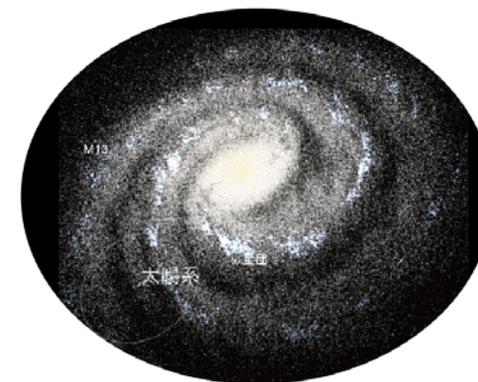
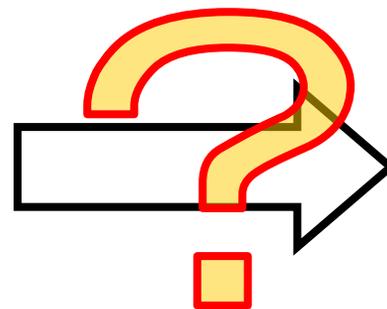
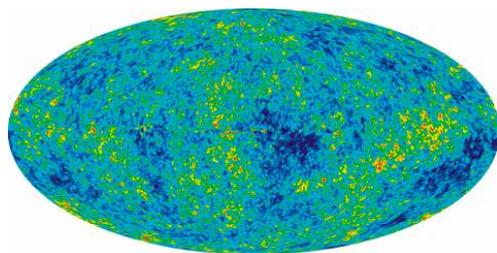


# 高精度銀河形成 シミュレーション時代の幕開け



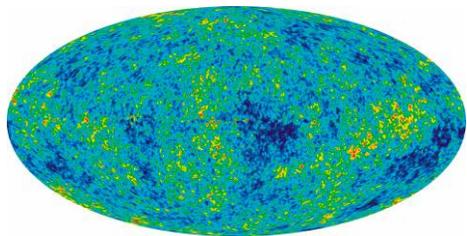
齋藤貴之

国立天文台天文シミュレーションプロジェクト

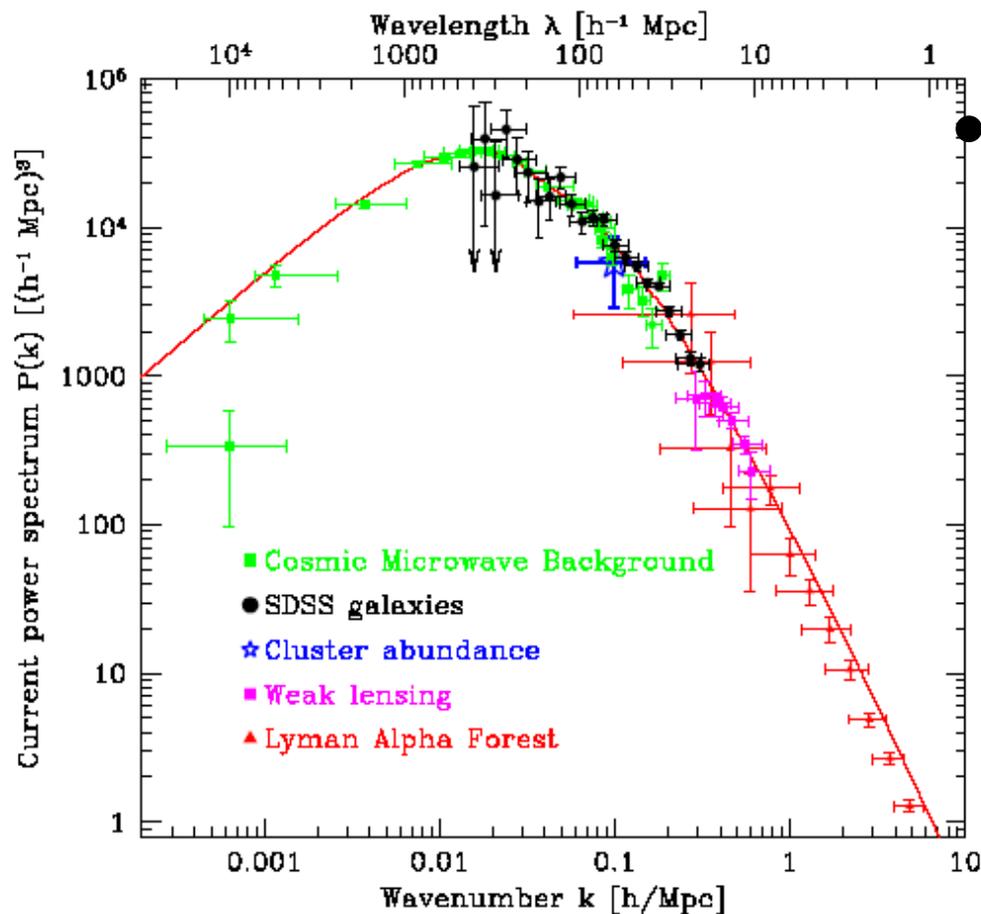
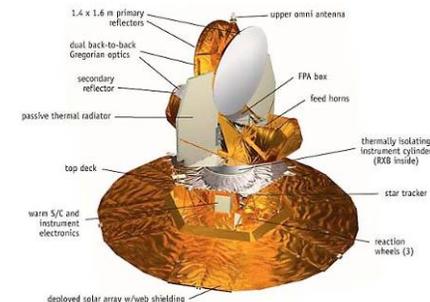
共同研究者

松井秀典、小久保英一郎、和田桂一、富阪幸治、牧野淳一郎(NAOJ)、  
台坂博(一橋)、吉田直紀(東大)、岡本崇(筑波大)、馬場淳一(東北大)





# 初期条件



Tegmark et al. 2003

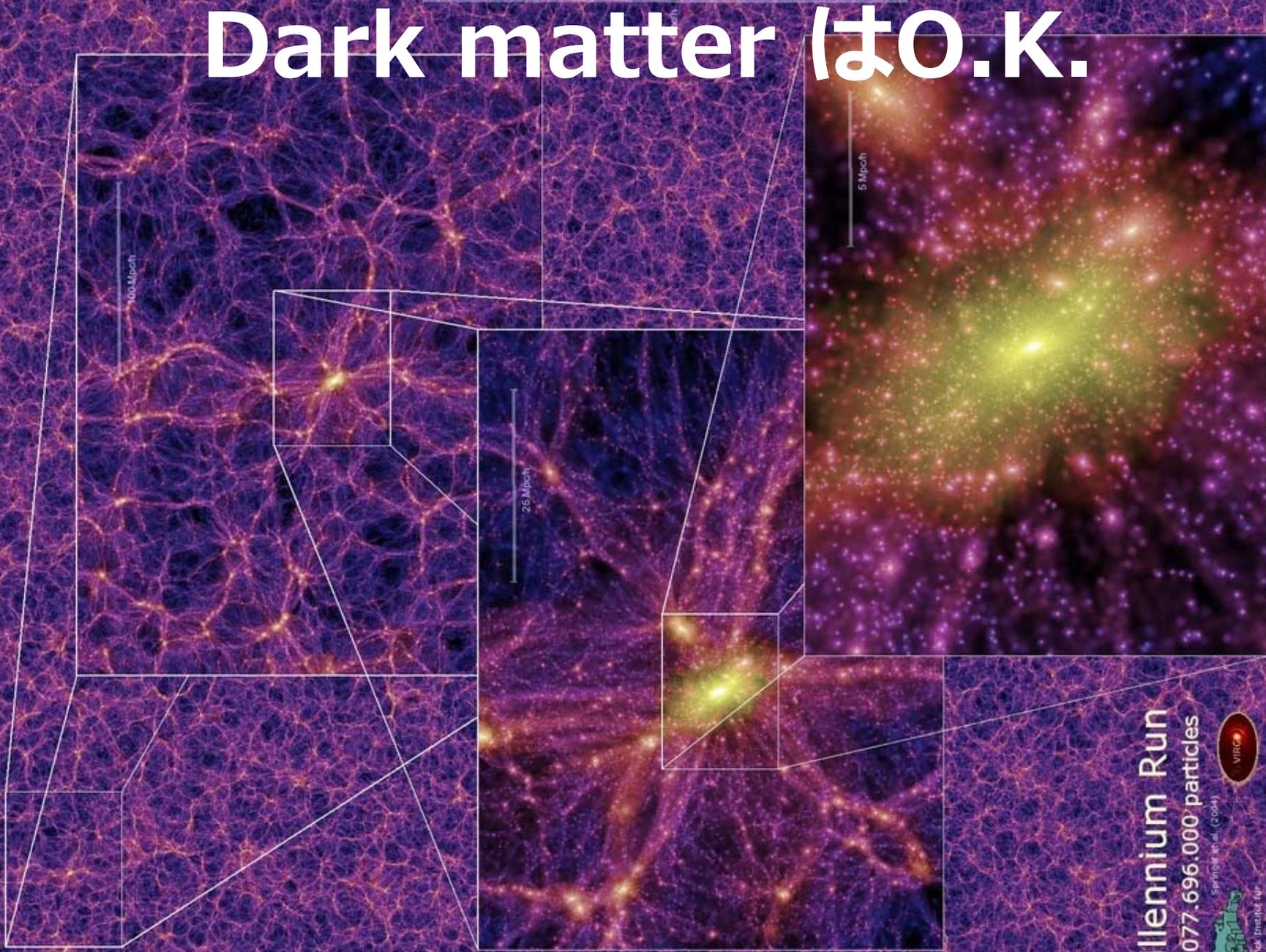
● 我々の宇宙がどのような進化をするかは**極めて正確**にわかっている

– **冷たい暗黒物質が支配する宇宙**

- 宇宙背景放射、銀河サーベイなどの結果から

– 小さな構造が先にでき、それらが合体成長する  
**階層的構造形成宇宙**

# Dark matter (≠0.K.



Millennium Run  
10,077,696,000 particles

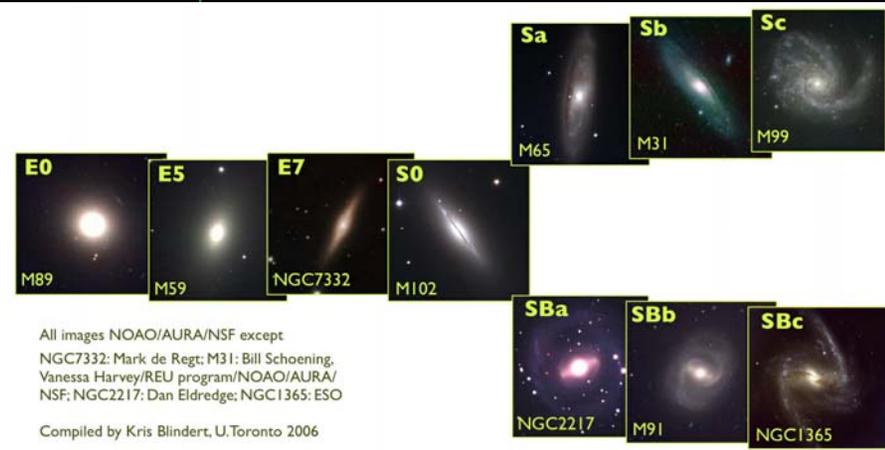
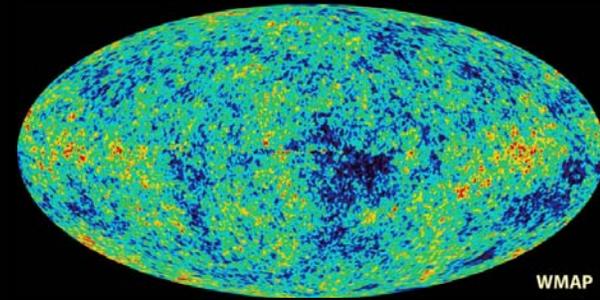
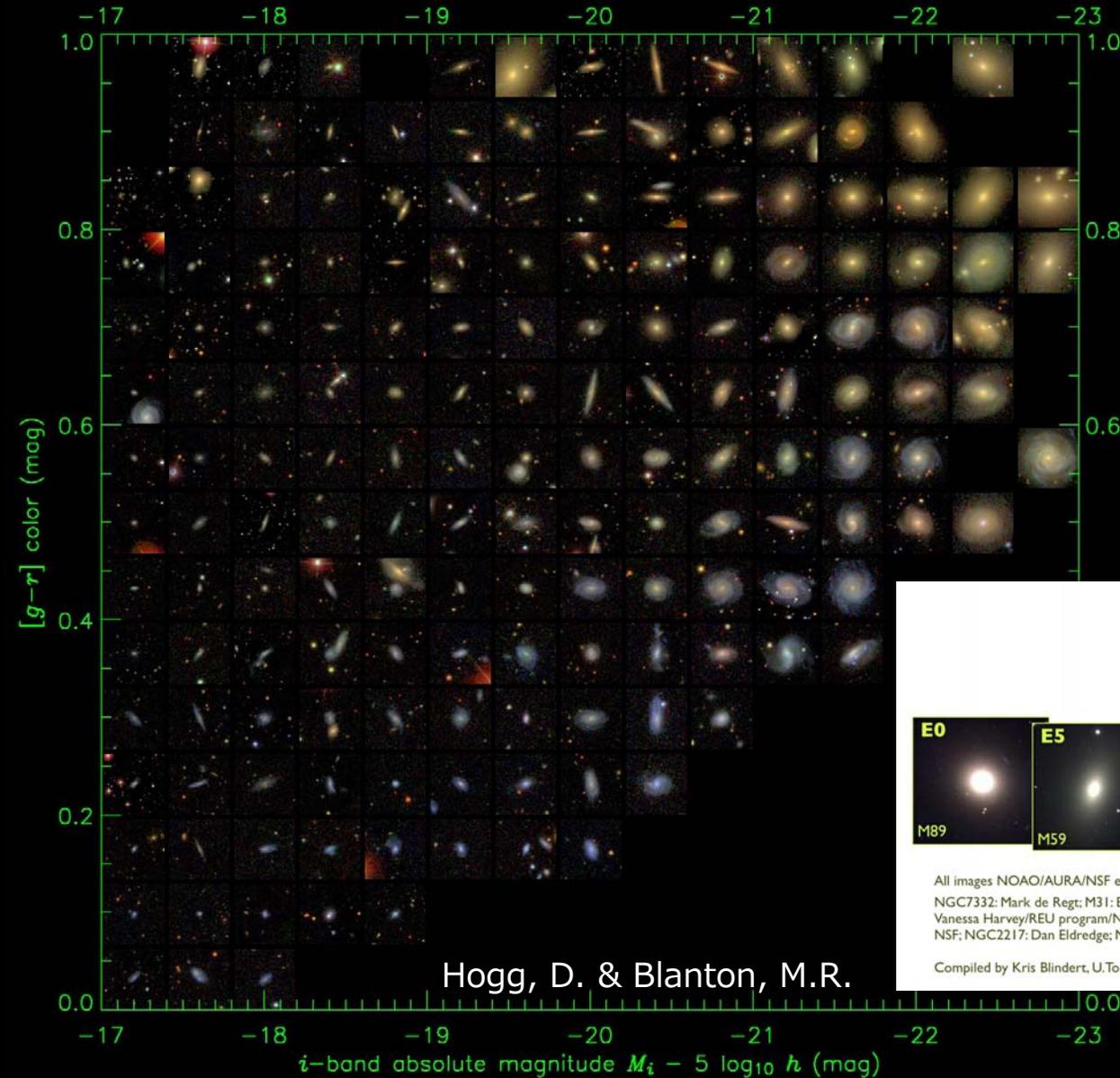
Springel et al. (2004)



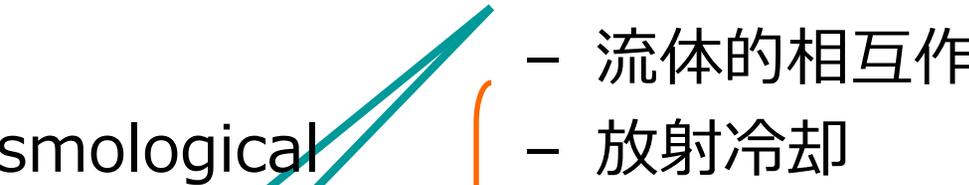
Max-Planck-Institut für  
Astrophysik



# 銀河形成の詳細は解っていない

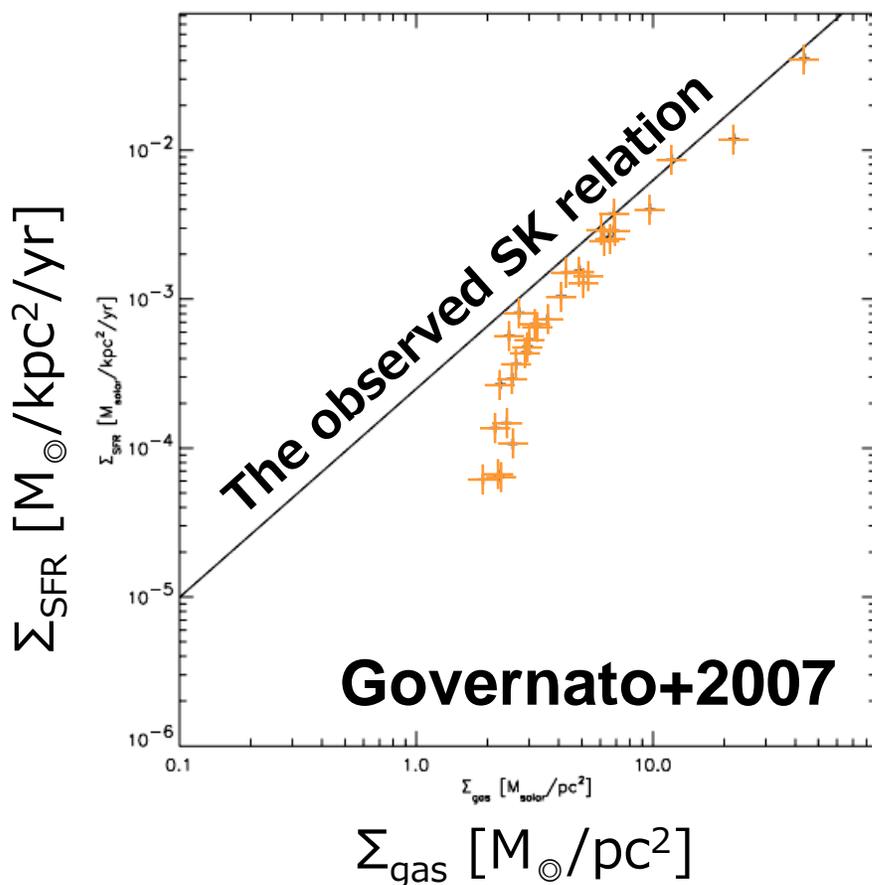


# 銀河形成シミュレーション

- 宇宙
    - Inflation
    - BigBang
    - CDM+Cosmological Constant
  - 物質
    - ダークマター
    - バリオン
  - 物理&モデル
    - 重力
    - 流体的相互作用(圧縮性)
    - 放射冷却
    - 星形成
    - 超新星爆発
    - 金属量進化
    - (磁場、輻射、宇宙線等)
- 

ほとんどが粒子計算 (1)質量分解能： $\sim 10^6 M_{\odot}$ 、  
(2)ガス： $T > 10^4 K$ 、(3)空間分解能： $\sim kpc$

# 星形成パラメータは一般に Schmidt-Kennicutt 関係を再現するように選ばれる

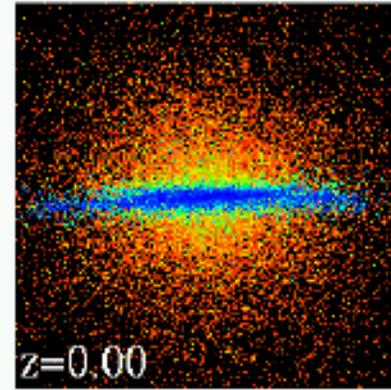
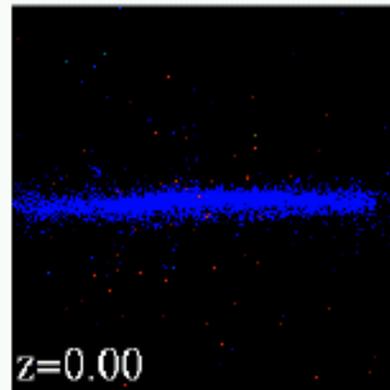
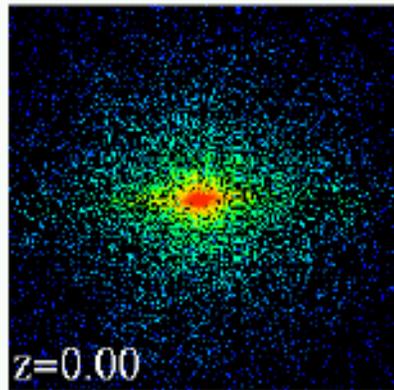
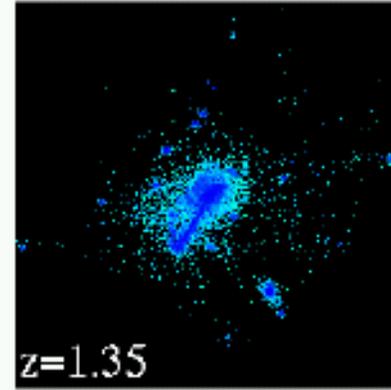
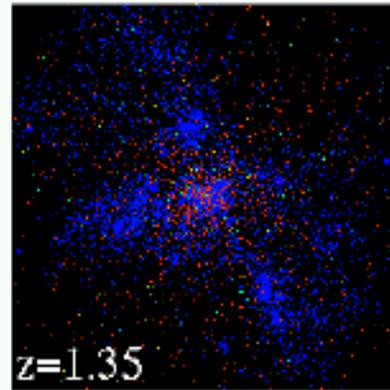
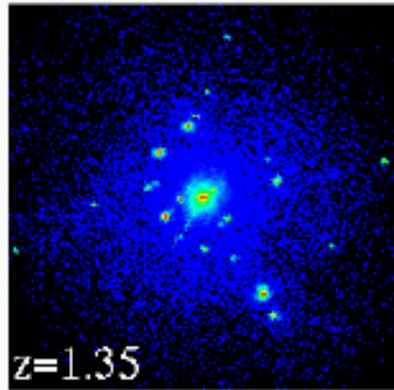
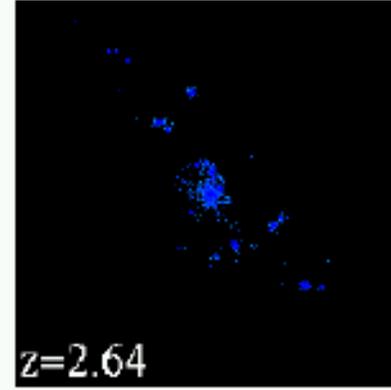
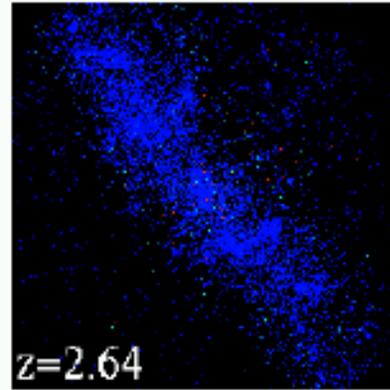
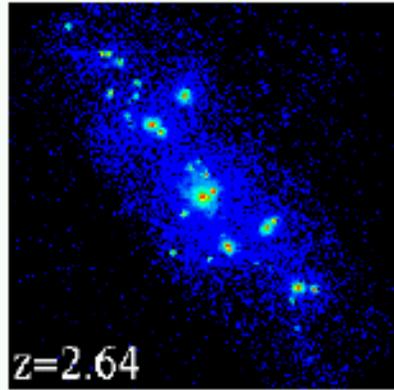


- 典型的な星形成条件 (Stinson+2006)
  - 密度条件 :  $n_{\text{th}} > 0.1$ 個/cc
  - 温度条件 :  $T < 15000\text{K}$
  - $\nabla \cdot v < 0$
- $\rho_* = C_* \rho_{\text{gas}} / t_{\text{dyn}} \propto \rho_{\text{gas}}^{1.5}$ 
  - $C_* \sim 0.1-0.01$
- 星粒子は、同じ時刻に同時に一様な金属量のもとで生まれた恒星の集団として扱う
  - Single Stellar Population 近似

DM

Gas

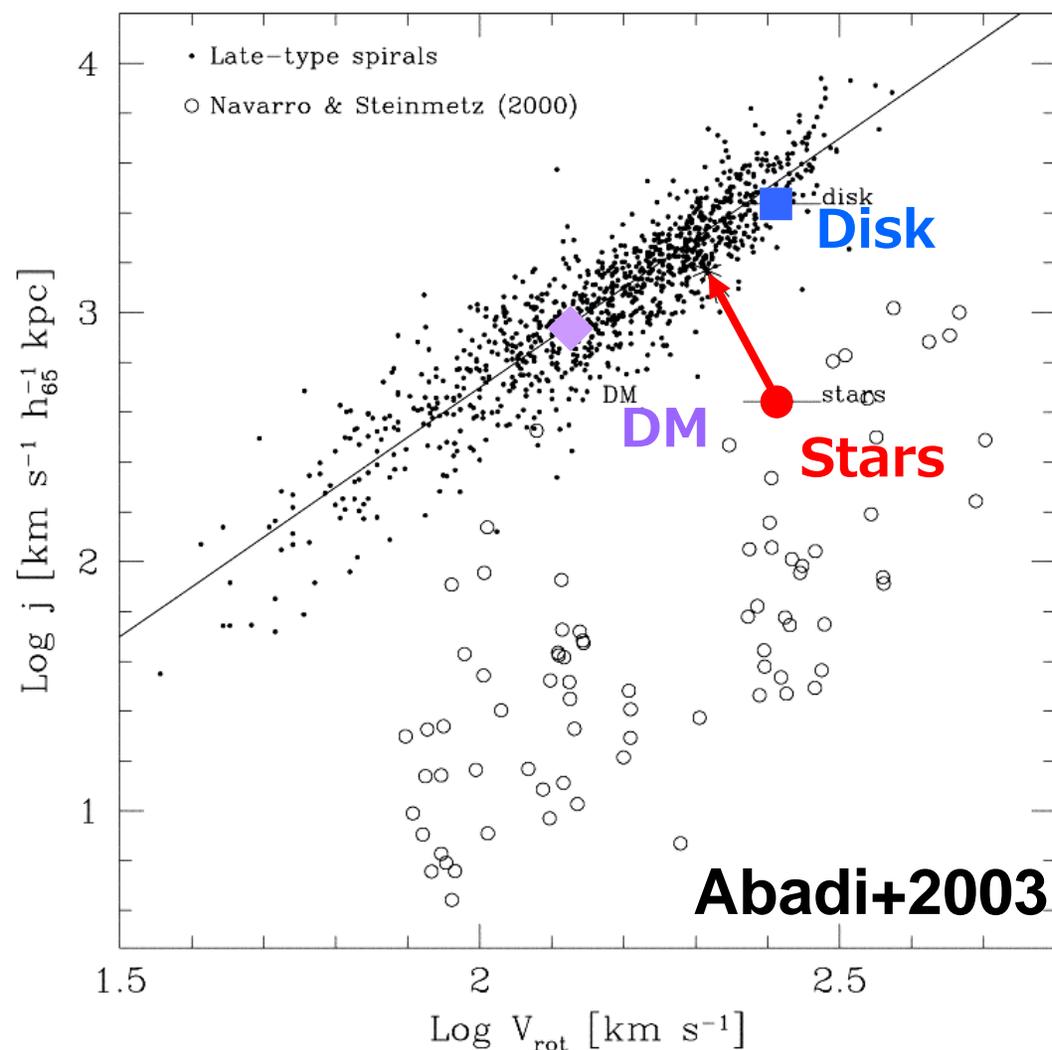
Star



時間進化

Abadi+2003

# 角運動量問題

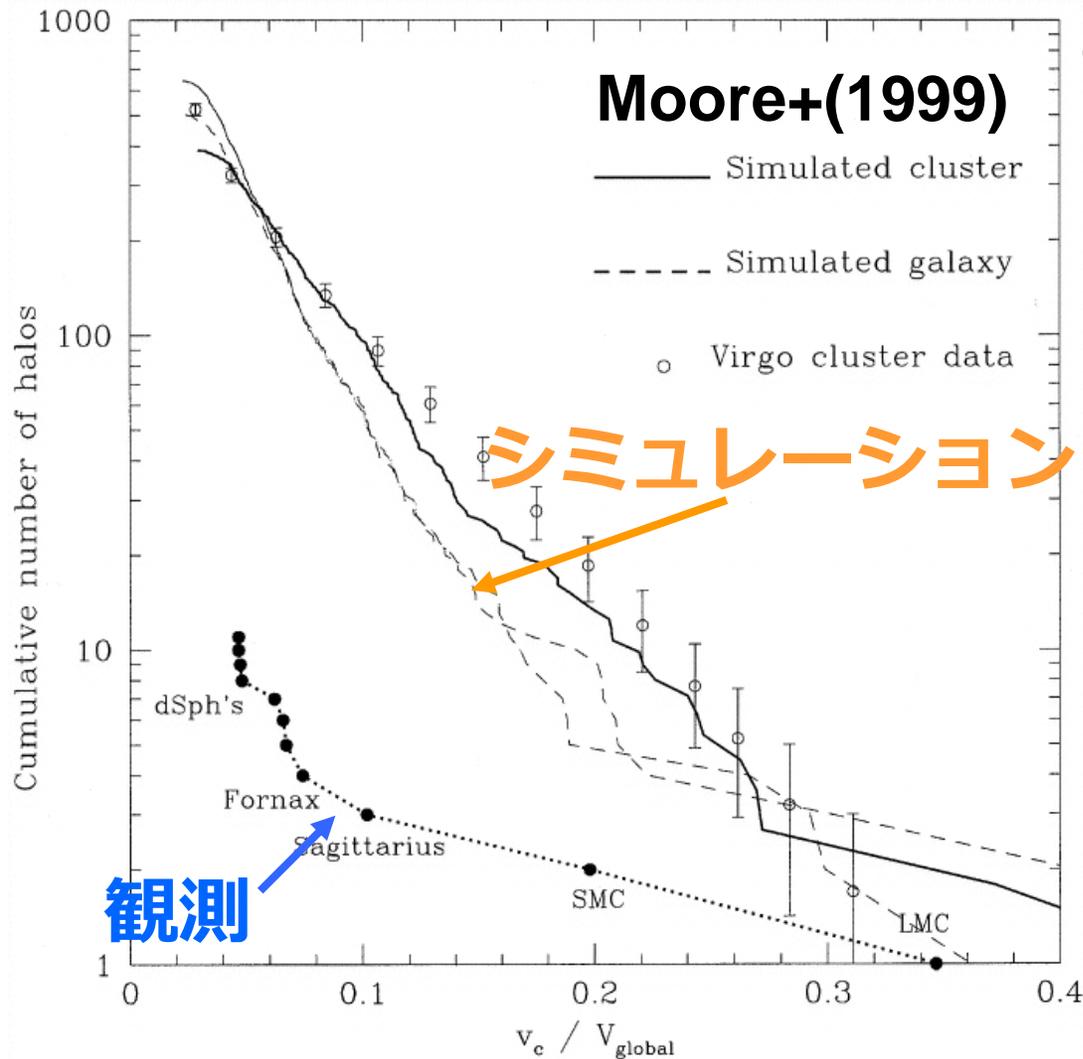


- バリオン塊の形成
- 力学的摩擦による沈降
- バリオンからDMへの角運動量輸送
- 低角運動量恒星成分(=バルジ)質量大

初期の銀河形成シミュレーションからこの問題は認識されていた(e.g., Katz & Gunn 1991, Navarro Benz 1991, Steinmetz & Navarro 1999)

**Tully-Fisher 関係が再現できない**

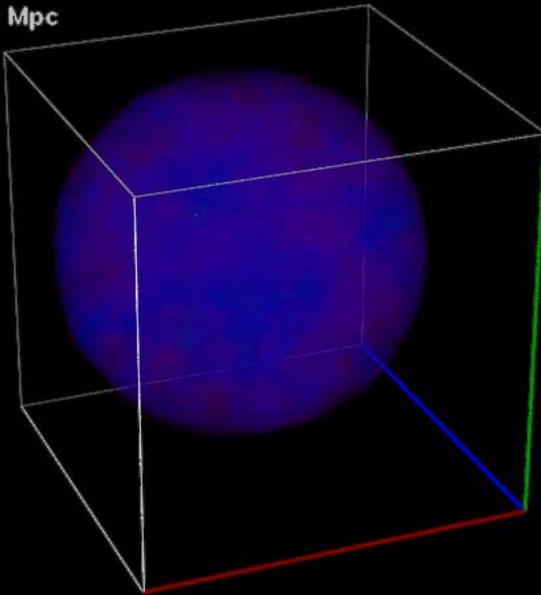
# Satellite 問題



- 観測されるサテライト銀河の数と、シミュレーションから得られるサブストラクチャの数の不一致
  - 石山智明さんの講演
  - 岡本崇さんの講演

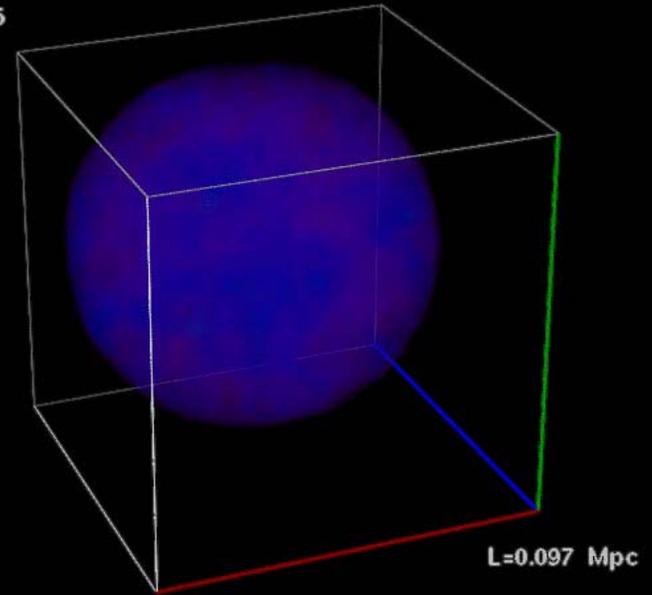
# Effects of feedback on the morphology of galaxies

L=0.097 Mpc  
z=63.75



With (strong) feedback

z=63.75



Without feedback

Thacker Couchman 2001

See also: Sommer-Larsen+2003, Robertson+2004, Okamoto+2005,  
Governato+2007,2008, Mashchenko+2008

# バリオンプロセスが重要

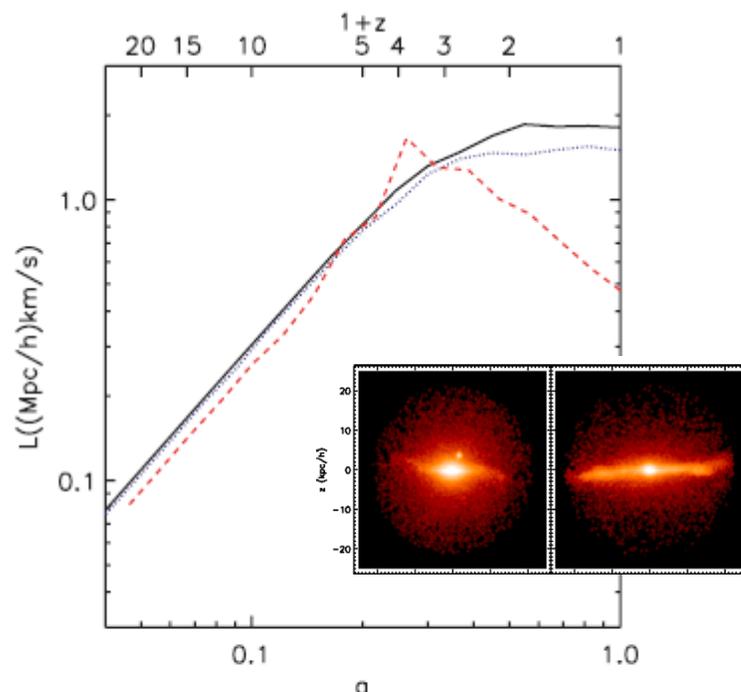


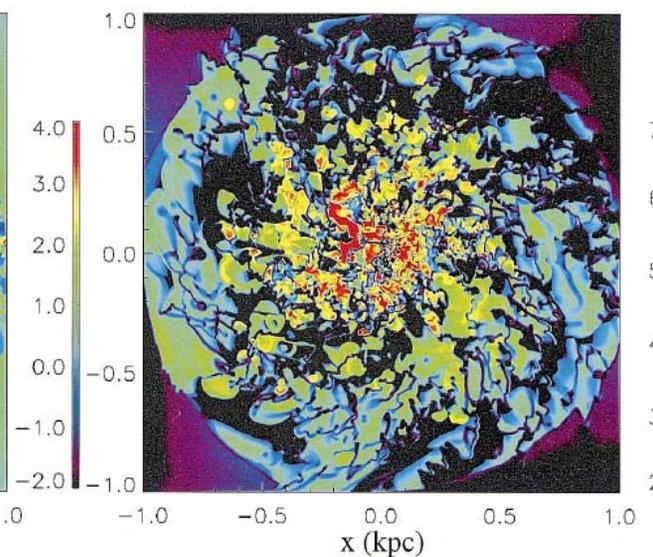
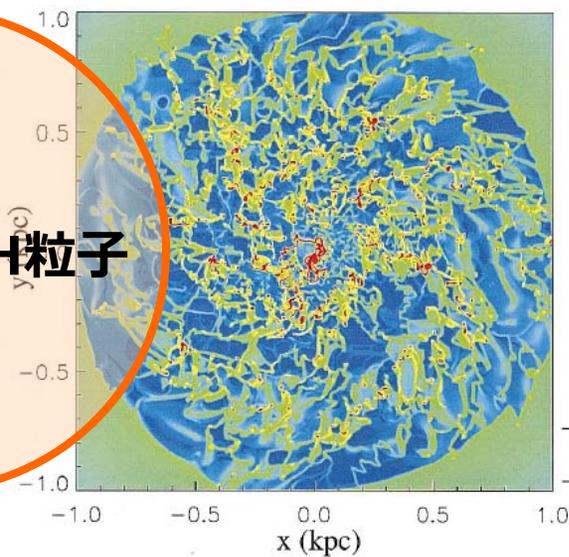
Figure 6. Specific angular momentum of the dark matter component (solid line) and of the baryonic component of the bulge-dominated galaxy (dashed line) and of the disc-dominated galaxy (dotted line).

- バリオンは、collapse 後に角運動量を失う
  - バリオン→ダークマター
- SF/FBモデルによって、角運動量の輸送効率が変わる→銀河形態が変わる (Okamoto+2005, Zavala+2008)
- バリオンプロセス(SF/FB)の扱い(精密化)が重要

Zavala+2008

# 高分解能シミュレーションへ

一つのSPH粒子



Wada Norman 2001

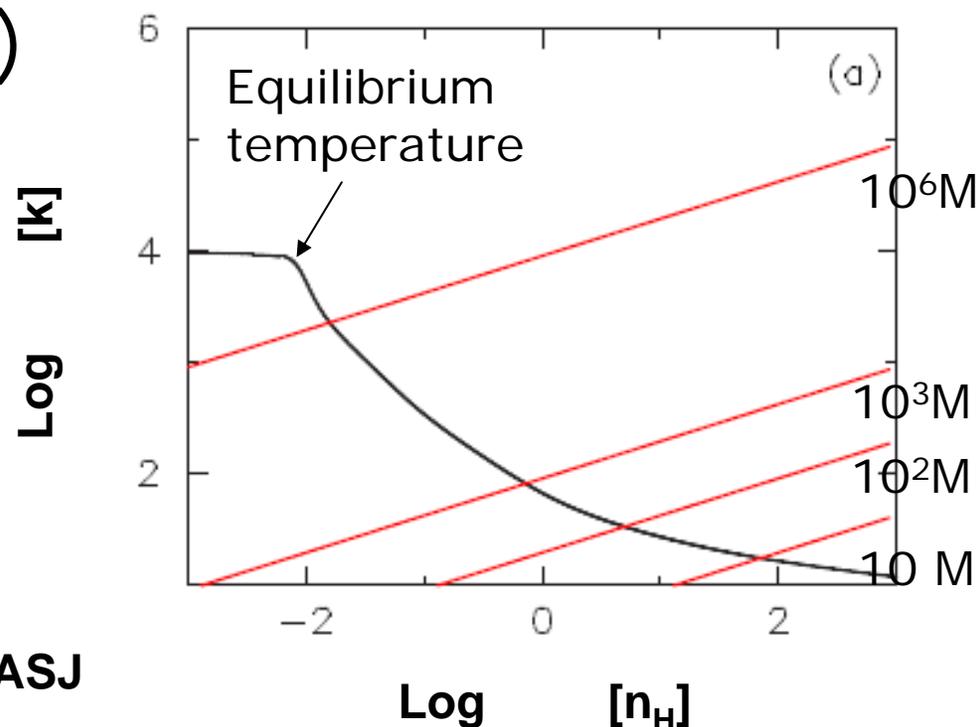
# Higher resolution than $10^6 M_{\odot}$ !

- 重力収縮に伴う分裂を扱うためには、Jeans 質量を分解する必要がある:

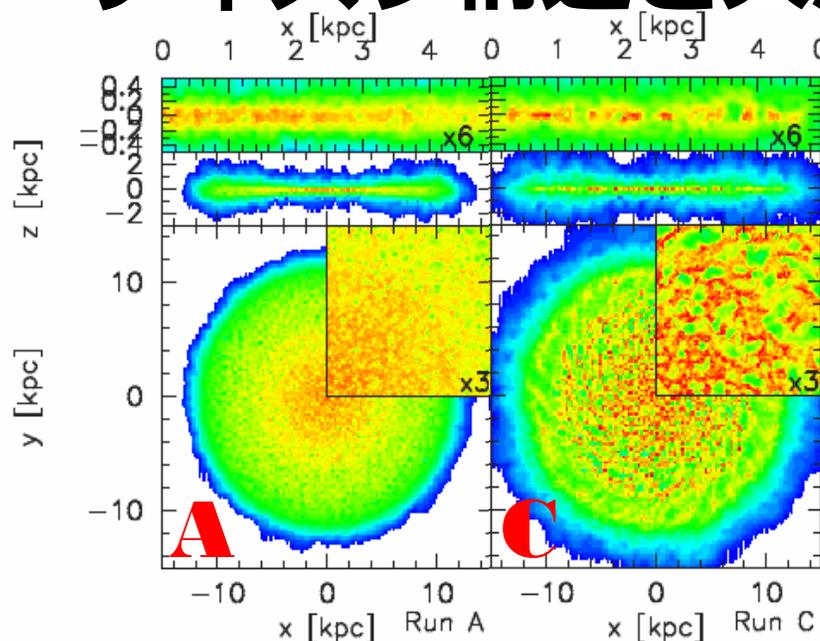
$$N_{\text{ngb}} \times M_{\text{SPH}} < M_{\text{Jeans}}(r, T)$$

- $n_{\text{H}} \sim 10^2/\text{cc}$ (分子雲) を分解するためには  $M_{\text{SPH}} \sim < 10 M_{\odot}$

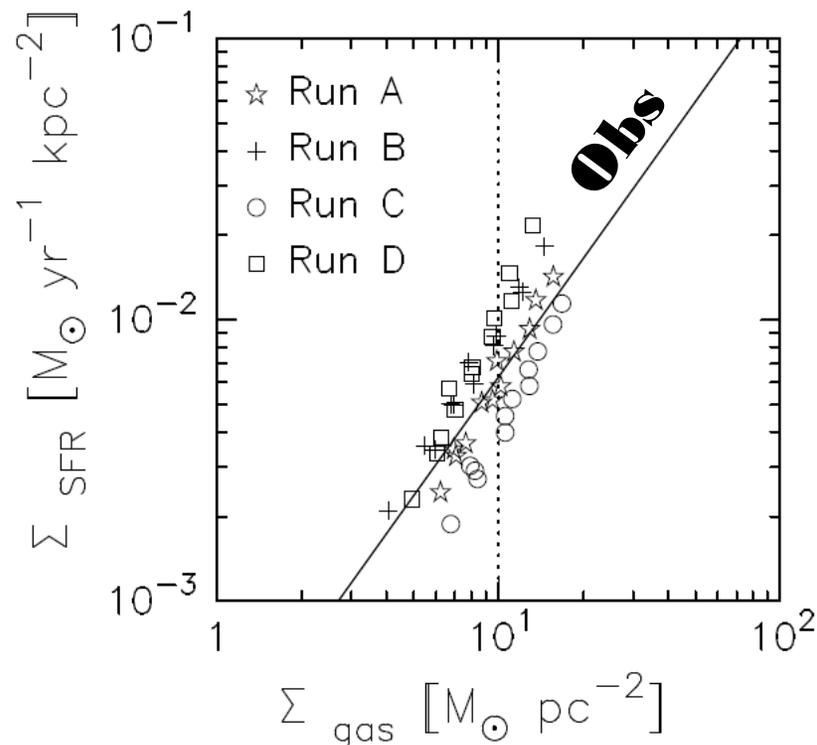
- **従来にない高分解能シミュレーションが必要**



# 星形成条件と ディスク構造と大局的な星形成の性質



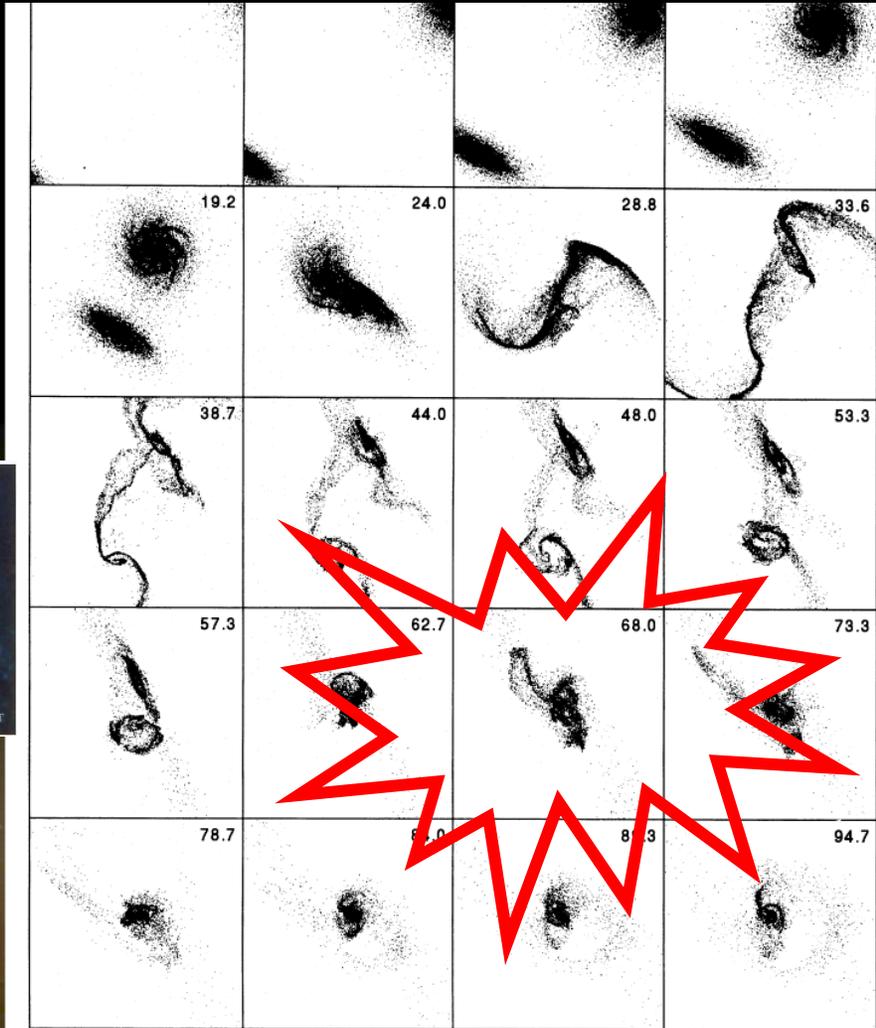
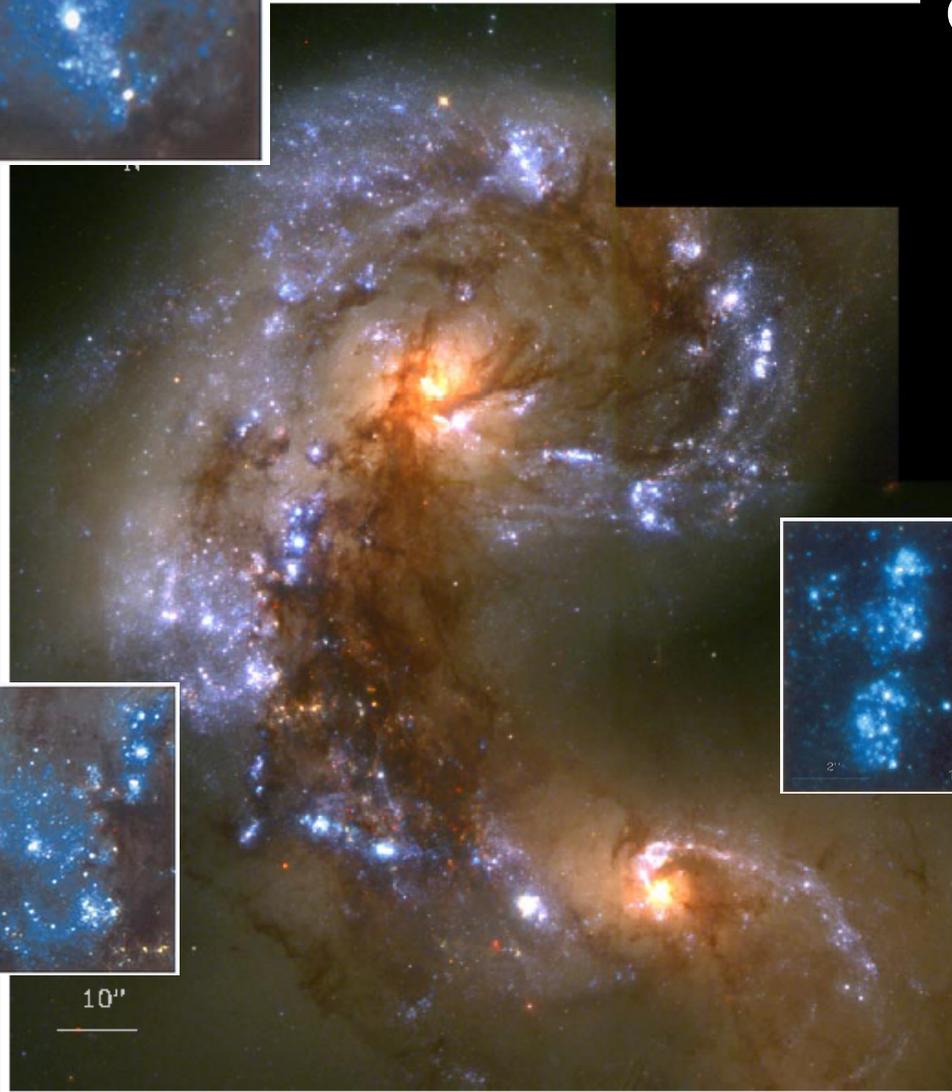
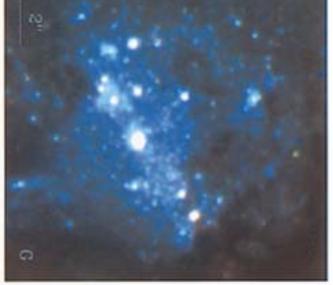
**Low- $n_{th}$  run**      **High- $n_{th}$  run**  
 $n_{th} = 0.1 n_H / \text{cc}$      $n_{th} = 100 n_H / \text{cc}$   
 $10^4 \text{K} < T < 10^8 \text{K}$      $10 \text{K} < T < 10^8 \text{K}$



1. 星形成の密度閾値は銀河構造に大きな影響を与える
2. SFR,  $\Sigma_{\text{gas}} - \Sigma_{\text{sfr}}$ -relation はその影響を受けない
3. High- $n_{th}$  run では、 $C_*$ 依存が弱くなる

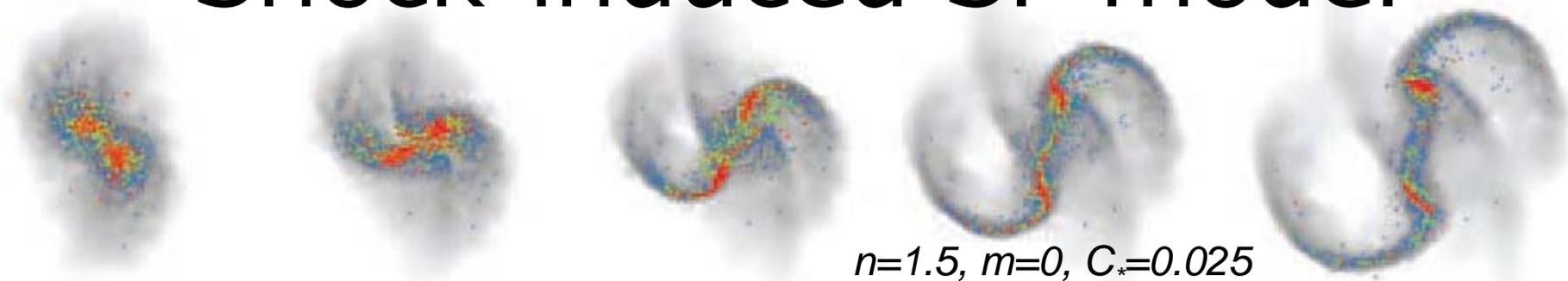
# Antennae

# Conventional simulations of galaxy-galaxy merging

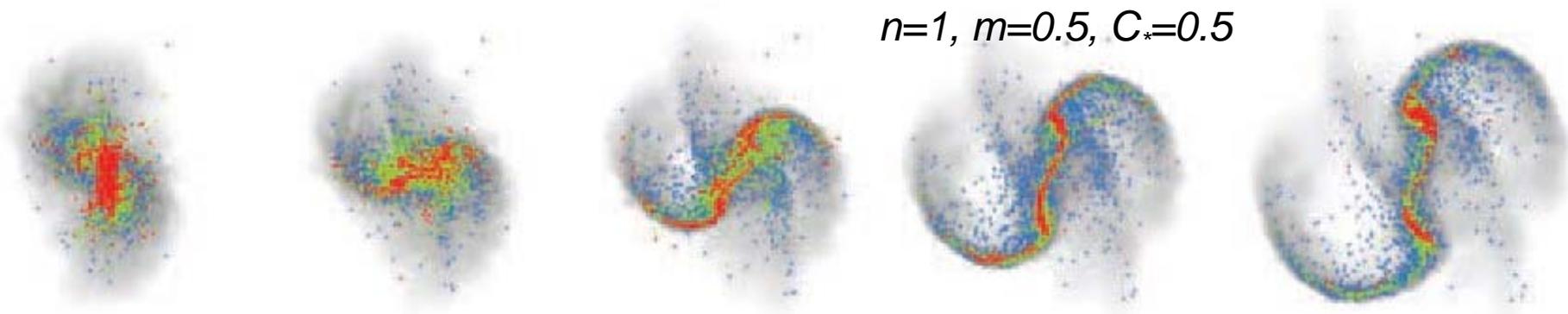


- スターバースト
- 星団形成( $10^6-7M_{\odot}$ )
- 低分解能計算(一粒子: $10^6M_{\odot}$ )
- 合体の最後にスターバースト

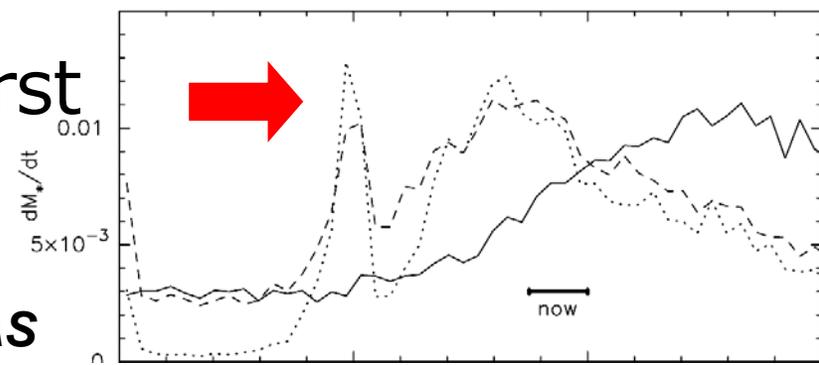
# Shock-induced SF model



$$dM_*/dt = C_* \int \text{MAX}(dU/dt, 0)^m$$

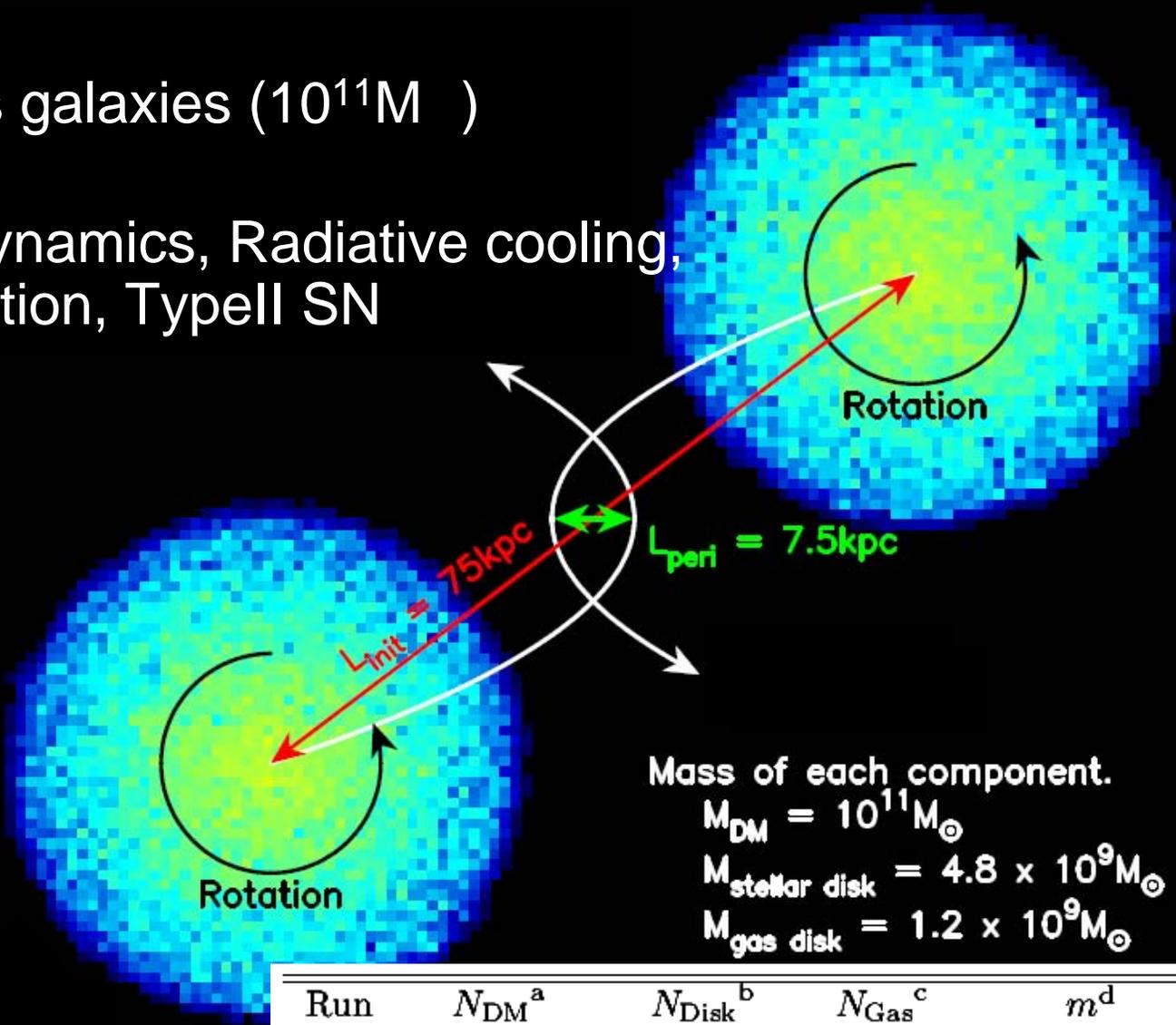


- First encounter でのstarburst
- 広がったSF regions



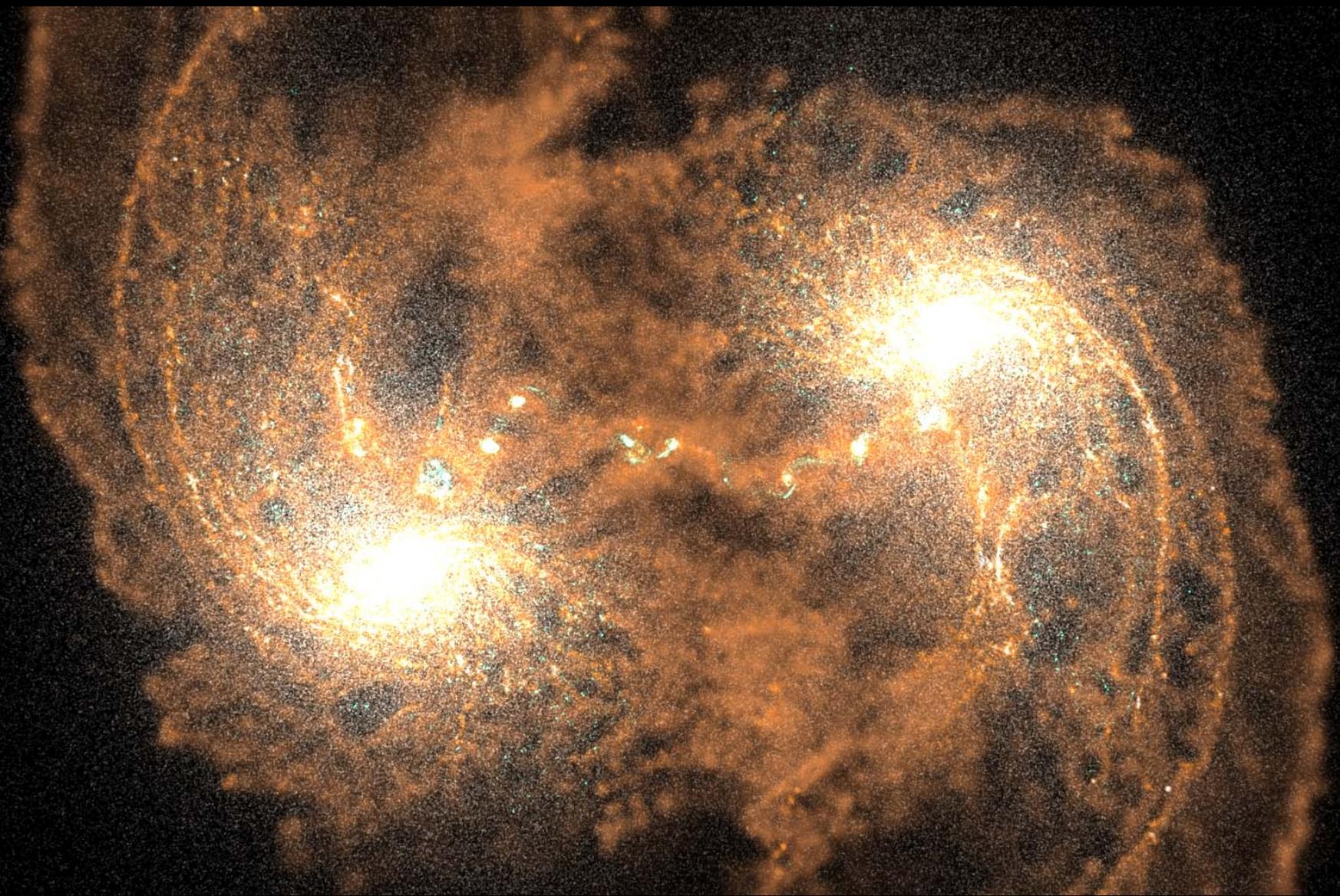
# Merger simulations

- Two equal mass galaxies ( $10^{11} M_{\odot}$ )
  - Parabolic orbit
- Gravity, Hydrodynamics, Radiative cooling, FUV, Star formation, Type II SN
  - $\Delta t = 20 \text{ pc}$
  - $Z = 0.5 Z_{\odot}$



Run	$N_{\text{DM}}^{\text{a}}$	$N_{\text{Disk}}^{\text{b}}$	$N_{\text{Gas}}^{\text{c}}$	$m^{\text{d}}$
M1	6 930 000	341 896	148 104	$3 \times 10^4 M_{\odot}$
M2	13 860 000	683 678	296 322	$1.5 \times 10^4 M_{\odot}$
M3	27 720 000	1 361 012	598 988	$7.6 \times 10^3 M_{\odot}$

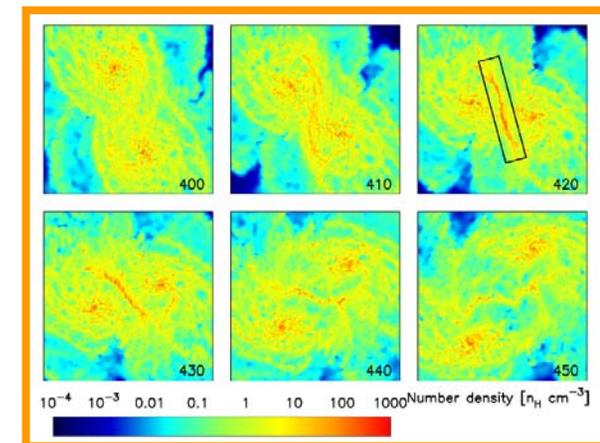
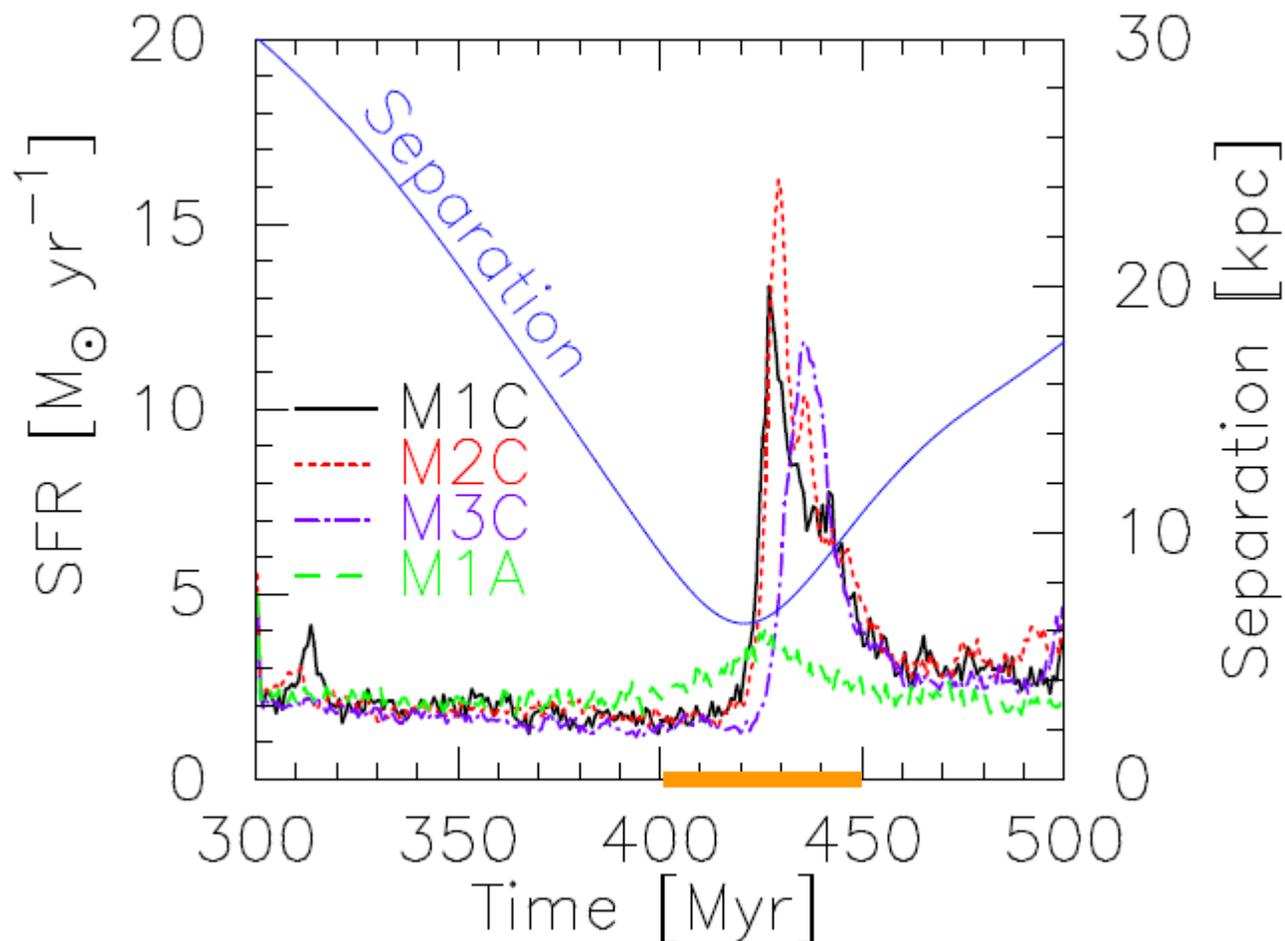
# Simulation of galaxy-galaxy merging



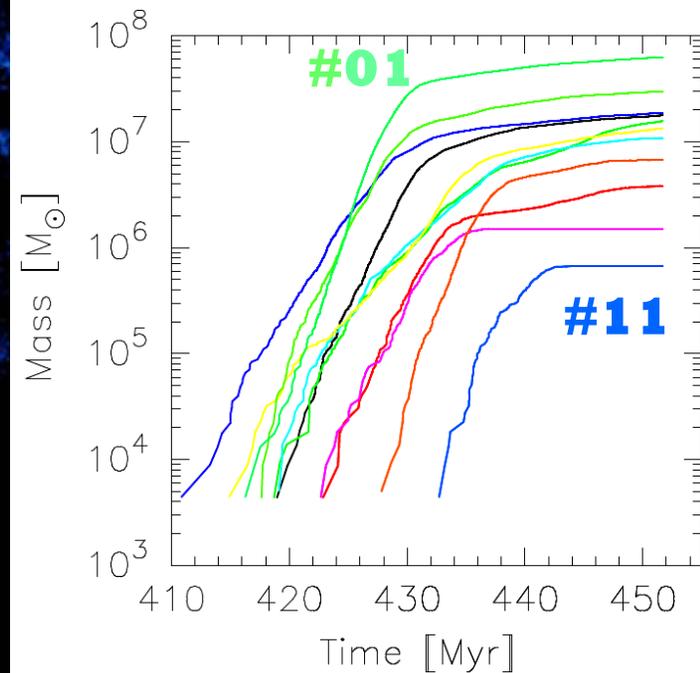
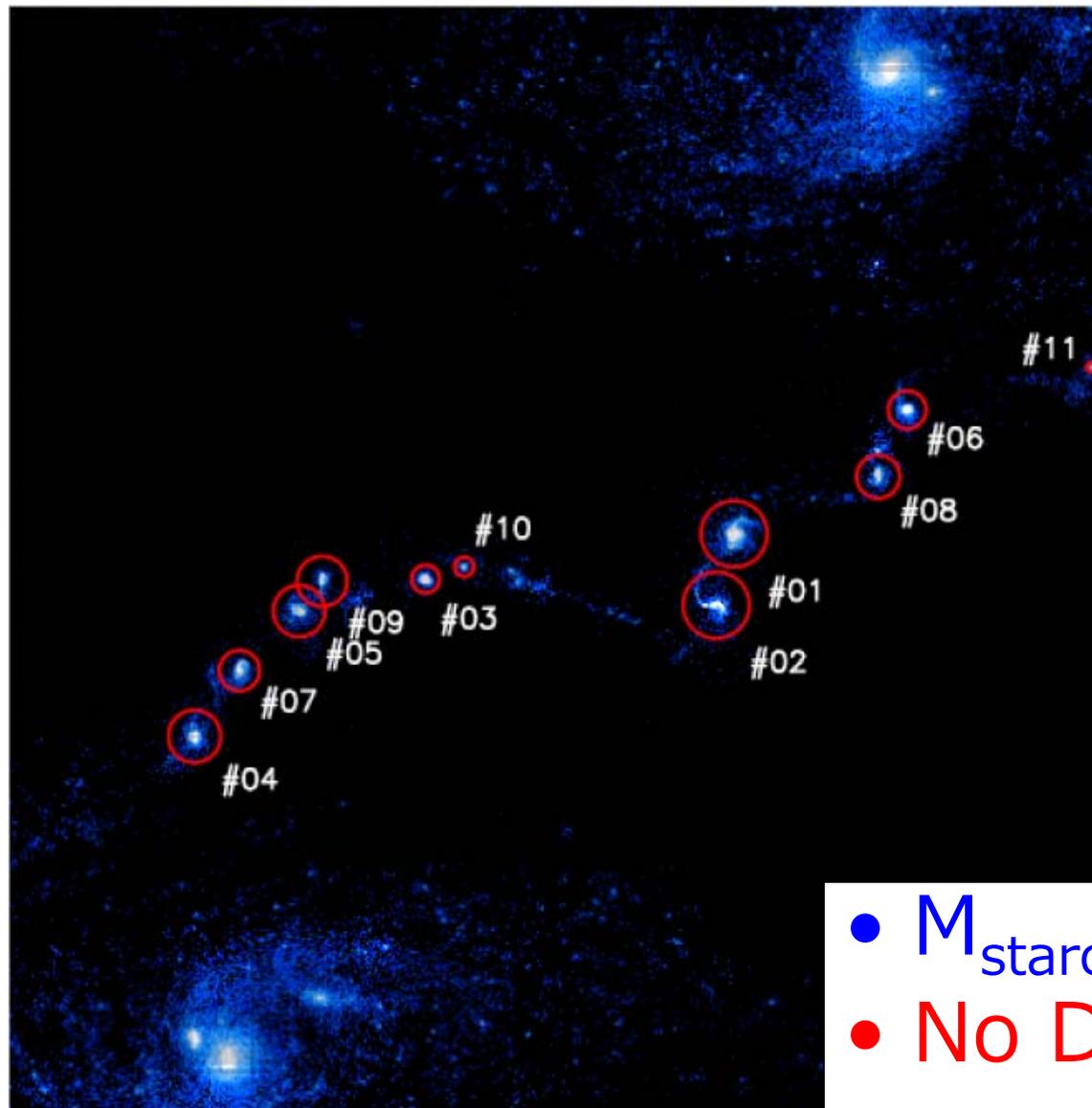
**Green: dense gas, brown: diffuse gas, white points: young stars**

**Visualization: Takaaki Takeda**

# “Starburst” at the first encounter



- 初期遭遇直後にスターバースト
- 従来のシミュレーション ( $T_{\text{cut}} = 10^4 \text{K}$ )では現れない



•  $T_{\text{form}} \quad 10^7 \text{yr}$

•  $M_{\text{starcluster}} \sim 10^{6-7} M_{\odot}$

• No Dark matter

Saitoh+ in prep.

0.1      1      10      100      Surface density [ $M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$ ]

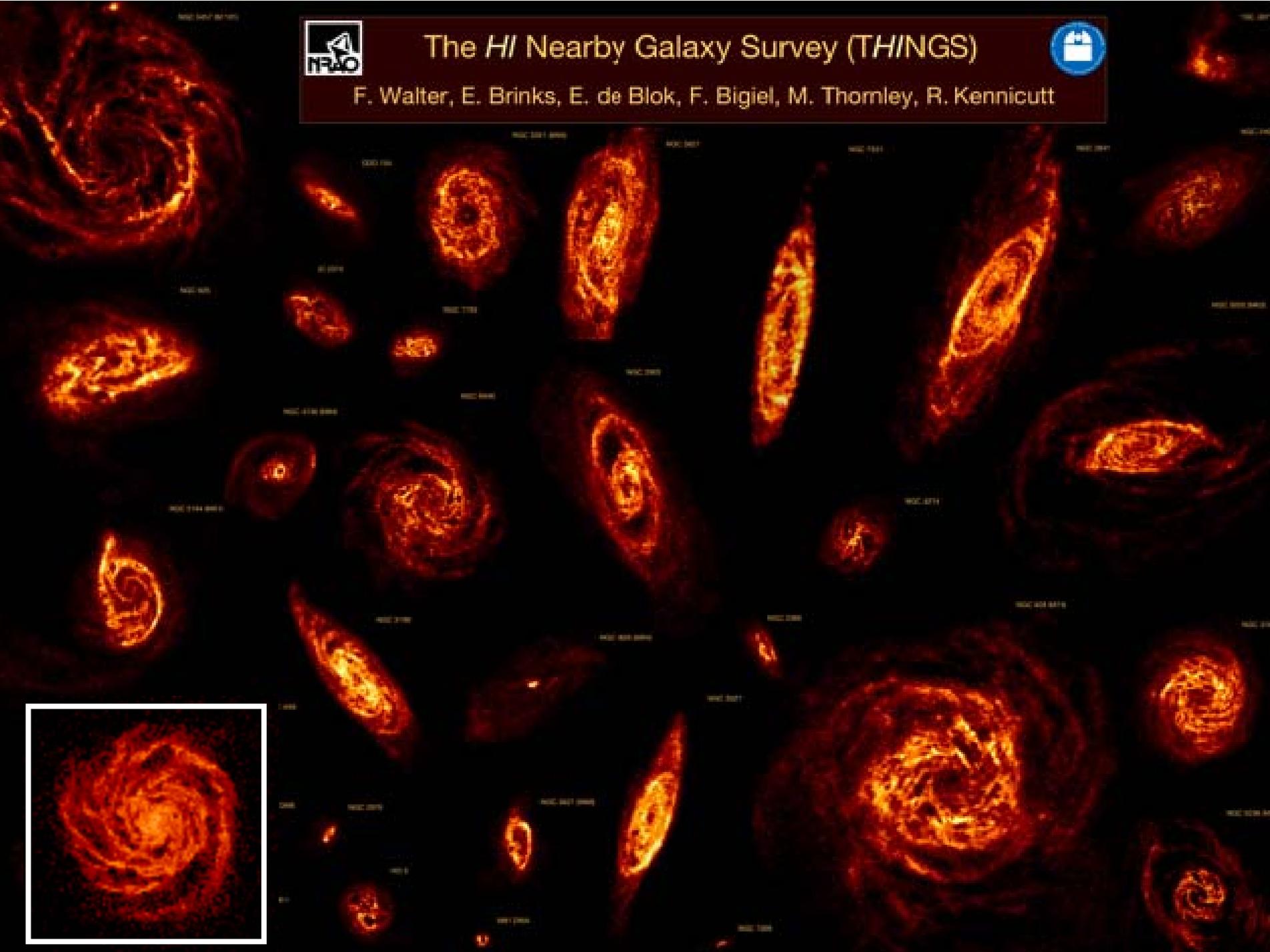




# The *HI* Nearby Galaxy Survey (*THINGS*)



F. Walter, E. Brinks, E. de Blok, F. Bigiel, M. Thomley, R. Kennicutt



# 他の高分解能シミュレーション

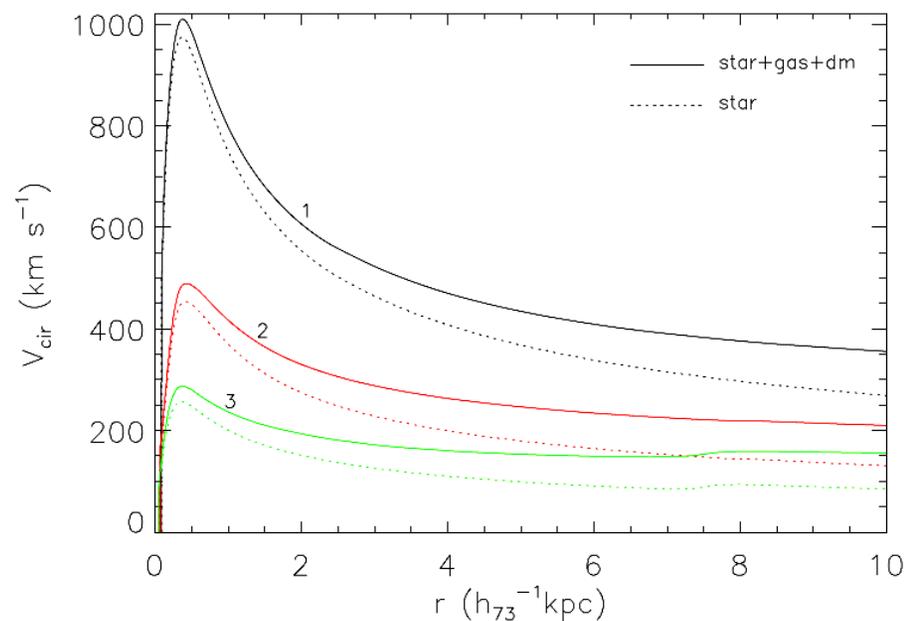
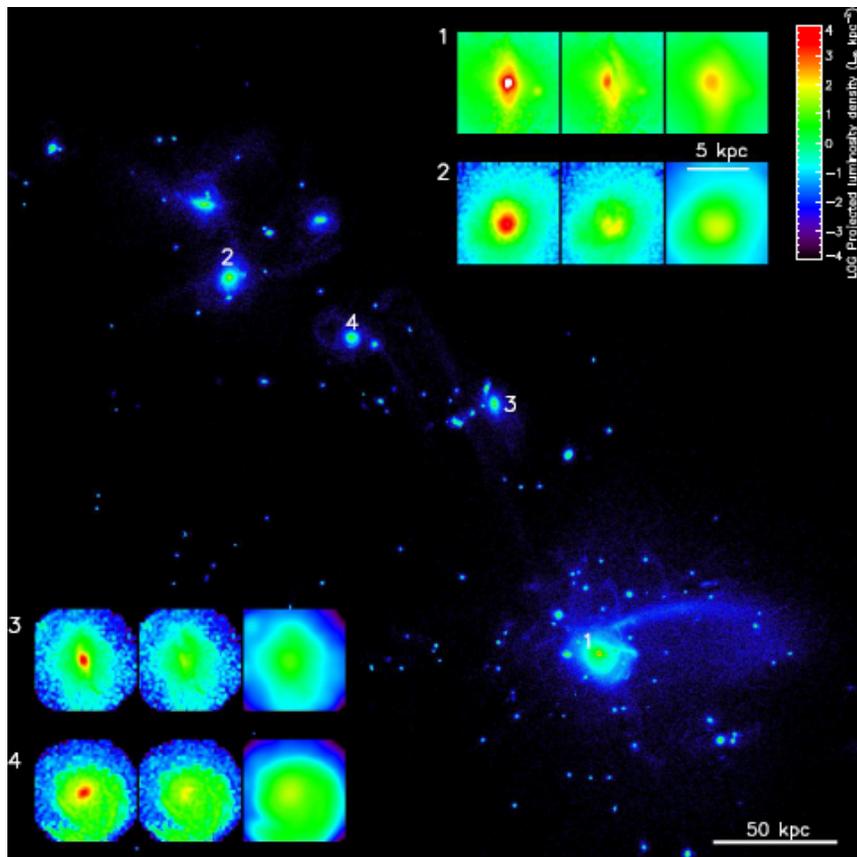
- Wada & Norman (1999,2001), Wada (2008)
  - ISM 構造、乱流、星形成、フィードバック
- Tasker & Bryan (2006,2007)
  - ISM 構造、星形成、フィードバック
- Wang & Abel (2007)
  - ISM, 磁場
- Susa (2008)
  - 輻射輸送計算
- Robertson & Kravtsov (2008)
  - 分子雲形成と分子雲内星形成
- Agertz+(2008)
  - ISM 構造、乱流、星形成、フィードバック

# AMR galaxy simulations

- Cosmological simulation はまだ多くない
  - Kravtsov (2003)  $z=4$ まで  $l_{\min}=0.26\text{kpc}$
  - Kravtsov & Gnedin (2005)  $z=3$ まで  $l_{\min}=0.26\text{kpc}$
  - Joung+(2008)  $z=3$ まで  $l_{\min}=0.84\text{kpc}/h$
  - Gibson+(2008):収録  $z=0$ まで  $l_{\min}=0.3\text{kpc}/h$ 
    - **$z=0$ まで完走した最初の AMR GF simulation** (でもM.C.なし)
- 孤立銀河 simulation (ISM 進化に注力)
  - Tasker & Bryan (2006,2007)
    - Star formation and feedback
  - Tasker & Tan (2008)
    - Molecular clouds formation and evolution
  - Wang & Abel (2007)
    - MHD

# AMR simulation by Joung+ 2008

- CDM simulation  $V=27.3/h$  Mpc<sup>3</sup>,  $L_{\min} = 0.84/h$  kpc comoving.  $z=3$ まで
  - Computer: NCSA Tungsten Dell Cluster(?)
  - Code: ENZO



**ARM なら何もかもがうまくいく  
というわけでは当然ない**

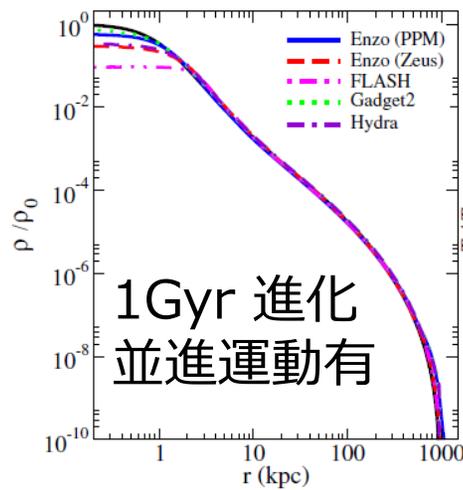
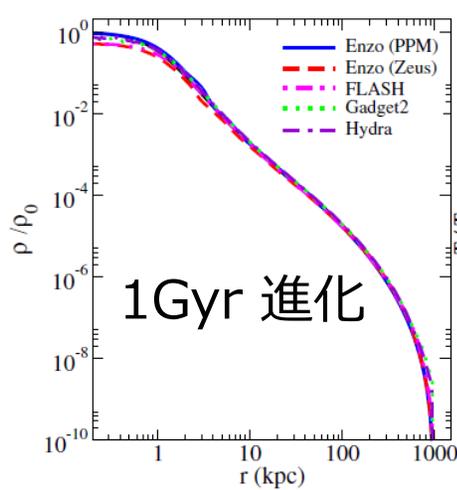
# Euler スキームで GF 計算する際の困難

## • Time step 問題

- $\Delta t = C \Delta X / V$  :  $\Delta X$  = メッシュサイズ、 $V \sim 200 \text{ km/s}$
- $\Leftrightarrow$  ラグランジュスキーム
  - $\Delta t = C \Delta X / V_{\sigma}$  :  $V_{\sigma} \sim 10 \text{ km/s}$  (速度分散)

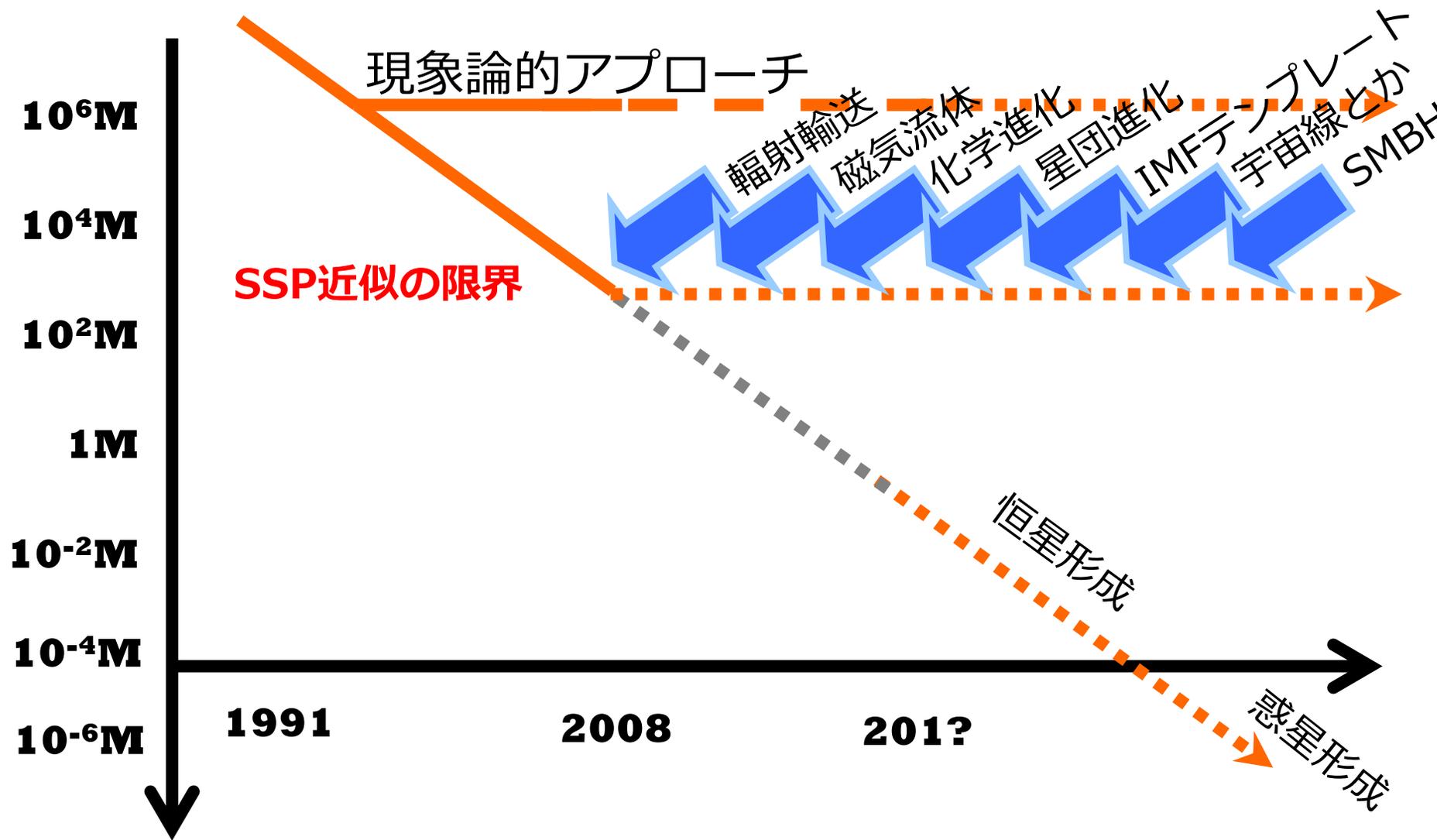
## • 数値拡散

- 一周 30000 メッシュ @  $R=5 \text{ kpc}$  ( $\Delta x=1 \text{ pc}$ )
  - $10^7$  年で 2000 メッシュ ( $\Delta x=1 \text{ pc}$  &  $V=200 \text{ km/s}$ )
- 高次スキーム? (そんなのを AMR に実装するのか?)



- 1Gyr 進化 時
- 進化 進化 進
- AMR core
- Tasker+(2008)

# GFシミュレーション研究の展望



# まとめ

## ● 銀河形成シミュレーション

### – 角運動量問題

- バリオンプロセスの扱いが重要

### – 現象論的なFBモデルでとりあえず解決+ $\alpha$

## ● “高精度”銀河形成シミュレーション

### – 現実的なEOS/SF/FBモデルの導入

### – 銀河構造の骨格が見えてきた

- VERA/JASMINE の成果に期待

### – AMR GF シミュレーションも始まった！

- AMRなら全てがうまくいくという単純なものではない
- AMRならではの困難との闘い
- 粒子計算と結果を比較しつつ