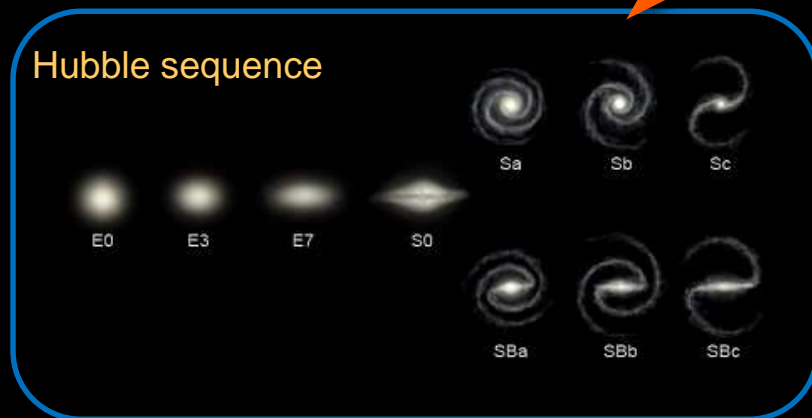
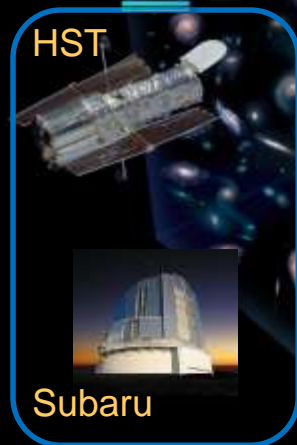


# 南極テラヘルツ望遠鏡と 銀河形成・進化シミュレーション

森正夫  
筑波大学計算科学研究センター



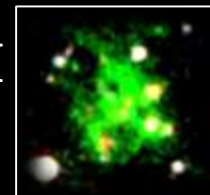
Galaxy A1689-zD1:  
~700 million years  
after the Big Bang

0年: 宇宙開闢  
Big Bang

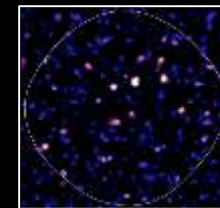
Radiation era

30万年: 宇宙暗黒時代  
~300,000 years: の到来

LAE



SMG



ERO

DRG

LBG

ETC

BzK

Galaxies evolve

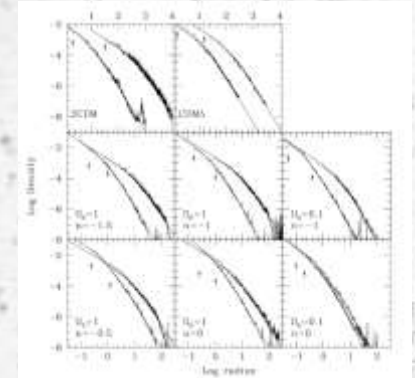
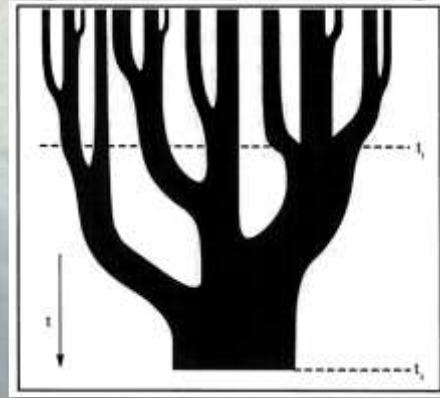
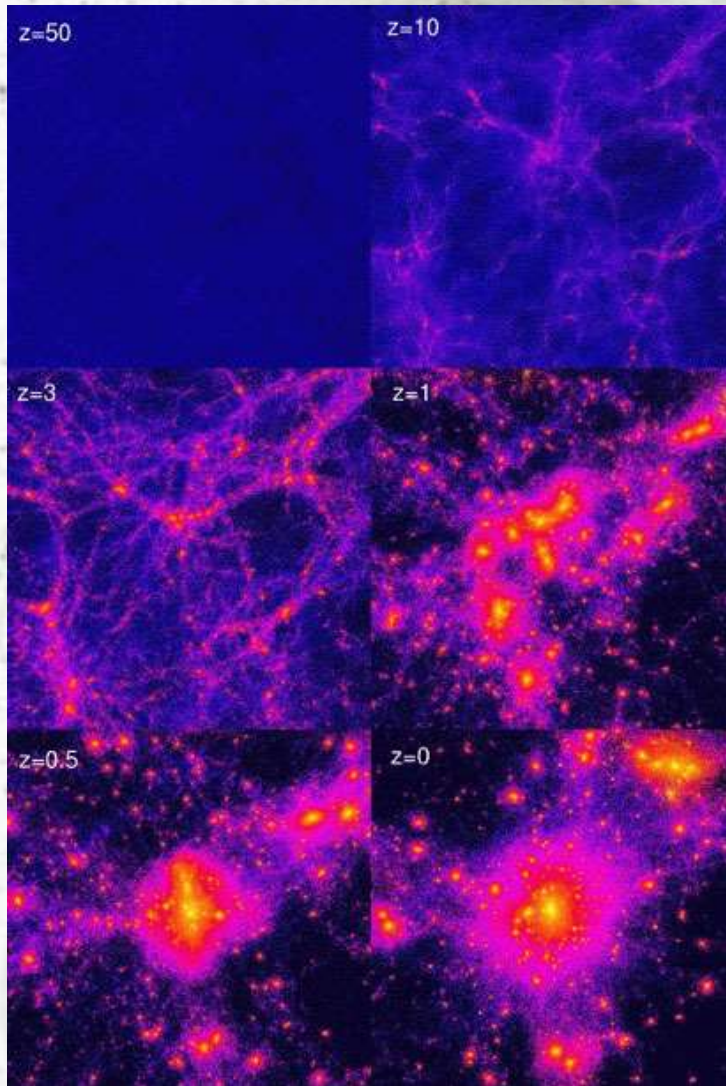
92億年: 太陽系誕生  
~9.2 billion years: Sun, Earth, and solar system have formed

現在  
years: Present

銀河形成・進化  
の歴史を解明する



# Structure formation in the CDM universe

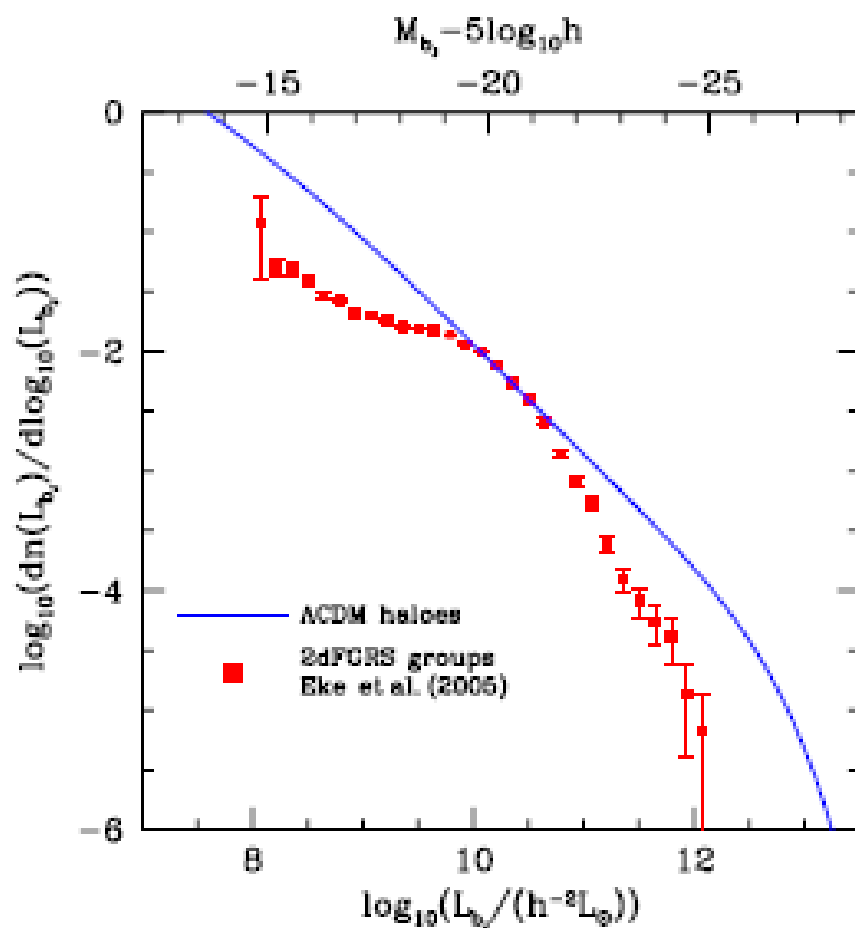


Lacey & Cole 1993    Navarro, Frenk & White, 1997

## Small scale problems

- ミッシングサテライト問題
- カスプコア問題
- Too-big-to-fail問題
- ...

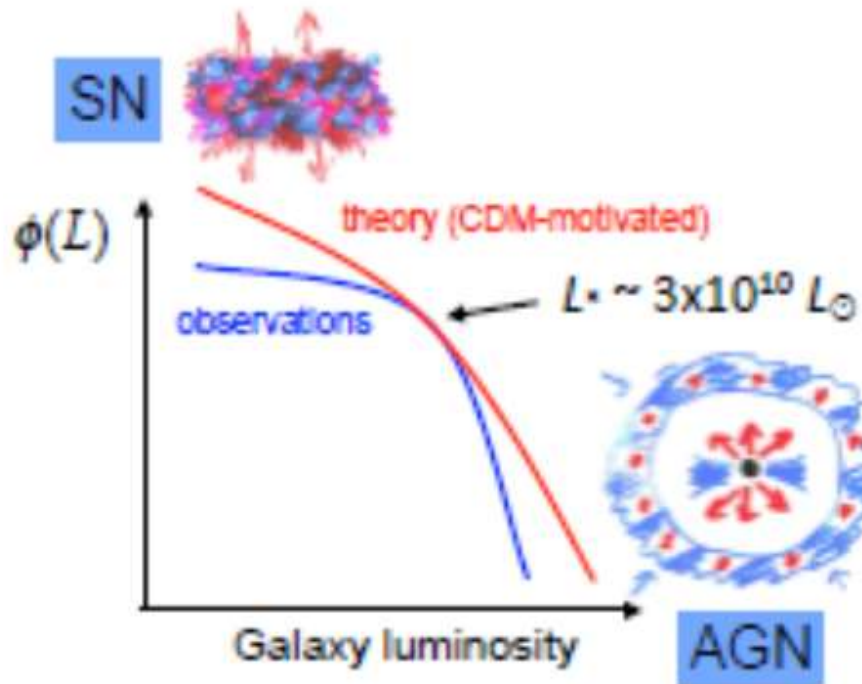
# The feedback problem



- 銀河の光度関数とコールド  
ダークマタモデルの予言す  
るハローの質量関数の相違
- ガスから星への変換効率が  
ハロー質量によって異なる
- バリオンの物理過程が重要



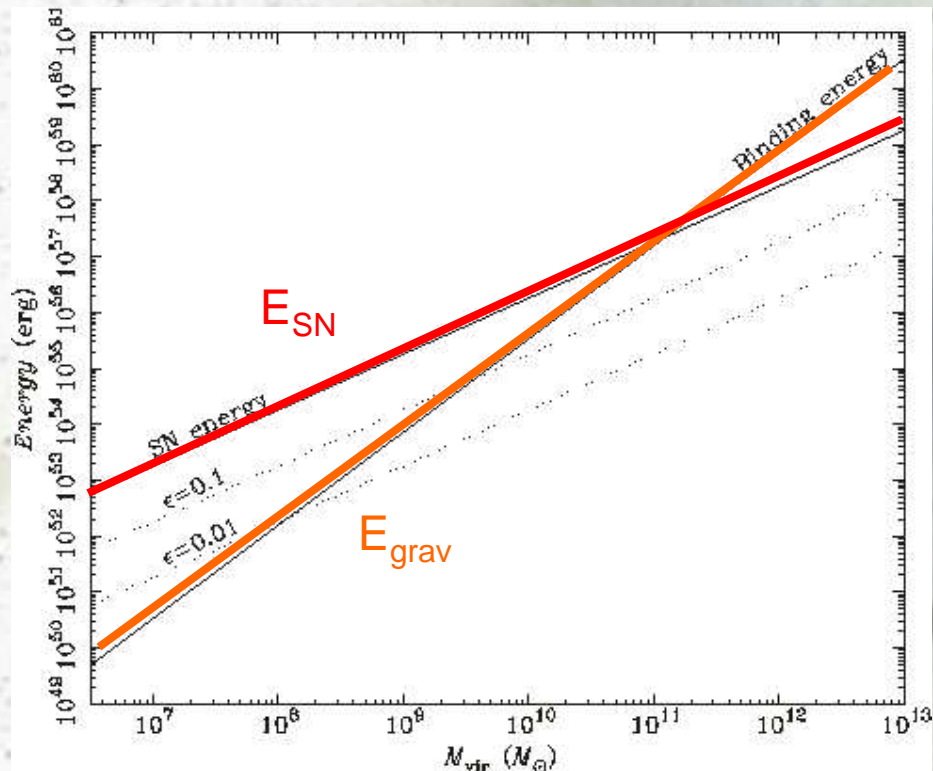
# What is feedback



- Stellar feedback  
超新星等により、ISMが加熱され星形成を抑制
- AGN feedback  
AGNがエネルギーを放出し星形成を抑制
- Photoheating from UV background

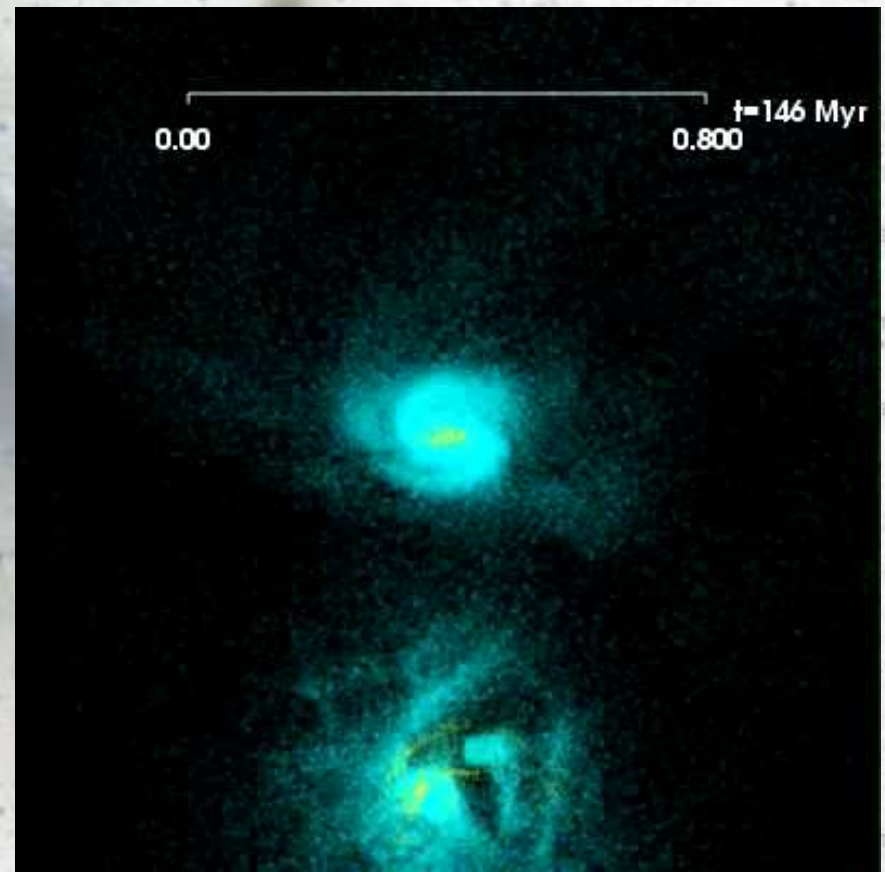
Silk & Mamon 2012

# 銀河形成と超新星



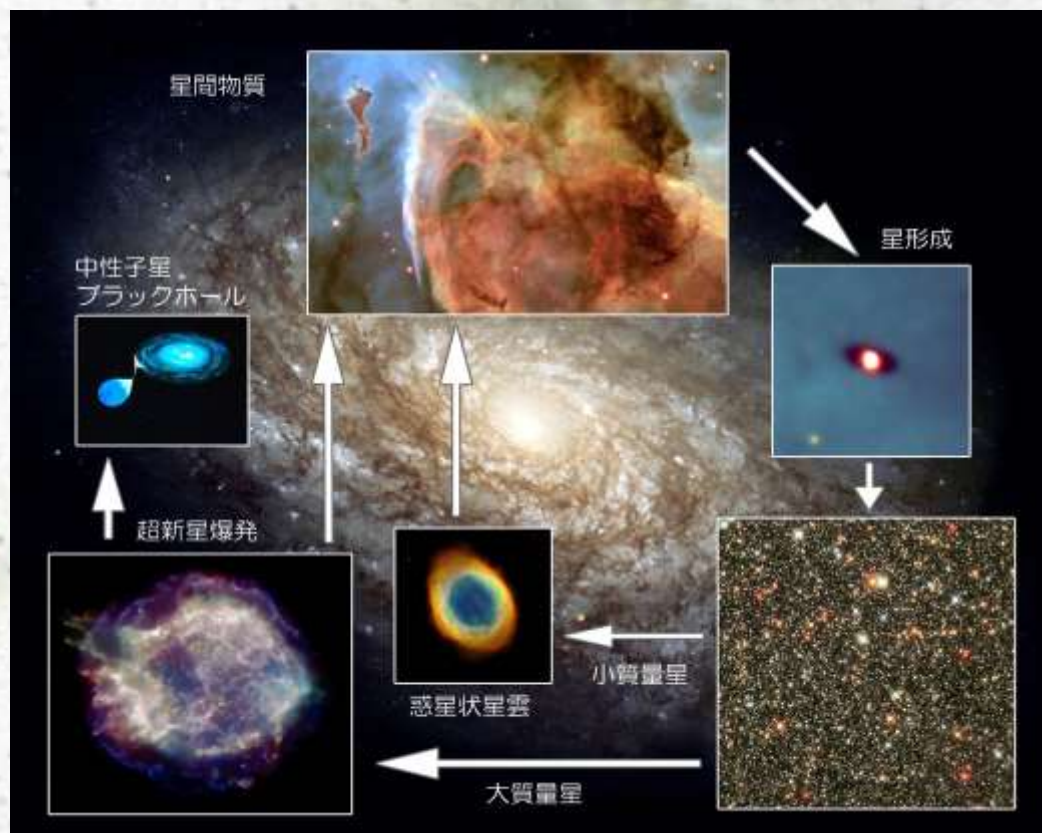
銀河の質量

Dark matter: NFW profile  
Stars: 1% of total mass





# 銀河形成標準模型の基礎物理過程



## 重力

- 暗黒物質、ガス、星による自己重力

## 流体力学

- 銀河間・星間ガス
- 物質、運動量、エネルギーの輸送
- 圧縮、膨張、衝撃波

## 輻射輸送

- 放射による運動量、エネルギーの輸送
- 冷却・加熱
- 原子分子過程

この3要素が複雑に関連するにも関わらず、膨大な計算量のために輻射輸送を正確に取り扱った研究は少ない。

# 銀河形成・進化シミュレーション

**$N$ -body 重力多体問題(ダークマター、星)**



+ 流体力学、放射冷却



Katz & Gunn (1991), Evrard (1993) 他

+ 星形成、超新星爆発 (SN)

Katz (1992), Navarro & White (1993) 他



+ 化学進化 (重元素放出、ガスとのmixing)

Steinmetz & Müller (1994), Raiteri et al (1996) 他

+ 光学進化(種族合成モデルとの結合、ダスト)



Mori et al (1997), Contardo et al (1998),

Bekki & Shioya (1998) 他

+ 輻射輸送 Abel et al. (1999), Susa & Umemura (2004)



+ 非平衡過程、ダスト放射 (Yajima+ 2012)

+ Zoom in Sim.

+ etc.



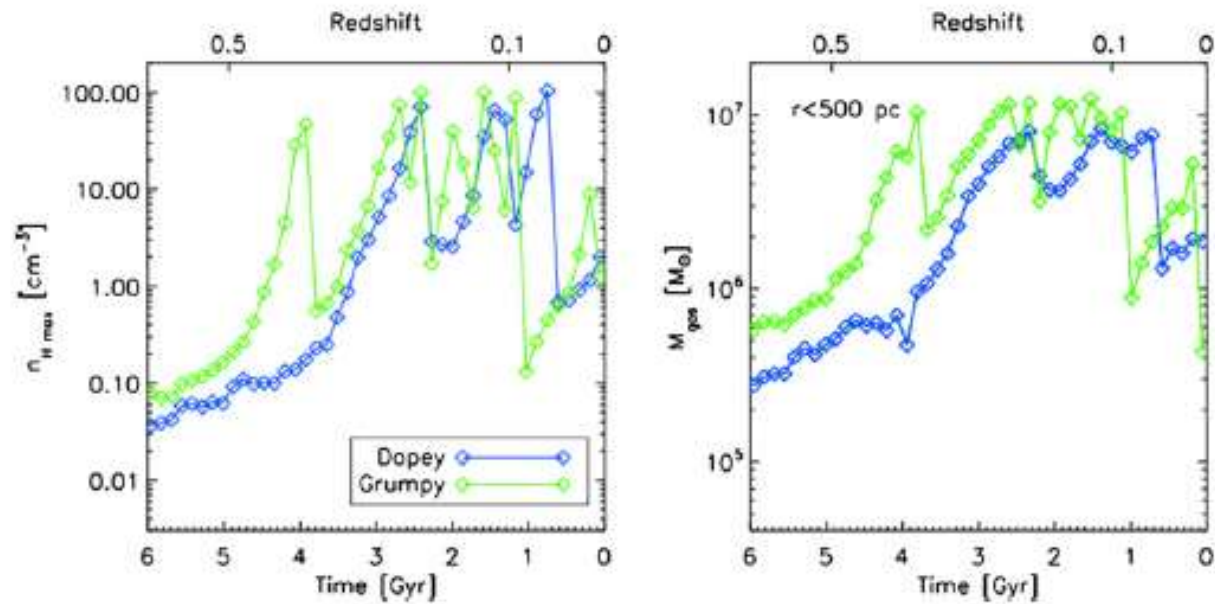
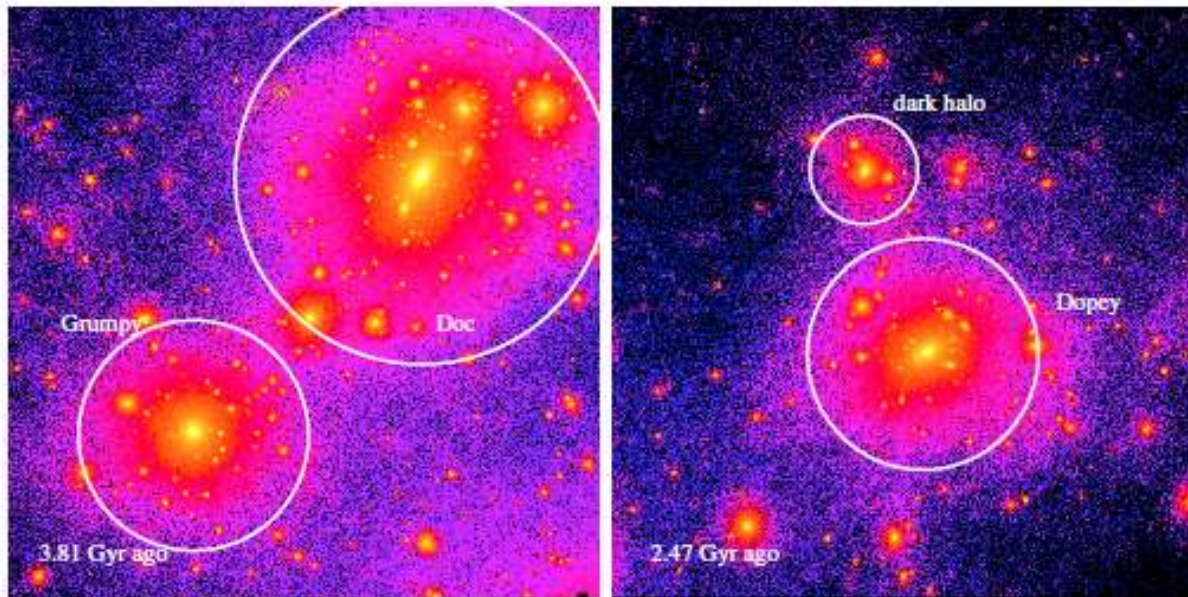
# Shen et al. 2014

They present results from a fully cosmological, very high-resolution,  $\Lambda$ CDM simulation of a group of seven field dwarf galaxies with present-day virial masses in the range  $M_{\text{vir}} = 4.4 \times 10^8 - 3.6 \times 10^{10} \text{ Msun}$ .

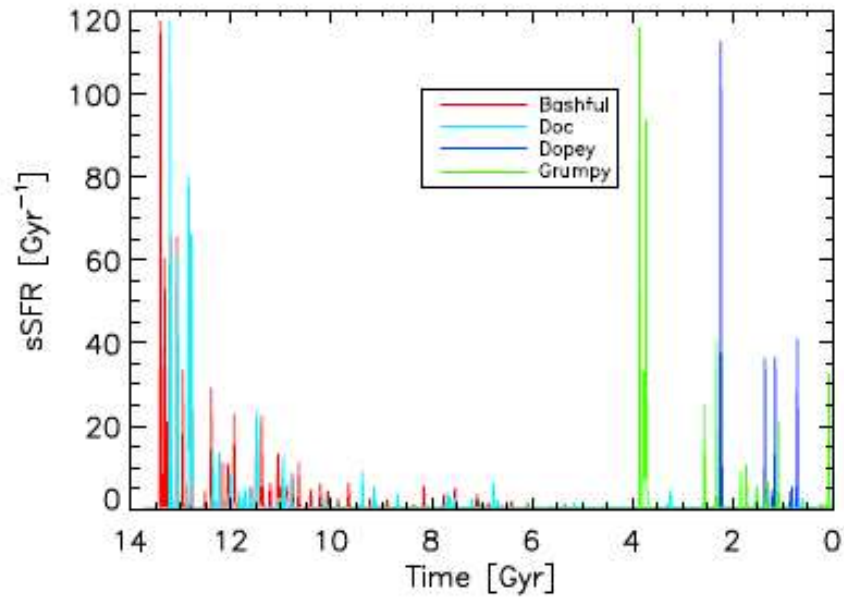
- The zoom-in simulation was performed with the parallel TreeSPH code Gasoline (Wadsley et al. 2004) in a  $\Omega_M = 0.24$ ,  $h = 0.73$ ,  $\sigma_8 = 0.77$ , and  $\Omega_b = 0.042$  cosmology.
- The high resolution region, about 2 Mpc on a side at  $z = 0$ , was embedded in a low-resolution dark matter-only periodic box of 25 Mpc on a side.
- It contains about 6 million dark matter and an equal number of SPH particles, with particle masses of  $m_{\text{DM}} = 1.6 \times 10^4 \text{ Msun}$  and  $m_{\text{SPH}} = 3.3 \times 10^3 \text{ Msun}$ , respectively.
- The gravitational spline softening length for collisional and collisionless particles was fixed to  $\epsilon = 86 \text{ pc}$  (physical). In high density regions the gas smoothing length is allowed to shrink to  $0.1 \epsilon$  to ensure that hydrodynamic forces are well resolved on small scales.

The simulation includes:

- collisionless dynamics (dark matter and stars) and gas dynamics (SPH)
- metal-dependent radiative cooling
- uniform UV background
- star-formation recipe based on a high gas density threshold (100 atm/cc)
- blastwave scheme for supernova feedback.

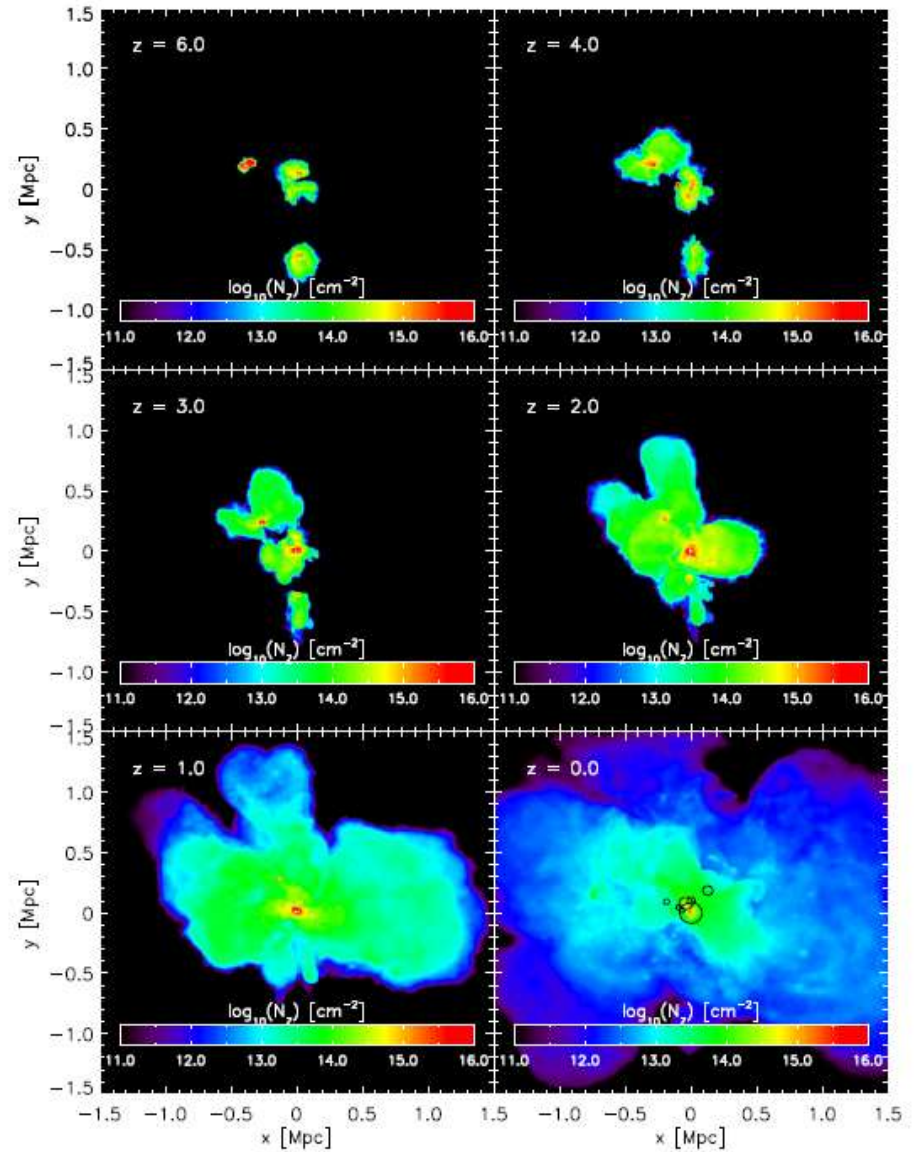






**Figure 5.** Bursty star formation histories of the simulated dwarfs. The specific star formation rate (sSFR) is plotted against lookback time.

(A color version of this figure is available in the online journal.)



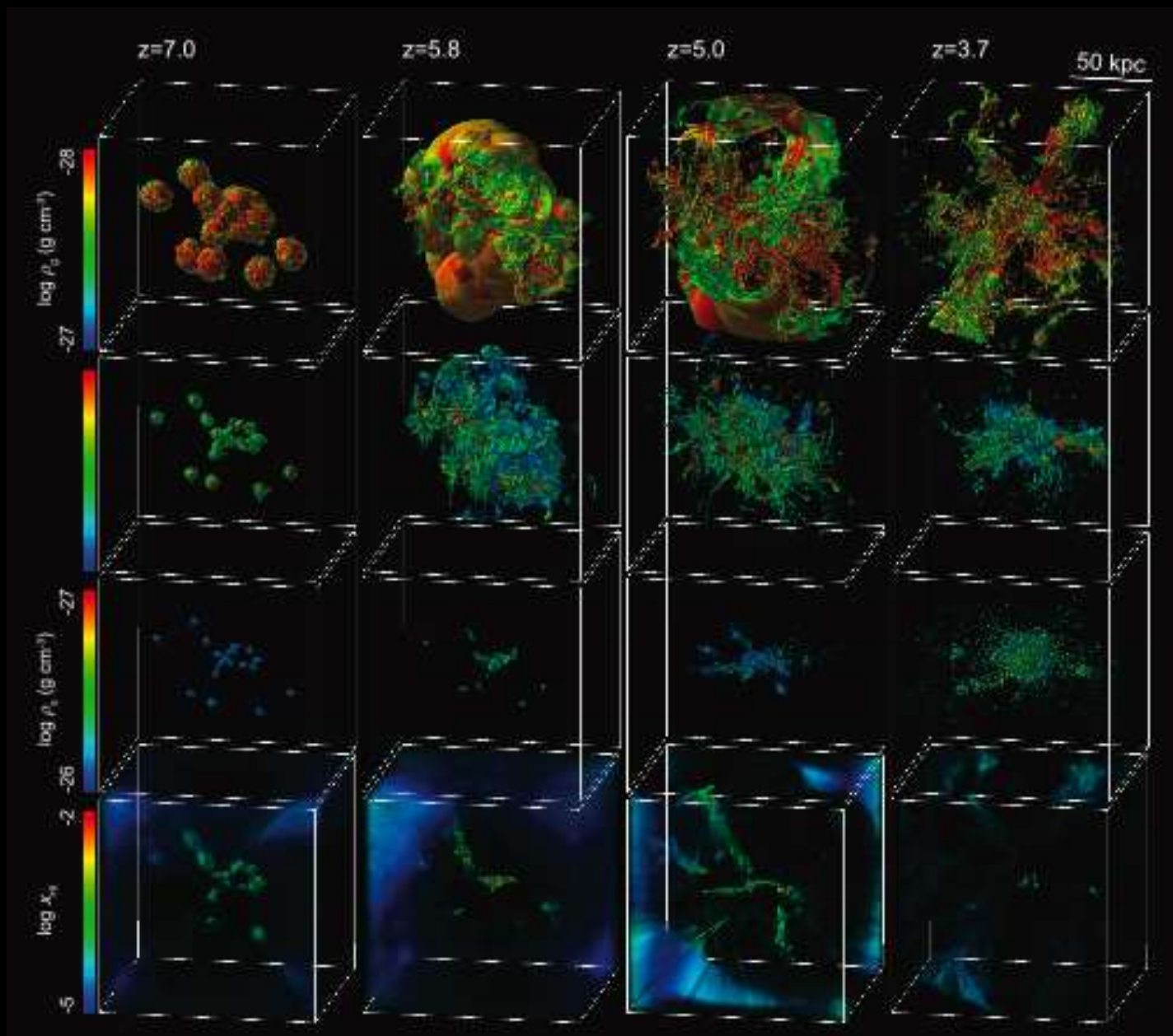
Madau & Shen 2014

星間ガス

ダスト

星

中性水素割合

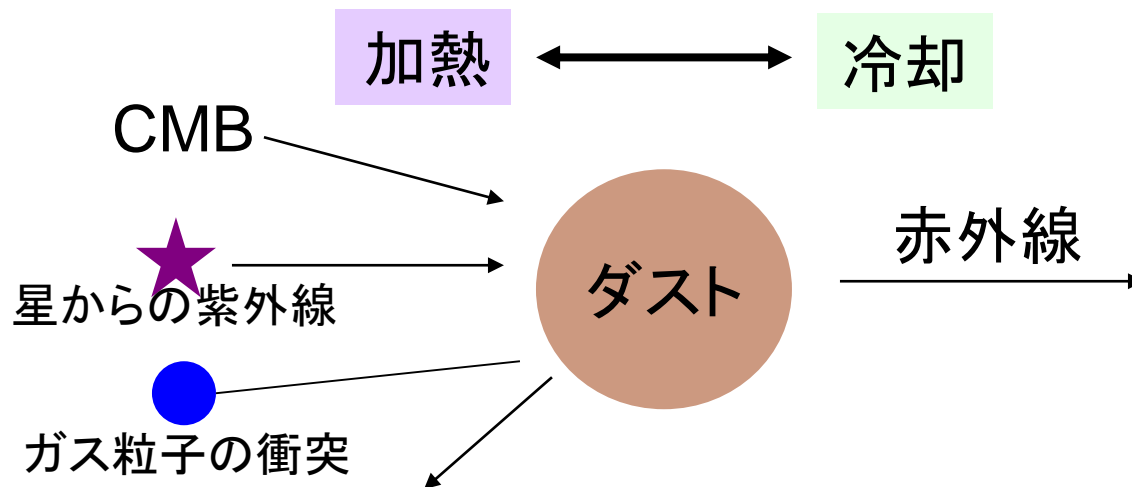




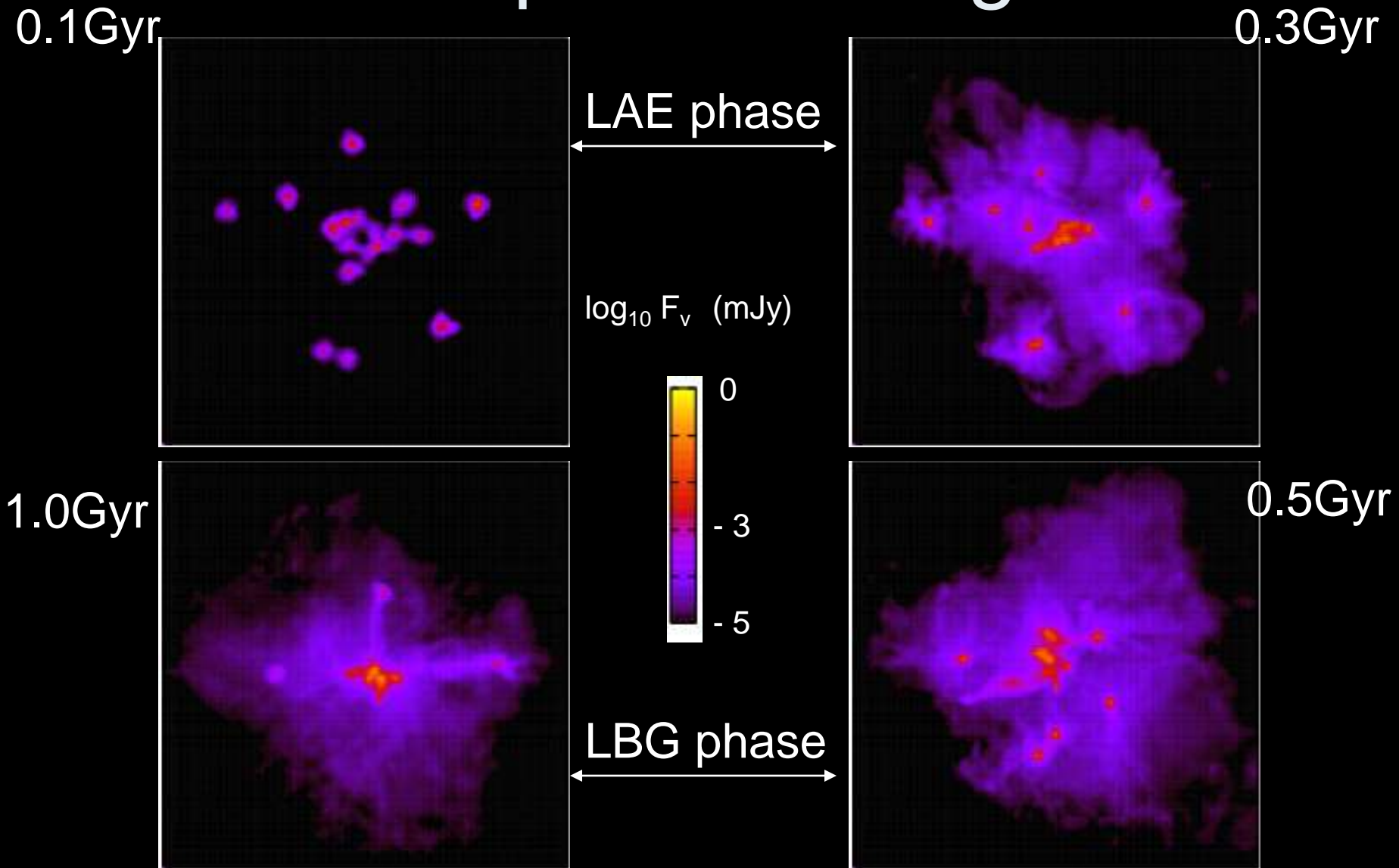
# ダストによる赤外線放射

赤外線などの多波長イメージにより検証可能性を探る

ダストの熱放射による赤外線イメージは？



# 850 $\mu$ m flux image



Cell size  $\sim 0.13''$

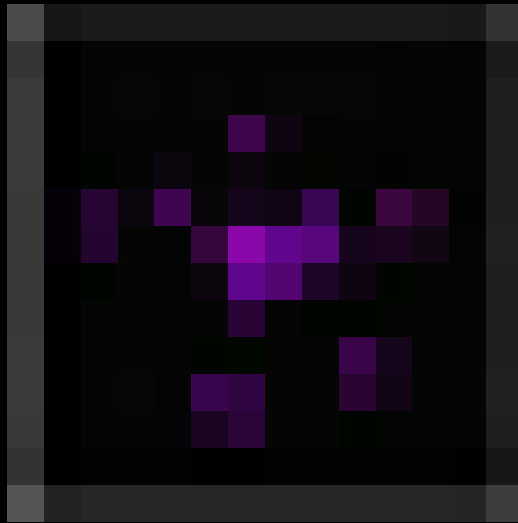
ALMA  $\rightarrow 0.01''$

Yajima et al. 2012



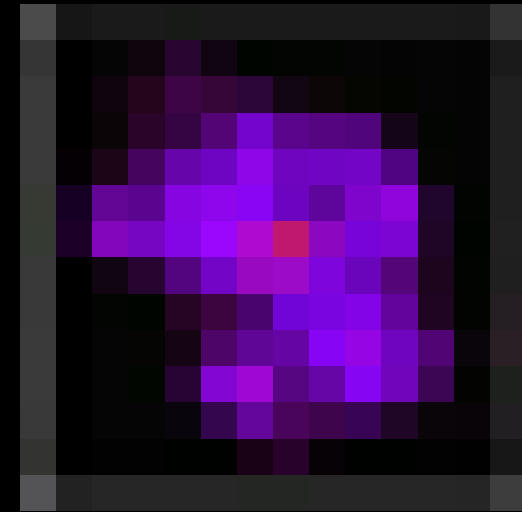
# 850 $\mu$ m flux image

0.1Gyr

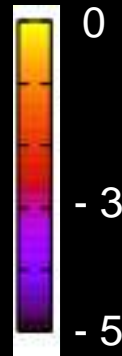


← LAE phase →

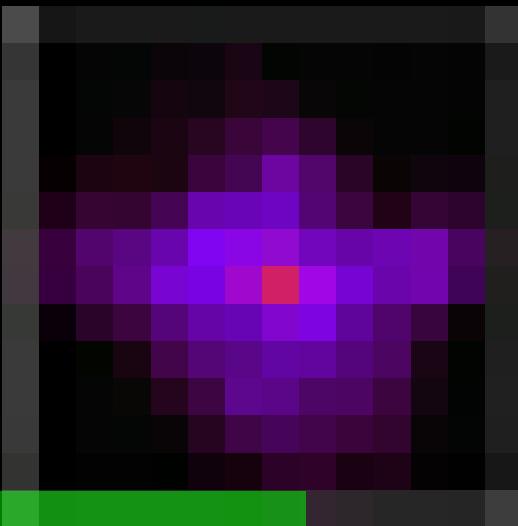
0.3Gyr



$\log_{10} F_v$  (mJy)

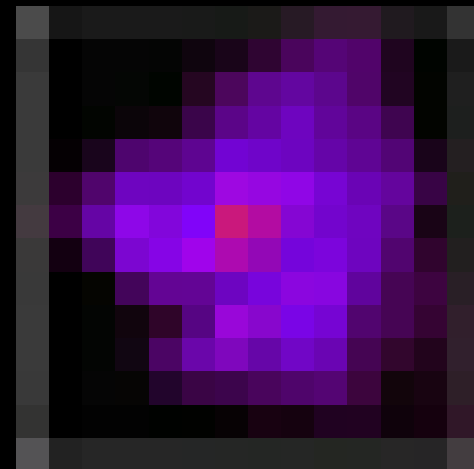


1.0Gyr

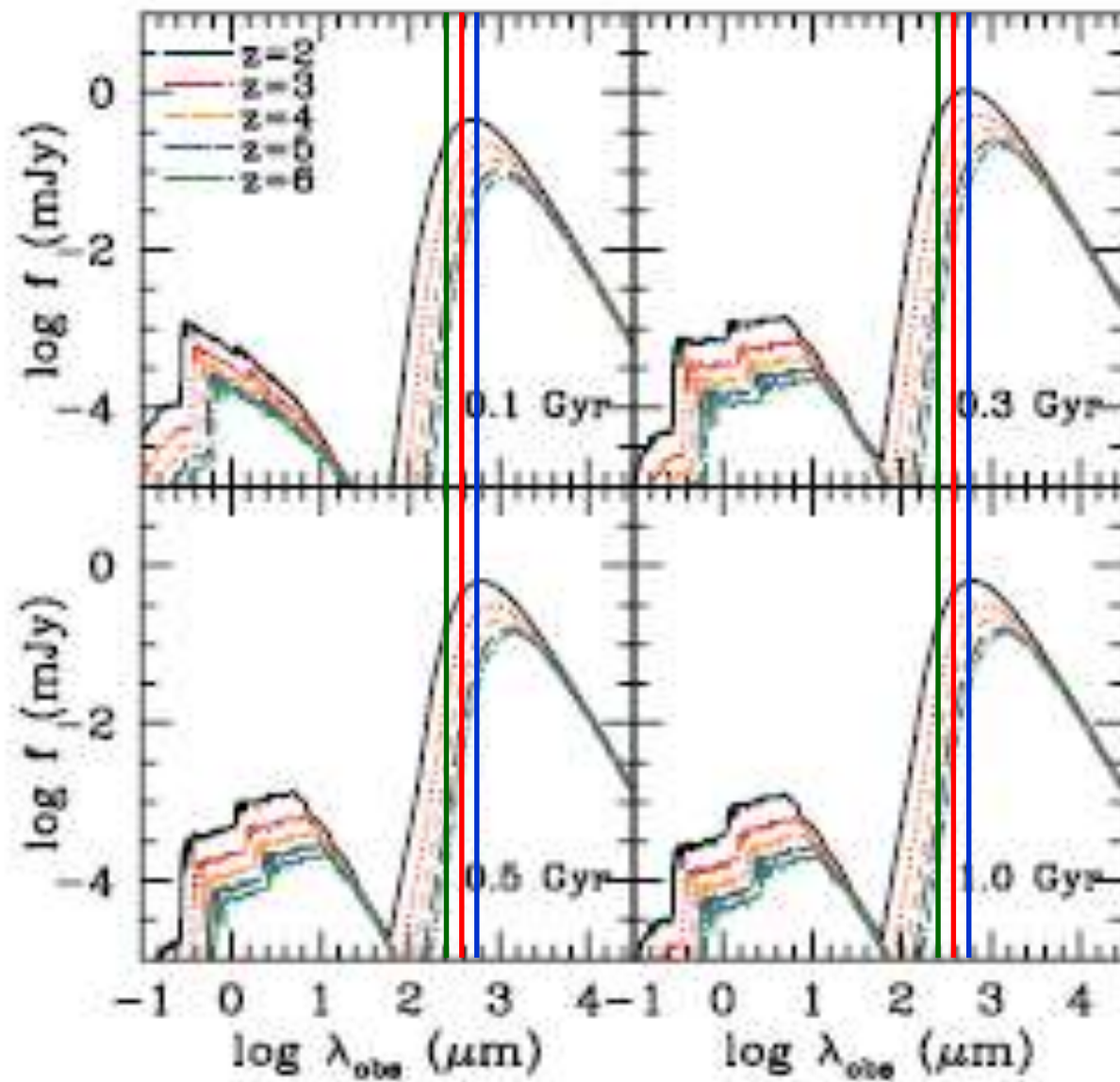


← LBG phase →

0.5Gyr



南極30m → 2.9"



Yajima et al. 2012

