

# 天の川創成プロジェクト

和田桂一、富阪幸治、小久保英一郎、  
台坂博、斎藤貴之、出田誠（国立天文台）

牧野淳一郎（東大 国立天文台）

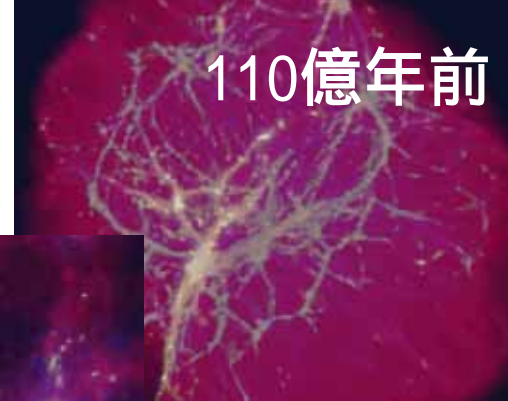
吉田直紀（名大）

4D2Uプロジェクト（国立天文台）



# 天の川創成プロジェクト

110億年前



80億年前



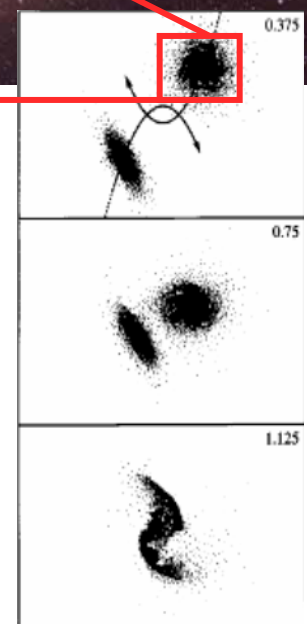
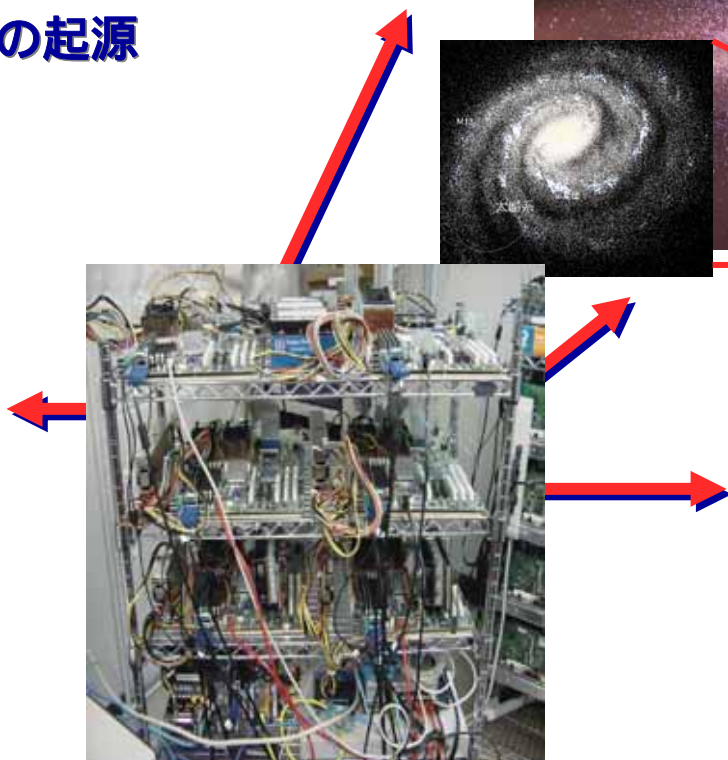
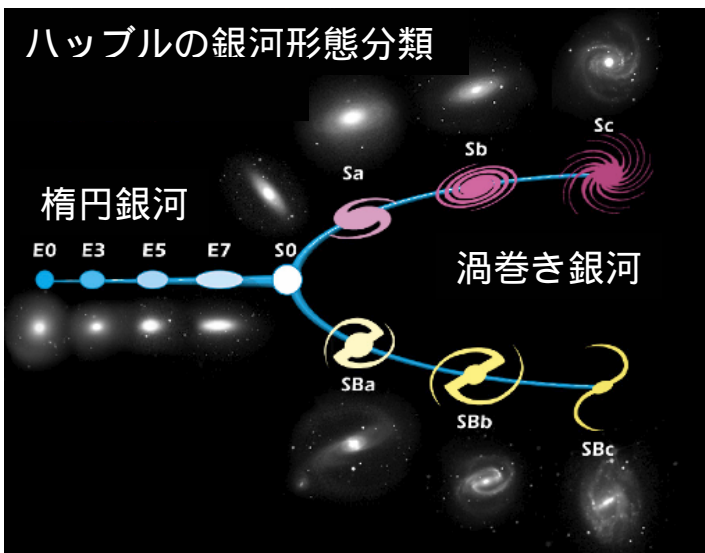
現在の天の川



第一原理に基づく理論シミュレーションにより、

- 1) 天の川銀河の形成進化のプロセスを世界ではじめて示す。
  - ◆ 天の川の3次元構造 (DM分布 etc.)
  - ◆ 既知の素過程に問題があるか?
- 2) 銀河形態の起源を探る
- 3) 銀河中心巨大ブラックホールの起源

ハッブルの銀河形態分類



# 銀河形成シミュレーションとは

- ◆ **流体 + 重力多体計算**
    - ◆ 自己重力系 (長距離相互作用、非線形成長)
    - ◆ 圧縮性
    - ◆ 多相 (中性ガス、電離ガス、分子ガス)
    - ◆ エネルギー散逸 (輻射冷却、さまざまな加熱源)
    - ◆ 化学進化 (分子形成、破壊)      多次元輻射輸送計算
  - ◆ **多成分系**
    - ◆ 無衝突系 (星、ダークマター)
    - ◆ 衝突系 (高密度の星団)
    - ◆ 散逸系 (星間ガス)
    - ◆ 固体 (星間塵)      惑星形成
- 成分間の交換 = 星形成・爆発**

# マルチスケール

- ◆ 銀河 =  $10^{11}$  x 太陽
  - ◆ 環境 銀河進化
    - ◆ 銀河団 = 1000 銀河
- 

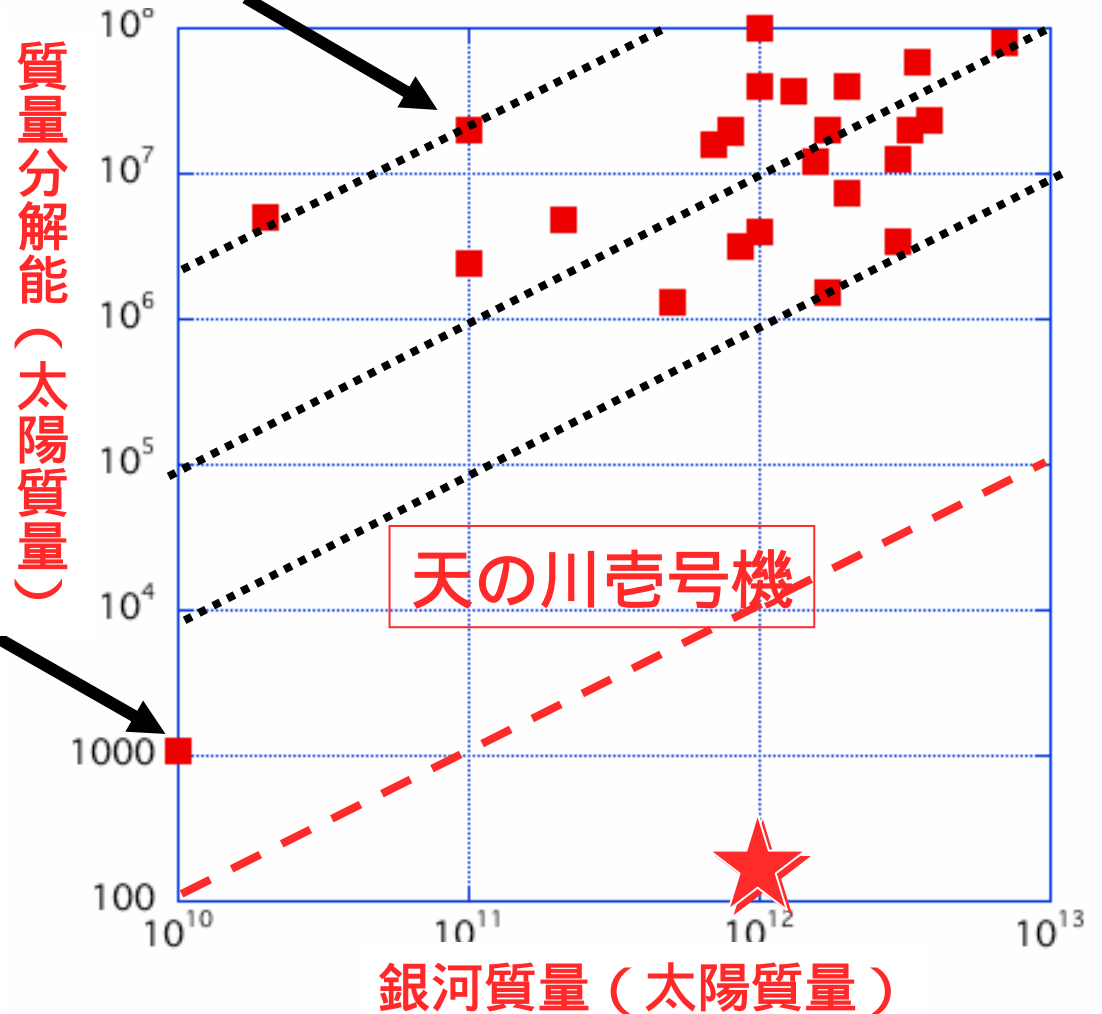
- ◆ 星・惑星系: 1AU ( $10^{11}$ m)
  - ◆ 星間雲: pc ( $10^{16}$  m)
  - ◆ 銀河: 10 kpc ( $10^{20}$ m)
  - ◆ 銀河団: 1Mpc ( $10^{22}$ m)
- 

- ◆ 銀河団ガス:  $10^{-27}$  g/cc
- ◆ 星間ガス:  $10^{-25}$  -  $10^{-21}$  g/cc
- ◆ 銀河の平均密度:  $10^{-25}$  g/cc
- ◆ 星・惑星:  $\sim 1$  g/cc

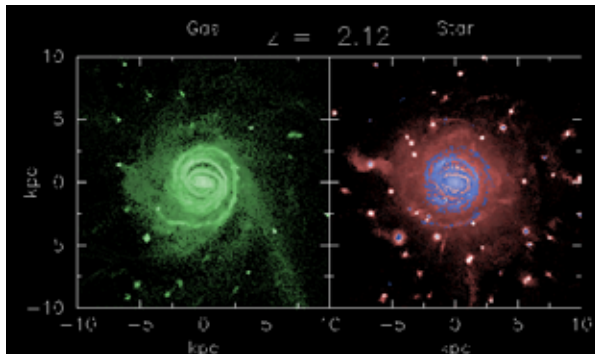
- ◆ 銀河形成:  $10^{17}$  sec
- ◆ 星形成:  $10^{14}$  sec
- ◆ 超新星爆発: 1 sec

# 我々はどこを 目指すのか？

Katz & Gunn 1991



Saitoh et al. 2004



# なぜ高分解能が必要か 星形成領域の構造を分解したい

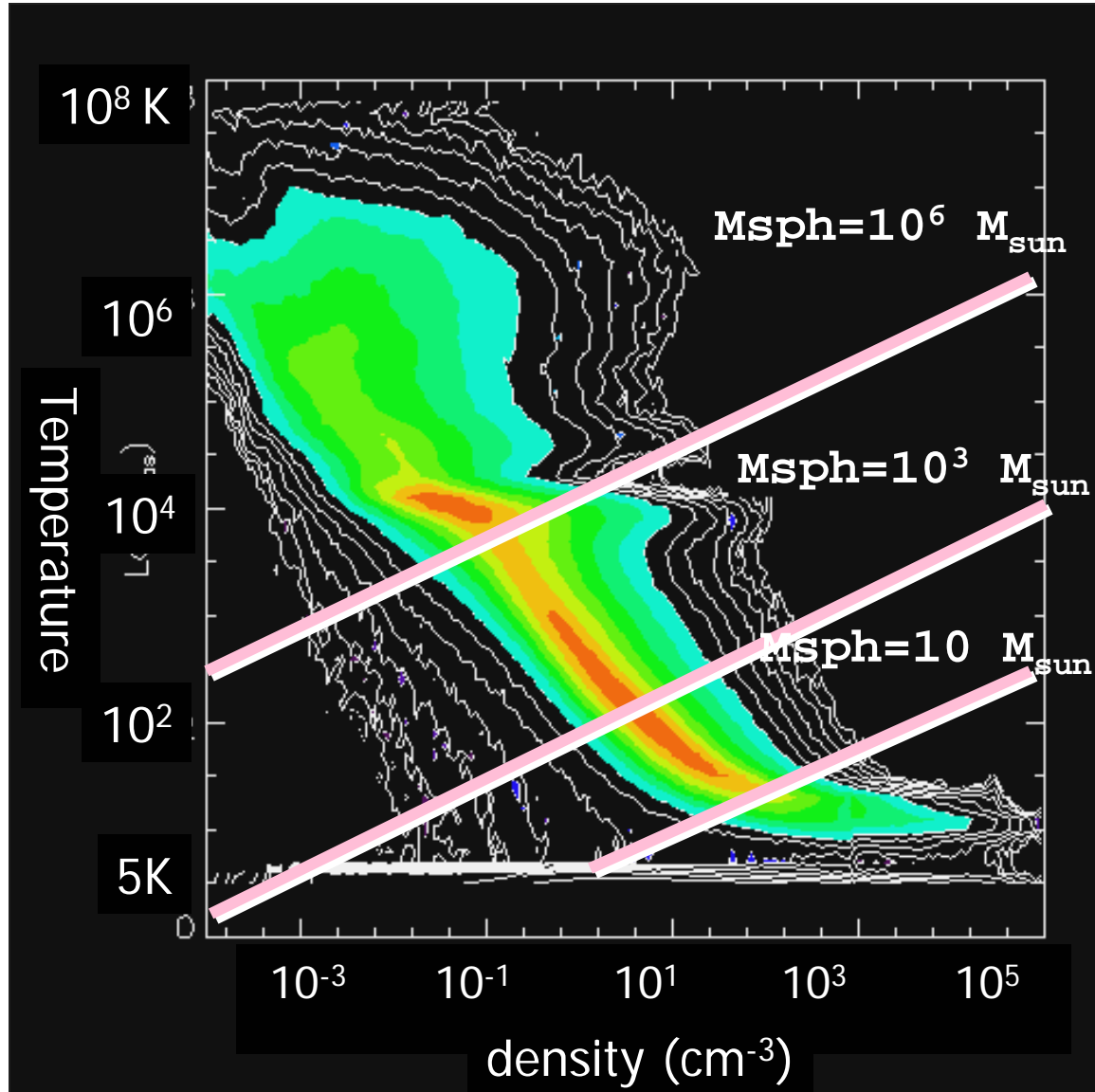
## 従来の計算

$M_{\text{sph}}=10^6 M_{\text{sun}}$  では、  
 $1 \text{ cm}^{-3}$ ,  $10^4 \text{ K}$  のガスしか扱えない。

星形成、フィードバックにad hocなモデル導入が不可避

$M_{\text{sph}}=10 M_{\text{sun}}$  で、  
分子雲  $1000 \text{ cm}^{-3}$ ,  $100 \text{ K}$  を分解

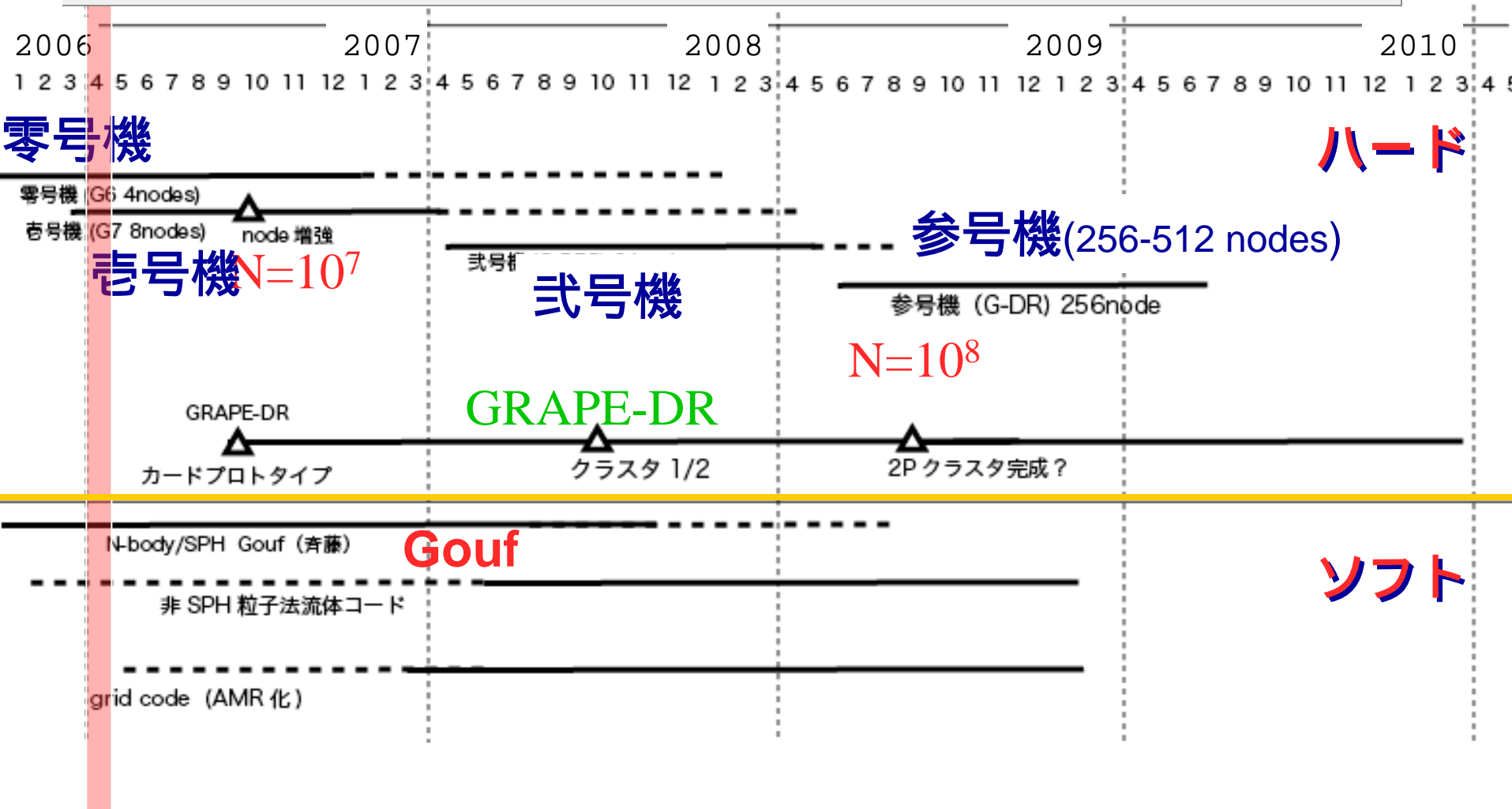
天の川サイズで、  
SPH  $\sim 1$ 億体



カラーコントア：星間ガスの高精度mesh計算(volume)

# 天の川創成プロジェクト

## 開発スケジュール(ハード、ソフト)



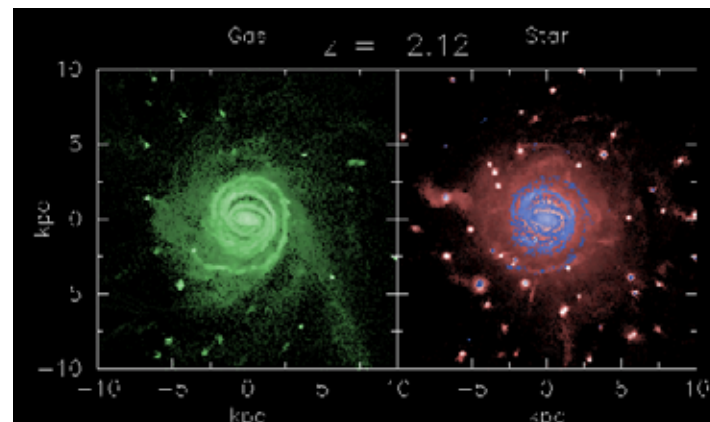
# 零号機（プロトタイプ）

- ◆ 4 ノード (Xeon)+GRAPE-6A
  - ◆ 銀河形成並列計算コードの開発
  - ◆ 性能評価（ピーク性能0.2TF程度～VPP5000/32）

- ◆ **プロダクトラン**

- ◆ Total mass  $10^{10} M_{\text{sun}}$  (ISM  $10^9 M_{\text{sun}}$ )の銀河形成
- ◆ ガス質量分解能 $500 M_{\text{sun}}$  SPH 200万體
- ◆ 数週間/1モデル
  - ◆ Cf. 現状  $1000 M_{\text{sun}}$  w/ SPH 100万體
    - ◆ 6ヶ月/1モデル (GRAPE-5)

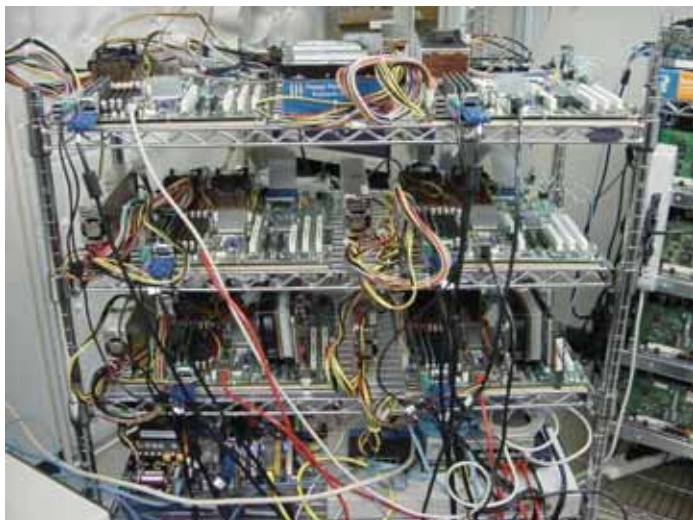
GRAPE5による  
100万體SPH計算  
©斎藤貴之





# 天の川零号機（プロトタイプ1号）

	サーバー	計算ノード	予備ノード
ホスト名	milkyway	amanogawa0~3	spiral
CPU (Xeon EM64T)	3.6DGHz (デュアル)	3.6DGHz (シングル)	3.2DGHz (シングル)
マザーボード	Intel E7520BD2 (7520 チップセット)		
メモリ	DDR-400 reg. 512MB×4		DDR-333 1MB×2
内蔵 HDD (OS 用)	40GB ATA133		
外部 HDD	—	300GB×2 SATA	—
OS	Fedora Core 2	FreeBSD 5.4R amd64	Fedora Core 2



- ◆ 4 CPU (Xeon)+GRAPE-6A x 4
  - ◆ 銀河形成並列計算コードの開発
  - ◆ 性能評価（ピーク性能0.2TF程度）

# 壱号機(プロトタイプ2号)

## 2007年度

- ◆ Total mass :  $10^{10} M_{\text{sun}}$  (星間ガス  $10^{8-9} M_{\text{sun}}$ )
- ◆ ガス質量分解能  $100 M_{\text{sun}}$  (星形成領域分解)  
SPH 1000万粒子 (従来の10倍)
- ◆ 恒星系空間分解能 10-100 pc (薄い銀河円盤を分解)  
N体粒子 1000万粒子 (従来の10倍)
- ◆ 1モデル/1 ~ 2ヶ月

# 天の川壱号機仕様

8ノード: Opteron 250(2.4GHz)/2GB +GRAPE7

GRAPE-7

(Fukushige et al.)

無衝突系用 (G5後継機)、

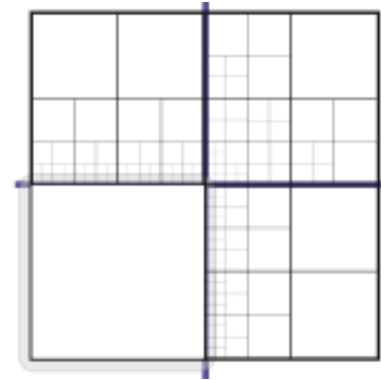
PCI-Xバス 1GB/s (PCIの8倍)

FPGA (再構成可能デバイス) によるコスト削減

ピーク性能: 0.7TFlops (G5の15倍、G6Aの2倍)

ノード増強(16~)予定

## Gouf<sup>仮</sup>

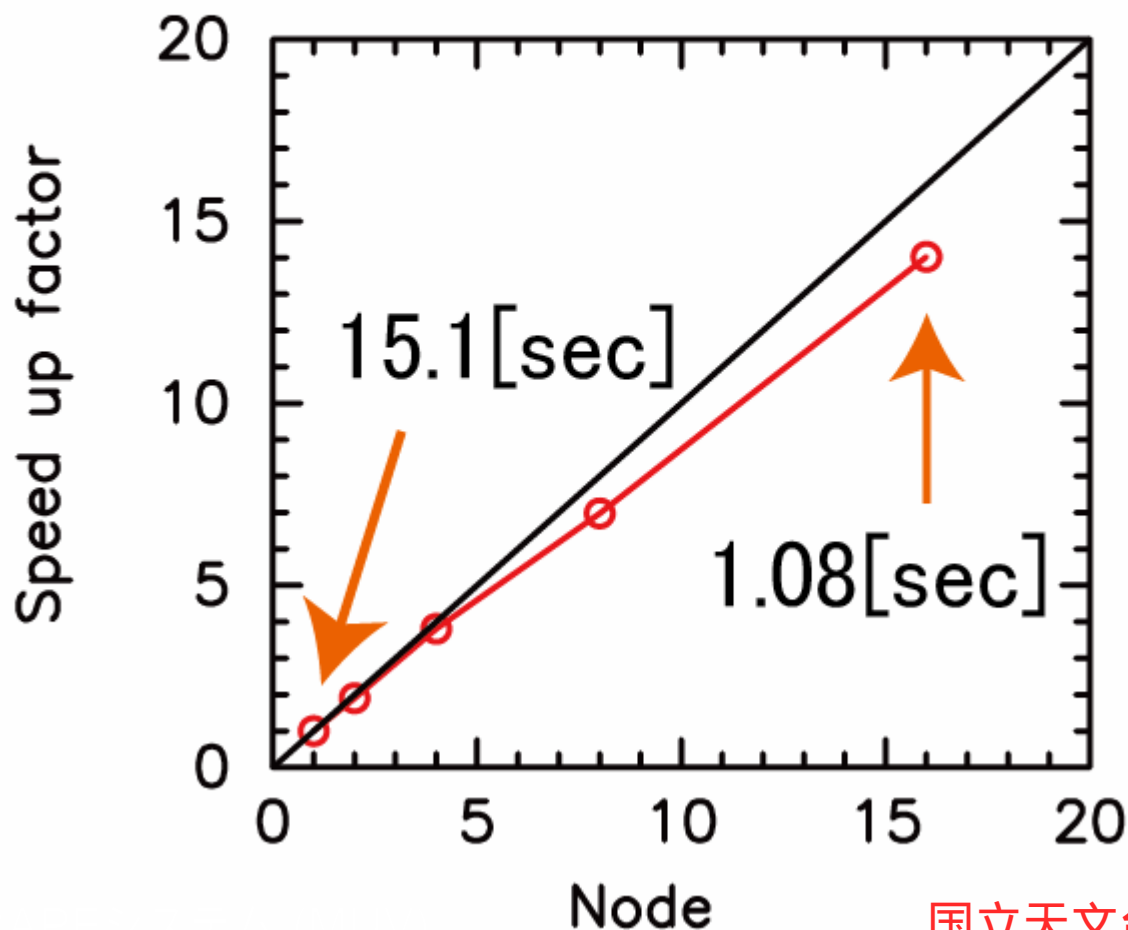


- ◆ 領域分割: Bisection
- ◆ 重力: Tree+GRAPE
- ◆ 流体: Smoothed Particle Hydrodynamics
  - ◆ Heating/cooling
- ◆ 星形成 (ガス 星)
- ◆ 並列方法: Message Passing Interface

# 並列性能評価（重力）

a) 一様分布100万体重力計算

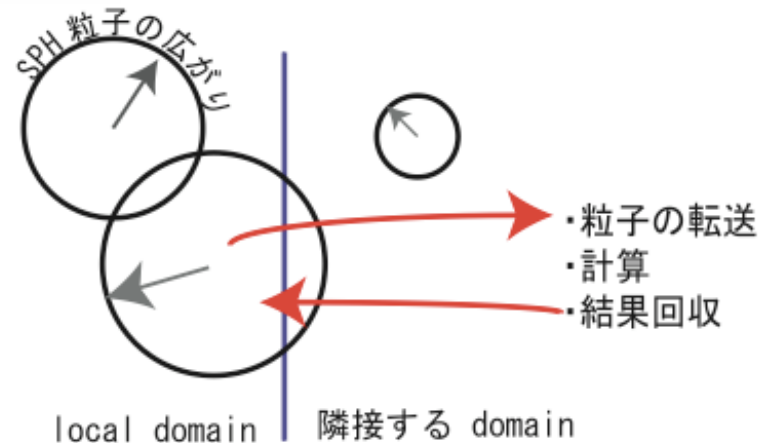
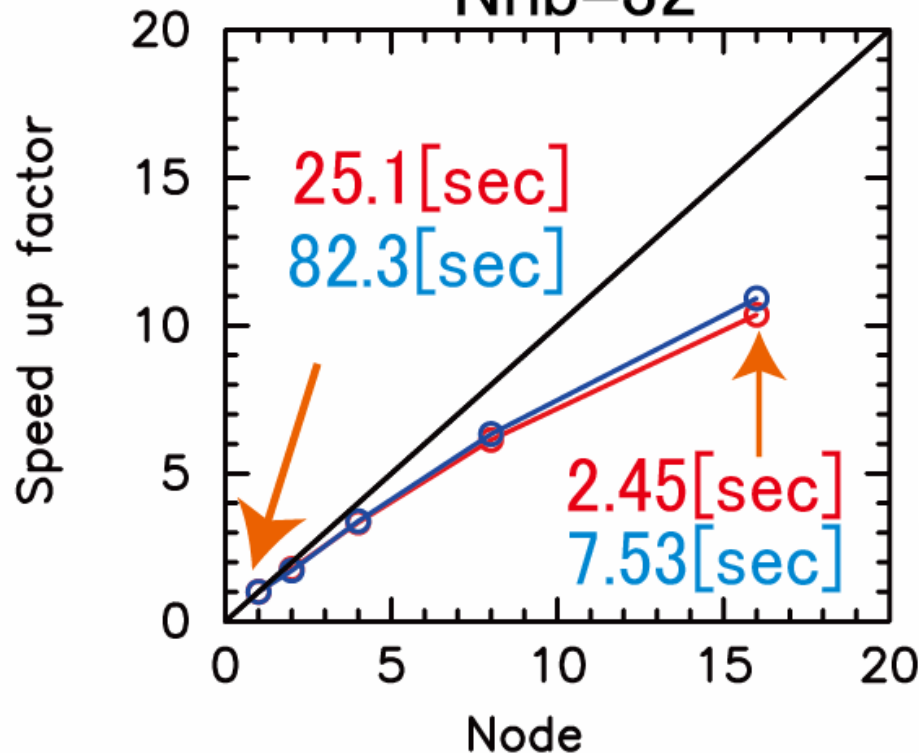
$$\theta = 0.75$$



# 並列性能評価(流体)

c) 一様分布100万粒子SPH計算

Nnb=32



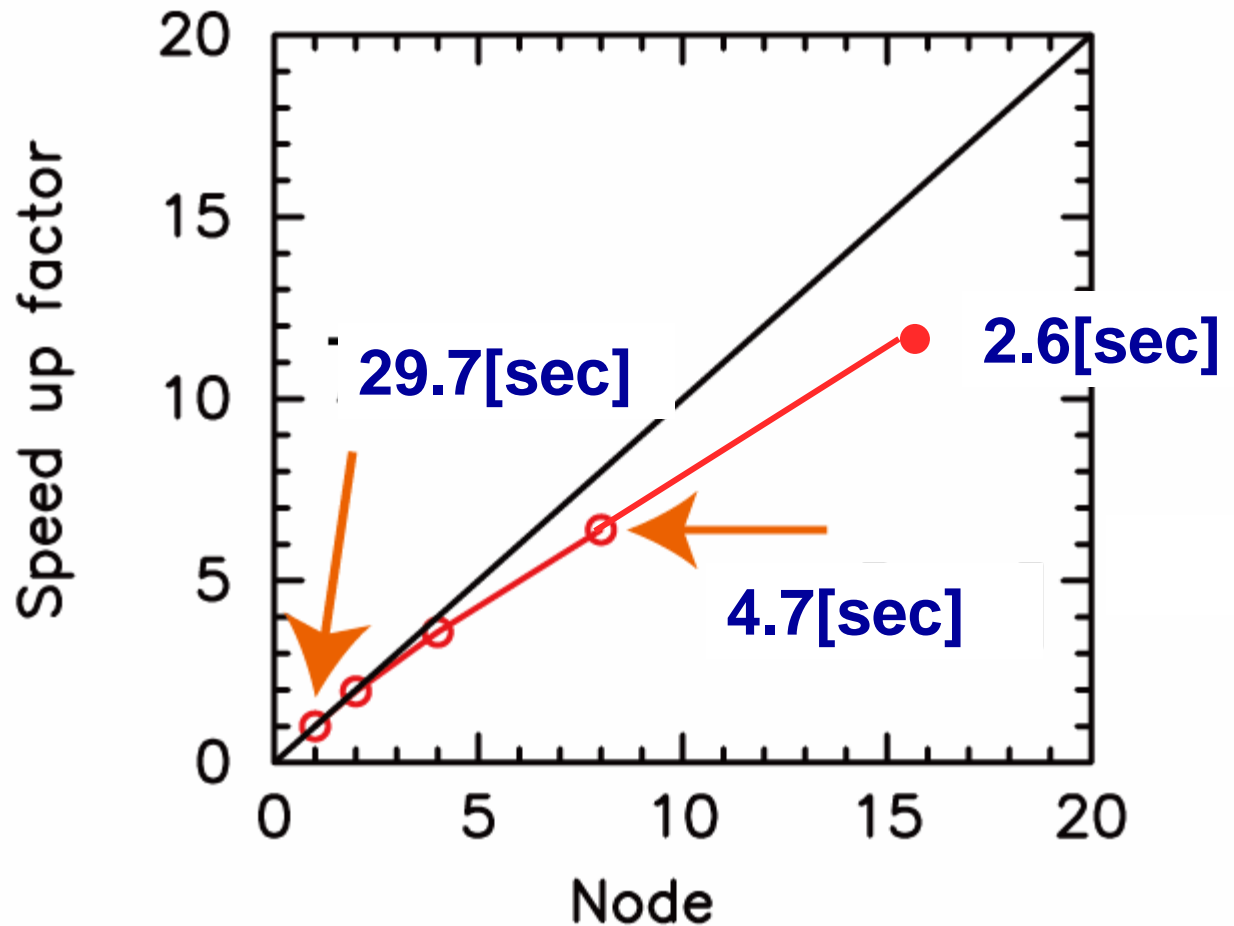
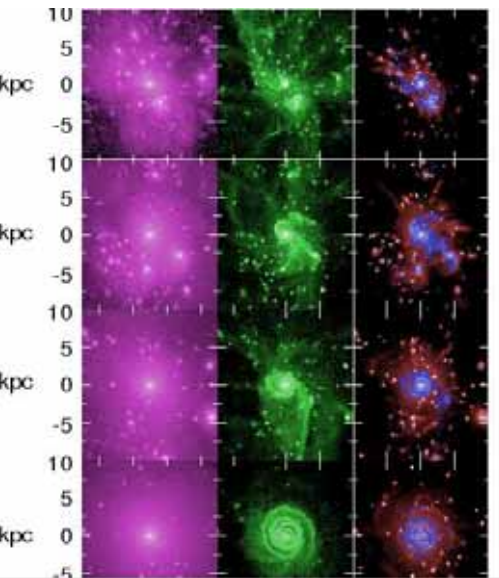
計算ドメインをまたがる  
粒子の転送が発生する

赤: 密度ループ  
青: 圧力勾配ループ

# 並列性能評価（非一様な構造）

ロードバランスの悪化

b) CDMシミュレーション200万体重力計算  $z \sim 4.5$ ,  $\theta = 0.75$



# 天の川創成 = 総合計算科学

- ◆ 初期条件、大規模構造形成の理解
- ◆ 星形成過程、星間ガスの物理
  - ◆ Stellar feedback (energy & radiation)
  - ◆ Chemistry & Dynamics
  - ◆ 磁場
- ◆ 輻射輸送
  - ◆ 銀河形成過程への影響
  - ◆ 星間ガスの多相構造
- ◆ 観測プロジェクトとの連携
  - ◆ 現在の天の川銀河の理解
- ◆ 準解析的モデルによるアプローチ
- ◆ 計算科学との連携
  - ◆ 専用計算機システムの効率的利用
  - ◆ 高精度・大ダイナミックレンジの流体、磁気、輻射流体シミュレーション
    - ◆ AMR
    - ◆ 非SPH流体スキーム
  - ◆ 大規模データの可視化、解析手法