比較  
(間隔=  $t_s$ )  
最も急速に成長している  
ハロー (massの比で)  
にluminosityを与える。

# Find DC candidate halo

- DC 候補ハロー  $\Rightarrow$  光源の近傍に存在



# Find DC candidate halo



# Evolution of gas cloud in DC halo

- DCハローの数  $\Rightarrow 11$  ( $t_s = 8000$ 万年)
- 2つのサンプルについて、ガス雲の進化を計算

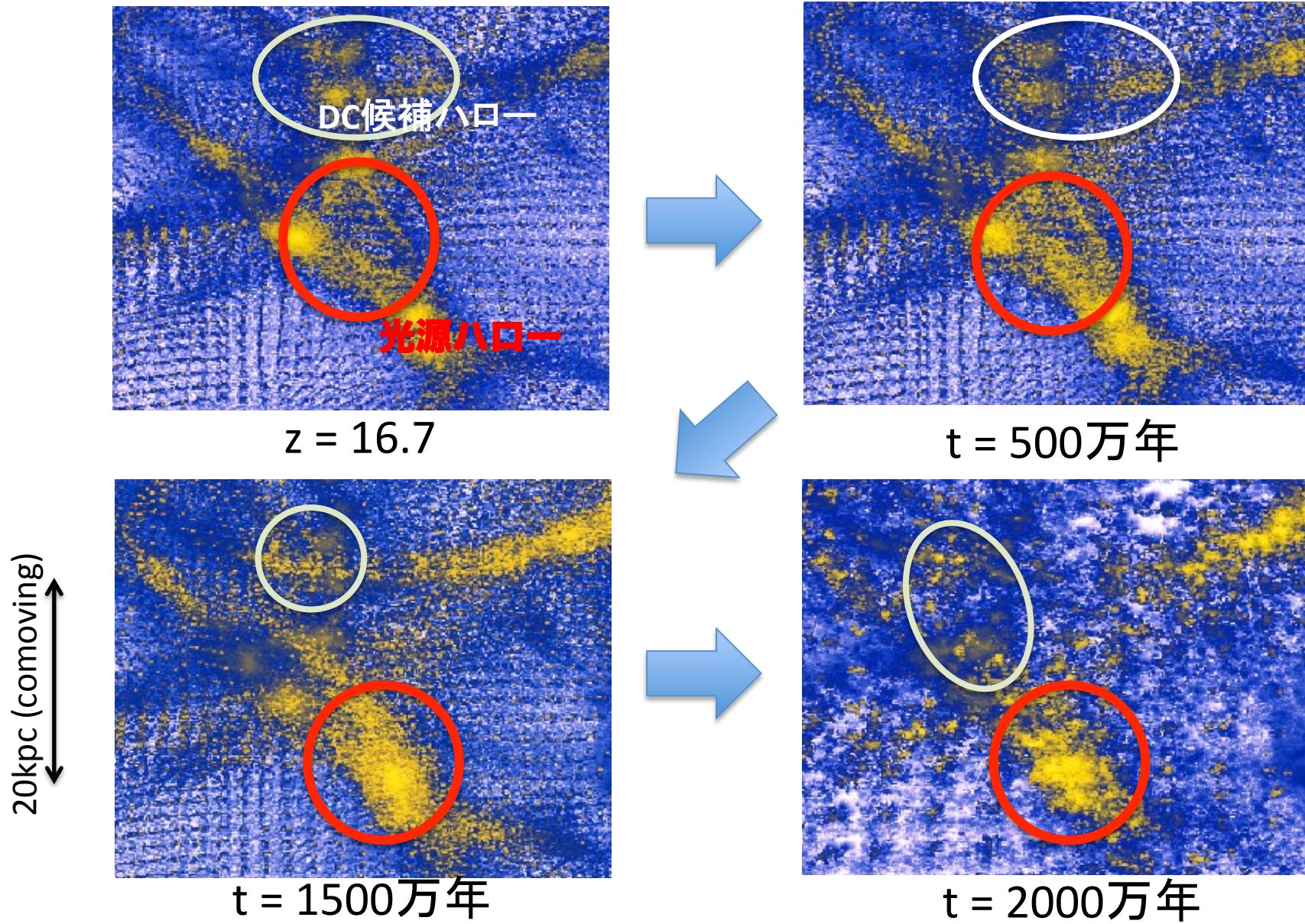
セットアップ:

- Gadget3 (sph + N-body)
- 始原的化学反応ネットワーク (Yoshida et al. 2006)
- 放射・化学反応による冷却過程

$\Rightarrow$  いずれの場合でも 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** ( $\sim R_{\text{vir}}$ )  
ことが原因と考えられる。

# Evolution of DC halo(1例)

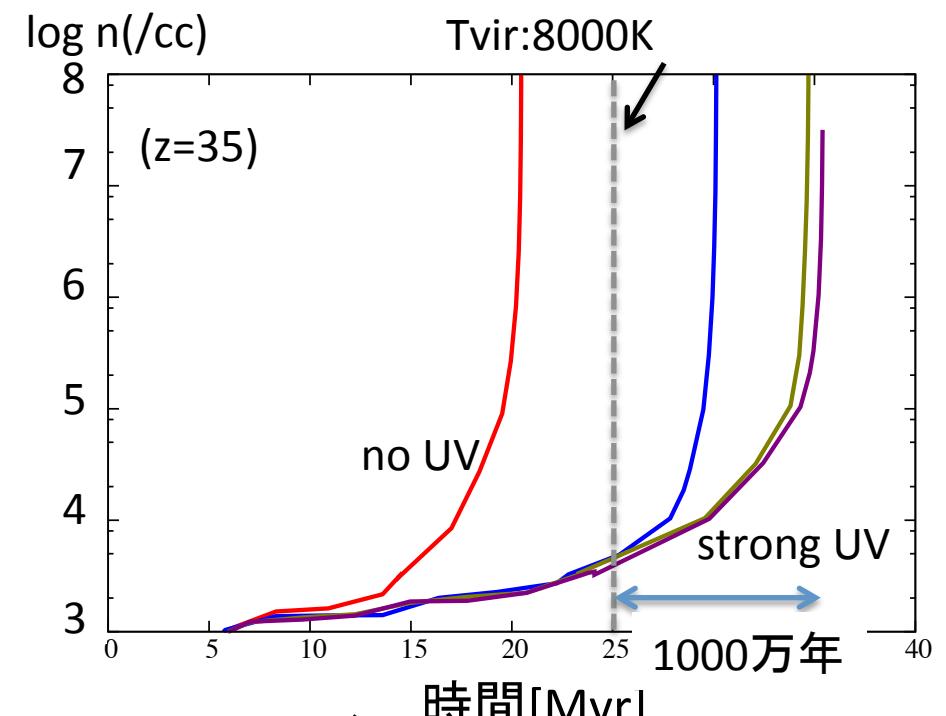


# Why Direct Collapse didn't occur?

1. DC 候補ハローは激しくmergerを起こしている。  
⇒ ビリアライズするのが遅れる。

2. 強い輻射場によって、ガス雲の崩壊が遅れる。

・(右図)強い輻射場のもとでのガス雲の進化  
⇒ ガス雲の崩壊が始まるのが数千万年程度遅れる。



1, 2 ⇒ Direct Collapseは起きず

# Merger Tree

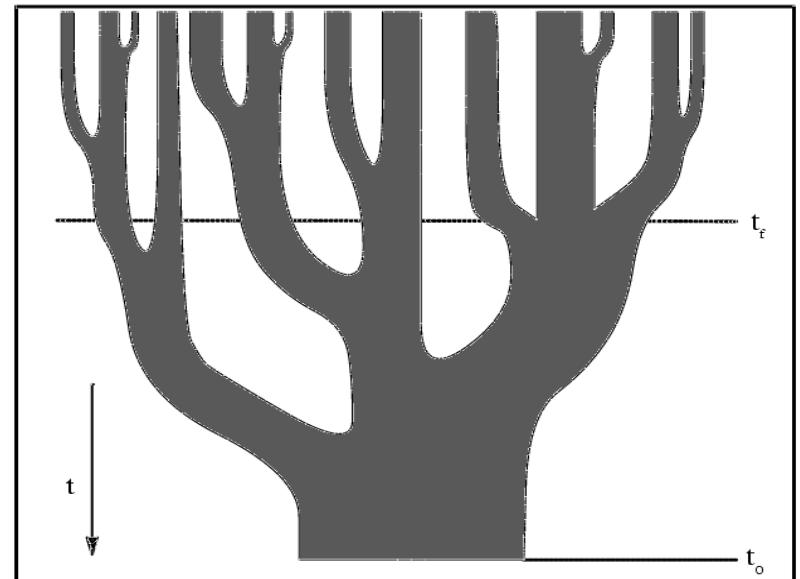
- Improve the “DC halo” identification **in bigger box**

1. N体計算の結果より

- merger-treeを構築
- 銀河における星形成過程を  
モデル化 (SA model)

- ⇒ 1. 光源を同定  
2. 輻射場をモデル化  
3. DCハローの探索

2. DCハローにおけるガス雲の進化を計算  
⇒ DCが起こるか調べる



(Lacey & Cole, 1997)

# The Condition for DC

## 1. 金属汚染

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

## 2. 光源の形成

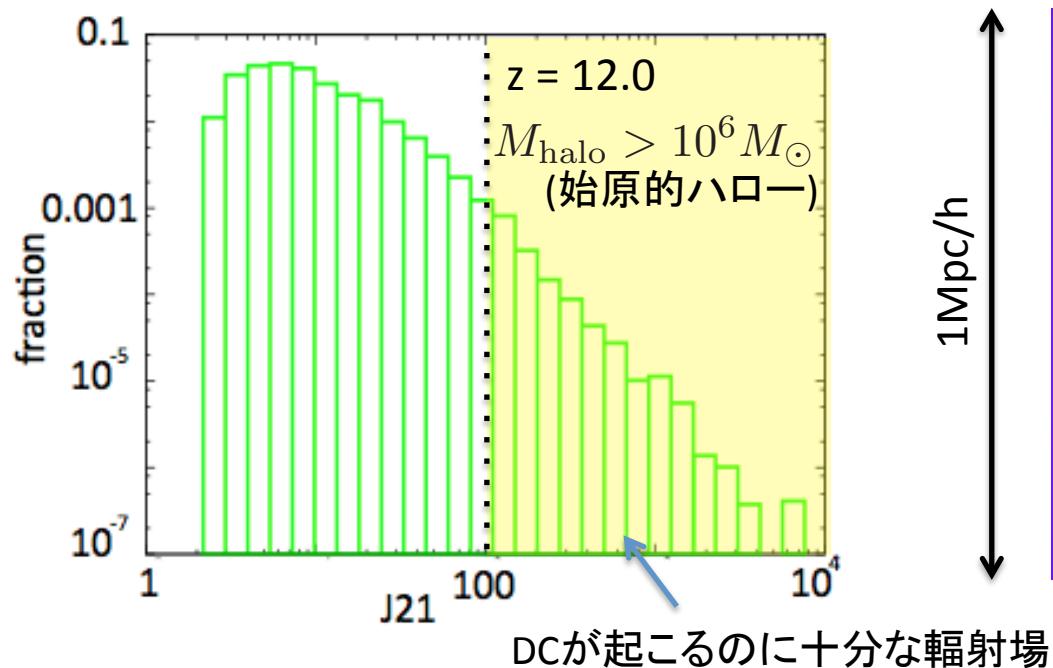
⇒ハローにおける「ガスの冷却、星形成、フィードバック」  
の過程をモデル化



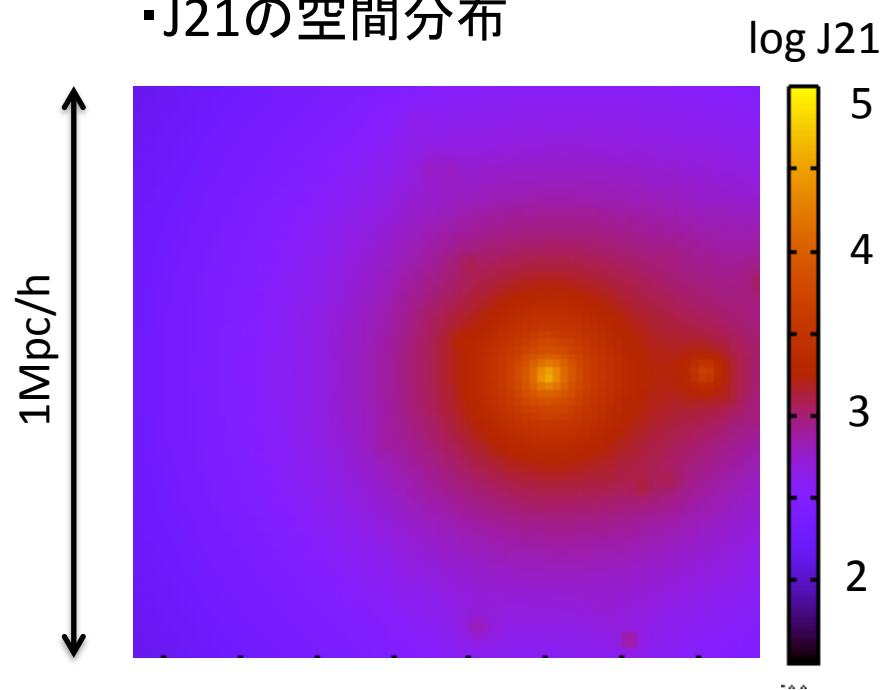
# UV field

- $(20 \text{ Mpc}/\text{h})^3$  のボックス内の $(1\text{Mpc}/\text{h})^1$ の領域をズームイン計算

- ハロー中心におけるJ21の分布



- J21の空間分布

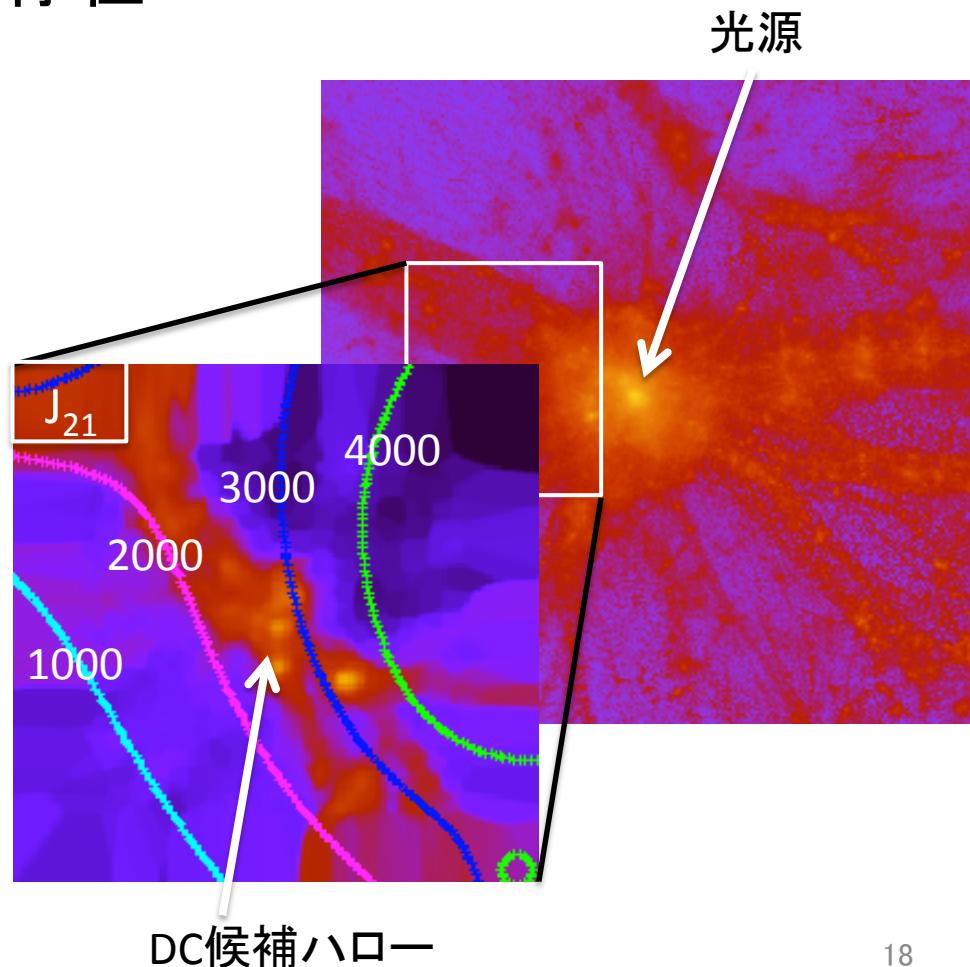
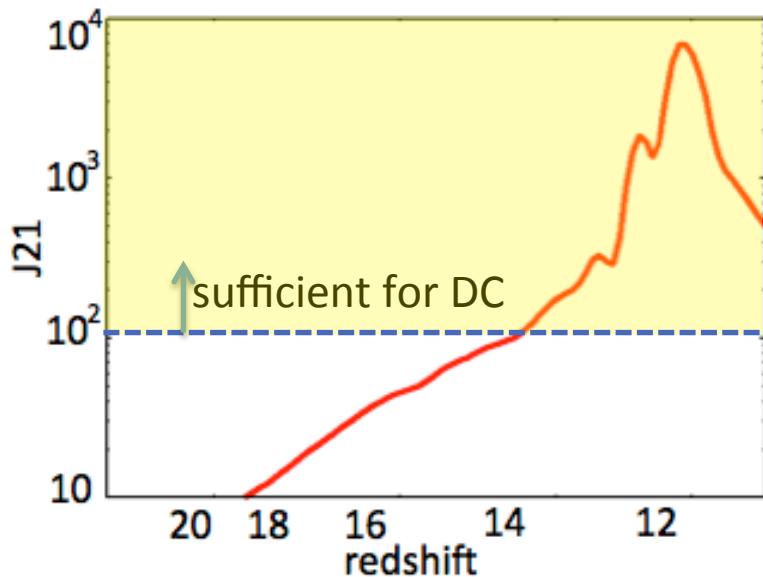


$$J_{21} = 10^{-21} \text{ erg/s/cm}^2/\text{Hz/str}$$

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

# Result

- 3つのDC候補ハローが存在
- 1例について計算中

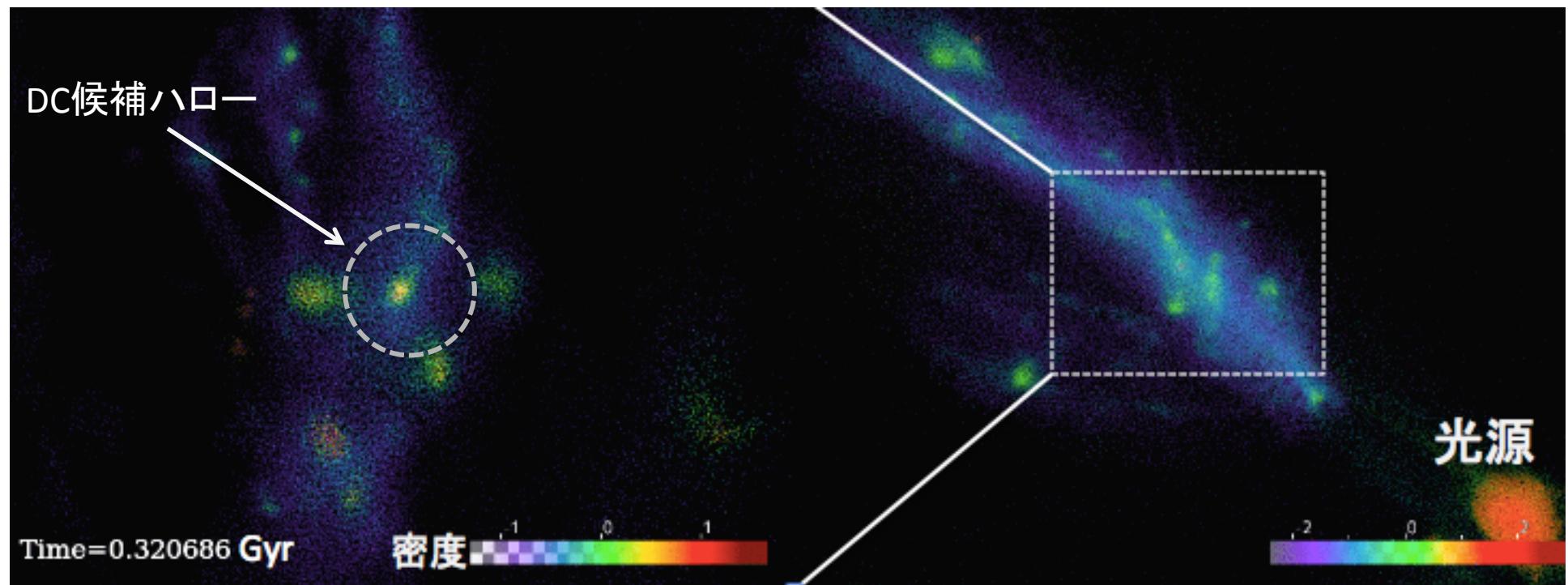


# DCハローの進化

DCハローがAtomic Cooling Halo( $T_{\text{vir}} > 8000\text{K}$ )になった瞬間から、6000万年の進化を計算。

DC候補ハロー周辺

全体図

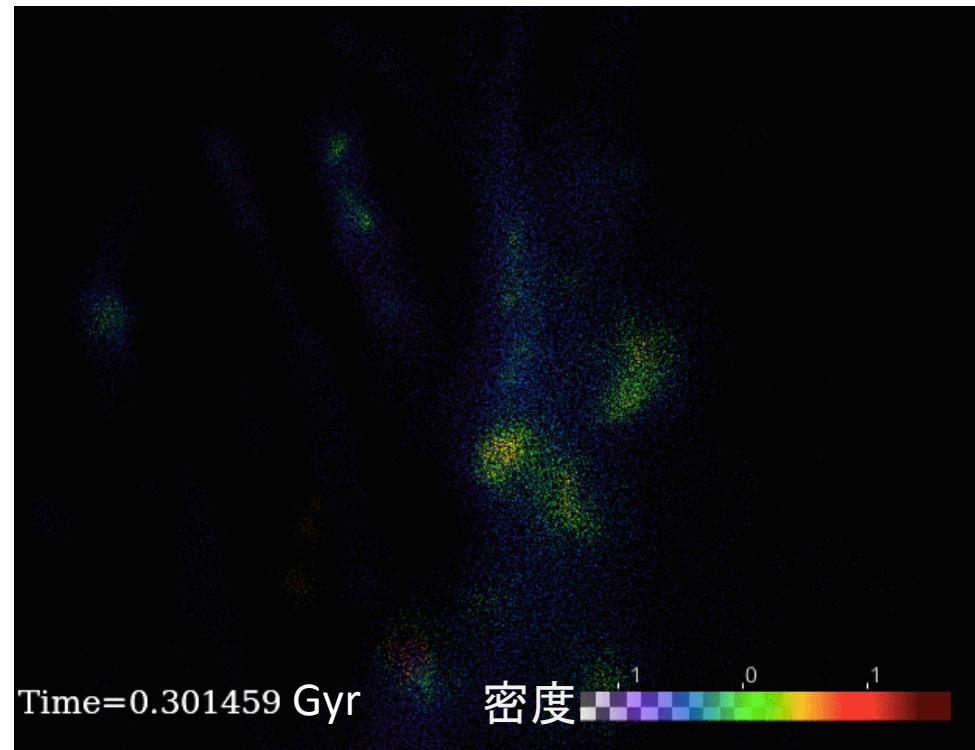


(DCハローの静止系)

# DCハローの進化

DCハローがAtomic Cooling Halo( $T_{\text{vir}} > 8000\text{K}$ )になった瞬間から、6000万年の進化を計算。

DC候補ハロー周辺



全体図



光源

(DCハローの静止系)

# DCが起らなかった原因

- 前の結果と同様にDCハローにおいて、  
Direct Collapseは起らなかった。
- SAモデルには入っていない効果が影響している?
  - 近傍のハローからの潮汐力、等

# まとめ

1. ダークマター分布から輻射場をモデル化し、DC候補ハローを探索。  
⇒DC候補ハローの数 < 11個/(5Mpc)<sup>3</sup>  
⇒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  
⇒2例について計算  
⇒いずれもDirect Collapseせず、光源ハローとmergeしてしまう