

# FIRSTプロジェクトの概要



*Elucidation on the Origin of FIRST Generation Objects by HMCS-E*

梅村 雅之

筑波大学 計算科学研究センター 素粒子宇宙研究部門  
数理物質科学研究科 物理学専攻

# 文部科学省 科学研究費補助金 特別推進研究

## 「融合型並列計算機による宇宙第一世代天体の起源の解明」

平成16年度～平成19年度  
予算総額 約3億円

### ・サイエンス

第一世代天体(宇宙で最初の日体) = 天体の起源 & 物質の起源  
宇宙物理のフロンティア

宇宙論, 銀河形成論, 元素起源論に大きな影響を与える  
根源的問題

### ・方法

輻射流体力学 = 光伝播 + 流体力学  
世界に先んじた先駆的取り組み

### ・計算機開発

“融合型並列計算機”という新しいコンセプト  
理学・工学の研究者が共同

# FIRST推進体制

## 理学・工学の研究者の緊密な協力体制

### 理学

梅村 雅之 (計算科学研究センター  
・数理物質科学)

中本 泰史 (計算科学研究センター  
・数理物質科学)

須佐 元 (立教大学・理学部)

森 正夫 (専修大学・法学部)

新任講師 1名

研究支援員 2名

特別研究員 1名

### 工学

佐藤 三久 (計算科学研究センター  
・システム情報工学)

朴 泰祐 (計算科学研究センター  
・システム情報工学)

高橋 大介 (計算科学研究センター  
・システム情報工学)

ビッグバン

第一世代天体

銀河の誕生

星の誕生

超新星爆発

惑星系形成

惑星

生命の誕生

NASA *Origins Mission*



宇宙時間

10<sup>-44</sup>秒

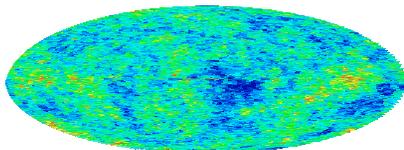


天体の起源

光(輻射), バリオン  
ダークマター

物質の起源

密度ゆらぎ



軽元素合成  
(水素, ヘリウム, ...)

50万年

宇宙中性化

宇宙暗黒時代

第一世代天体

(宇宙で最初の自己組織化)

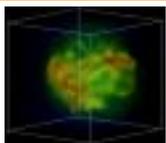
超新星爆発

重元素合成  
(酸素, 炭素, 窒素...)

球状星団

1億年

宇宙再イオン化



銀河形成

超新星爆発

酸素, 炭素, 窒素...  
金属元素, ...

銀河団

太陽系

水 (H<sub>2</sub>O)

140億年

(現在)

宇宙構造

生命

有機物

2002年10月31日  
朝日新聞朝刊

Christlieb et al. 2002, Nature

銀河ハロー中に超低金属小質量星を  
発見

$$M=0.8M_{\odot}$$

$$[\text{Fe}/\text{H}] \approx 10^{-5.3}$$

$$[\text{C}/\text{H}] \approx 10^{-1.3}$$

$$[\text{N}/\text{H}] \approx 10^{-3}$$

Christlieb et al. 2004

元素比

25 $M_{\odot}$ の超新星で説明可能

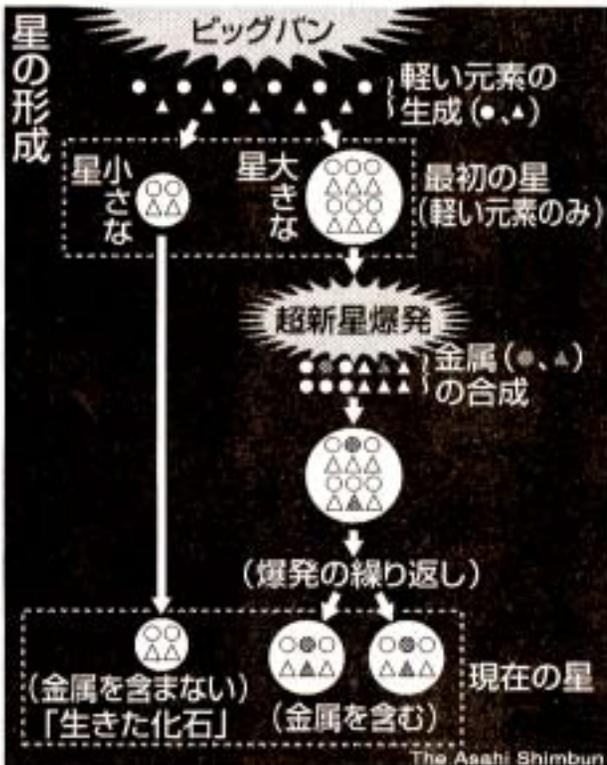
(Umeda & Nomoto 2003)

少なくとも100 $M_{\odot}$ 以下の星が誕生

# 宇宙誕生直後の星発見

ビッグバンによる宇宙誕生直後にできたとみられる、金属をほとんど含まない星を米独などの研究チームが初めて発見した。宇宙の歴史を解明する新たな手がかりとなる。31日発行の英科学誌ネイチャーに発表する。

## 米独などのチーム



含有金属ほぼゼロ

# 宇宙物理学の3本柱

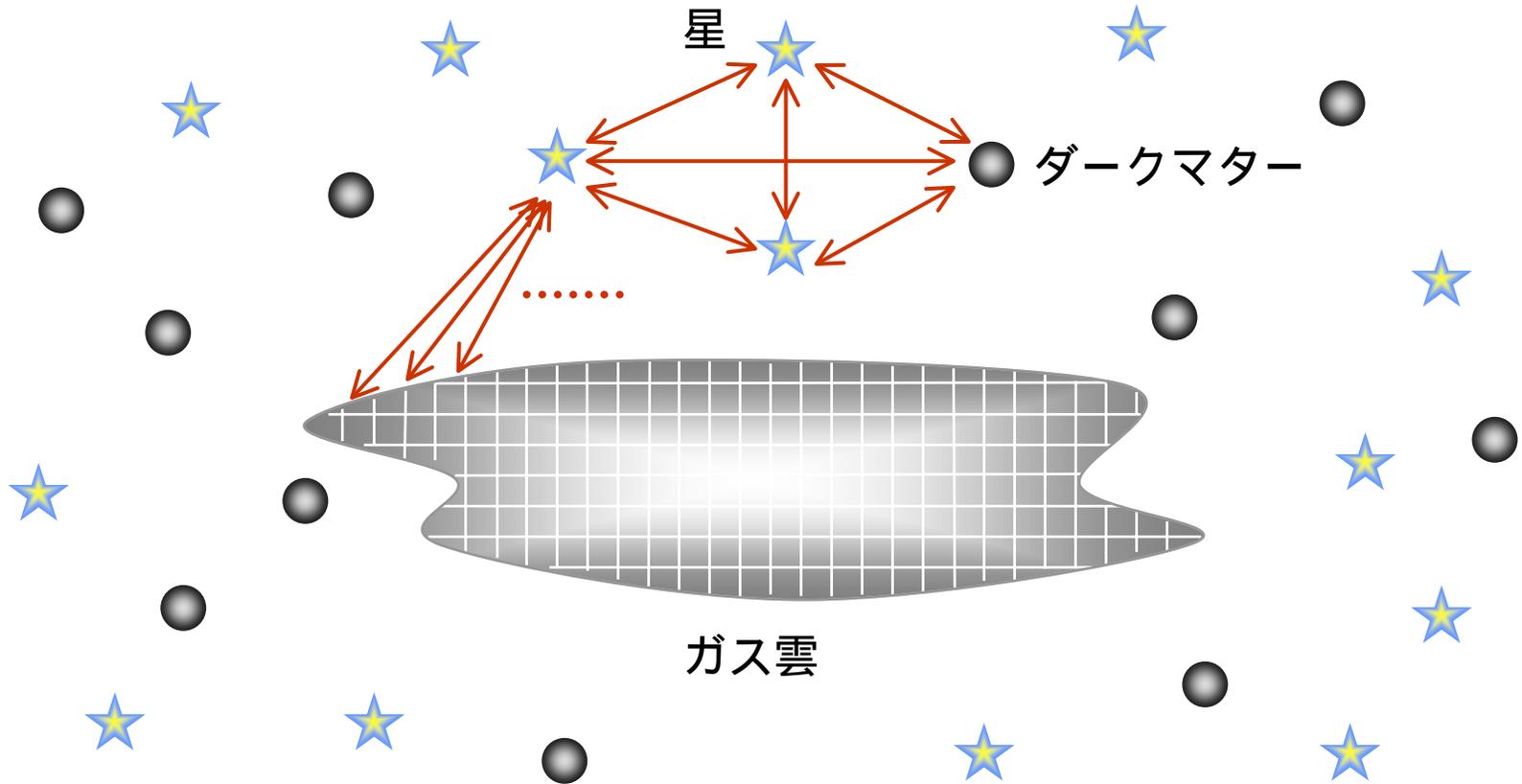
重力  
(万有引力)

流体  
(核子物質)

輻射  
(光)

宇宙輻射流体力学

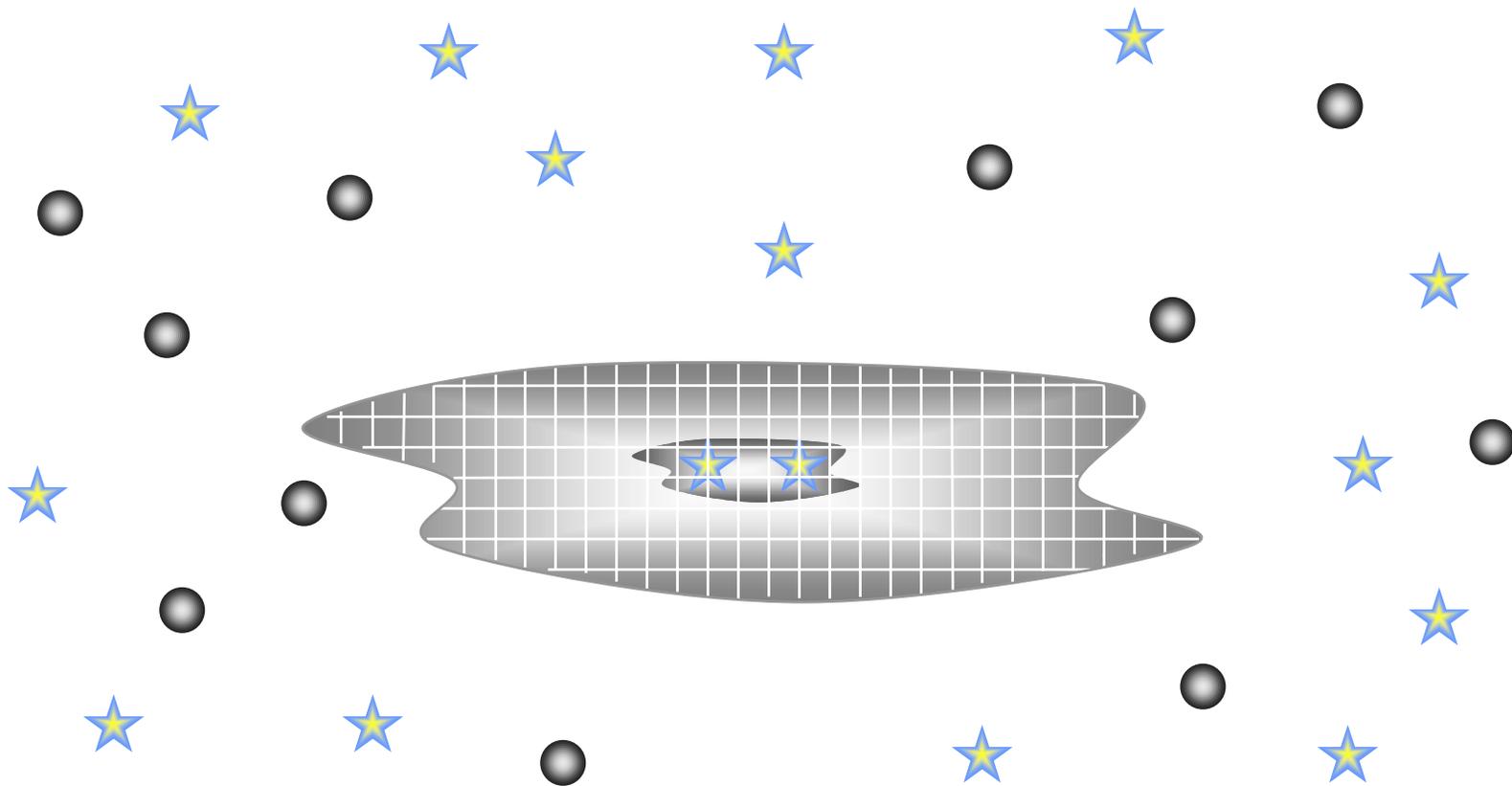
# 重力（万有引力）



## 高精度重力計算

$$\text{計算量} \propto {}_N C_2 = \frac{N(N-1)}{2} = 5\text{千億回} \quad (N = 100\text{万})$$

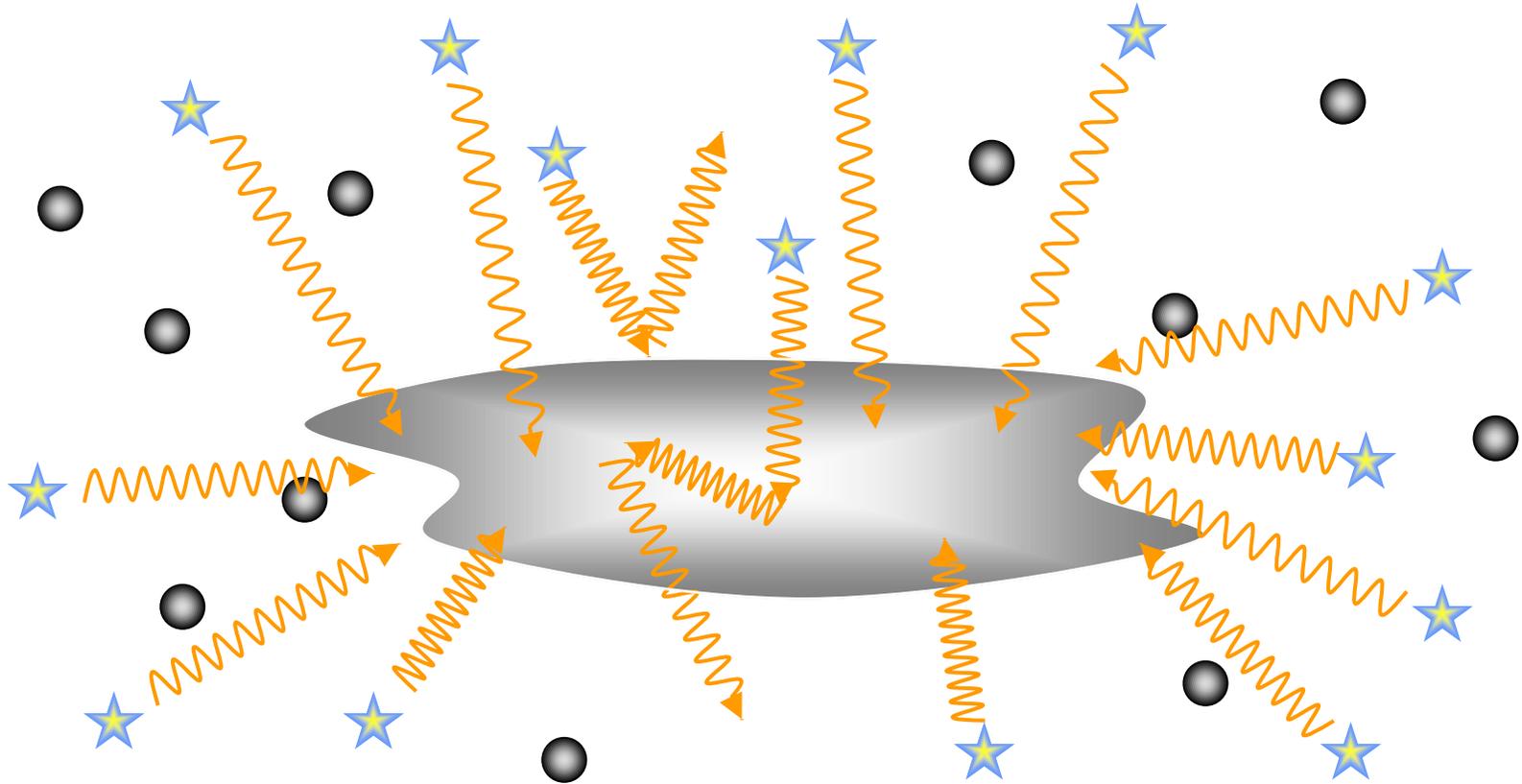
# 流体（核子物質）



流体力学計算（複雑な計算）

$$\text{計算量} \propto N$$

# 輻射(光)



輻射輸送計算：(3+3)次元

計算量  $\propto N^2 = 1$ 兆回 ( $N = 100$ 万)

# 輻射流体力学

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{I}_\nu}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla \mathbf{I}_\nu = \chi_\nu (\mathbf{S}_\nu - \mathbf{I}_\nu)$$

## 光の輸送(輻射輸送)方程式

ローレンツ変換されたボルツマン方程式

自由度: 空間3D, 方向2D, 振動数1D = 計6D問題

(エネルギー輸送)

+

## 流体方程式 & 重力場

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla \mathbf{p} - \rho \nabla \phi - \left( \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{P} \right) + \frac{\mathbf{v}}{c^2} \left( \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} \right)$$

# HMCS: Heterogeneous Multi-Computer System

## 筑波大 + 東大

日本学術振興会未来開拓学術推進研究事業「計算科学」分野  
「次世代超並列計算機の開発」プロジェクト 平成9年～13年度

**重力**  
**GRAPE-6**  
8枚~8TFLOPS



PCIバス × 8

**Cluster**

**(Parallel IO)**

100base TX

・  
16IOU  
:  
:

**HUB**

・  
16IOU  
:  
:

**輻射流体力学**

**CP-PACS**

2048PU~600GFLOPS

**内部通信速度**

**RDMA: 300MB/s**

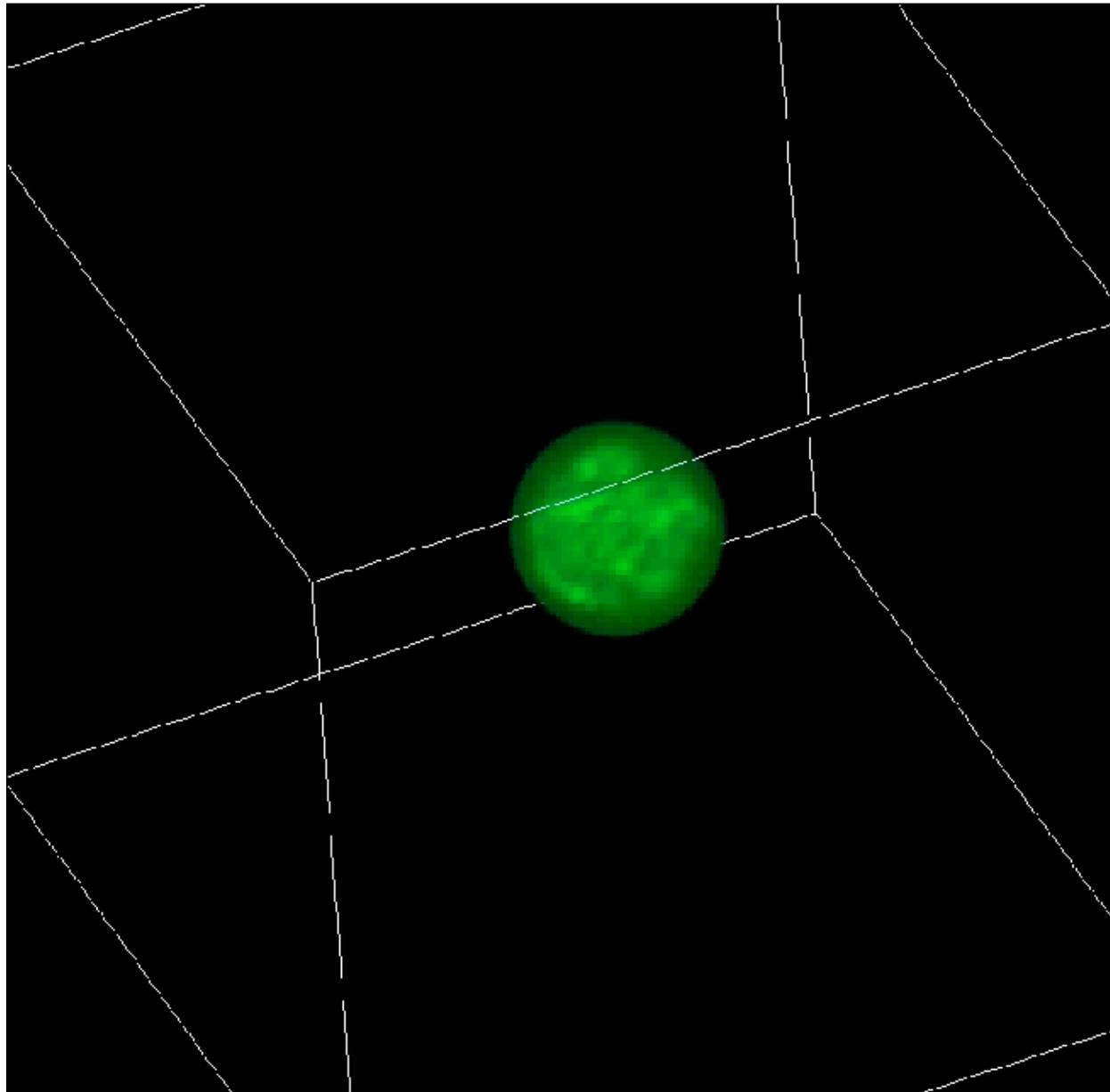


**平成14年度日本情報処理学会論文賞**

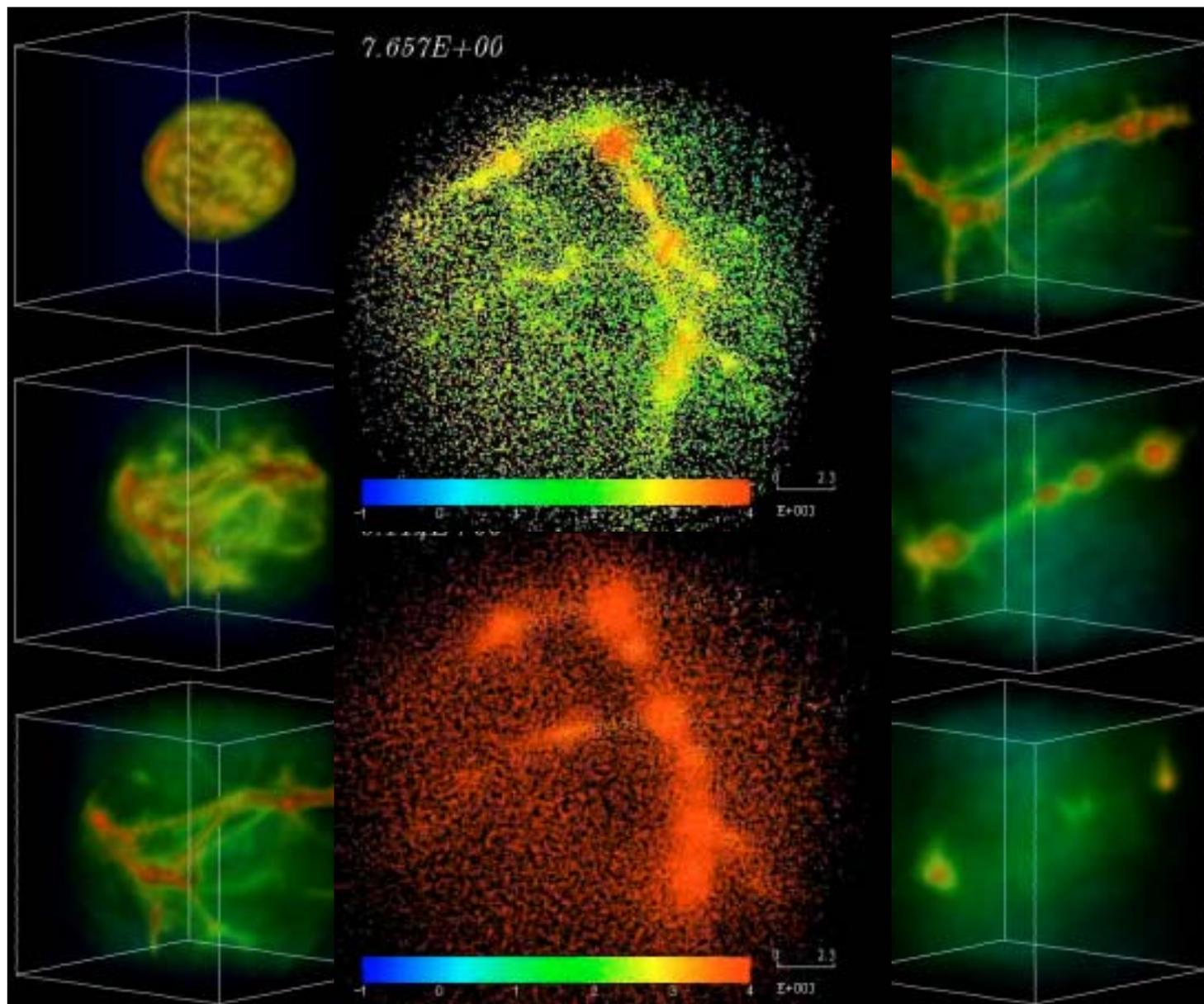
Heterogeneous Multi-Computer System における重力効果を含む宇宙輻射流体計算

# 第一世代銀河の形成

## 10万粒子輻射流体計算(世界初)



# 再電離宇宙における銀河形成 (Susa & Umemura 2004a,b)



# 大規模輻射流体のための要求性能

## 粒子法

目標: 1千万粒子 ( $10^7$ ) 以上 ( First object  $10^6 M_{\odot}$  , 質量分解能  $0.1 M_{\odot}$  以下)

$$\text{主記憶容量(CPU)} = 80\text{GB} \left( \frac{N}{10^7} \right) \left( \frac{N_{\text{list}}}{100} \right)$$

$$\text{輻射流体計算(CPU)} = 83\text{Tflops} \cdot \text{hr} \left( \frac{N}{10^7} \right) \left( \frac{N_{\text{step}}}{10^4} \right)$$

$$\text{重力計算(GRAPE)} = 910\text{Tflops} \cdot \text{hr} \left( \frac{N}{10^7} \right) \left( \frac{N_{\text{step}}}{10^4} \right)$$

Host: GRAPE = 1:10

$$\text{通信時間(CPU-GRAPE)} = 0.2\text{hr} \left( \frac{N}{10^7} \right) \left( \frac{N_{\text{list}}}{100} \right) \left( \frac{N_{\text{node}}}{256} \right)^{-1} \left( \frac{T_{\text{PCI}}}{100\text{MB/s}} \right) \left( \frac{N_{\text{step}}}{10^4} \right)$$

## 格子法

目標:  $2048^3$  以上 (空間分解能  $1\text{pc}$  以下)

$$\text{主記憶容量(CPU)} = 552\text{GB} \left( \frac{N}{2048} \right)^3$$

$$\text{輻射流体計算(CPU)} = 128\text{Tflops} \cdot \text{hr} \left( \frac{N}{2048} \right)^3 \left( \frac{N_{\text{step}}}{10^4} \right)$$

# 東大システム

(牧野先生, 福重先生,  
川合先生他)

## GRAPE-6 クラスタ

GRAPE-6 ボード ( 1 Tflops ) × 64 = 64 Tflops

PCクラスタ ( 16 ノード ~ 200 Gflops )

**Host : GRAPE = 1 : 320**

## GRAPE-6A クラスタ

**[ PC + GRAPE-6A ( 130 Gflops ) ] × 24 ノード**

**Host : GRAPE = 1 : 10**



Fig. 3. Top and bottom views of a GRAPE-6A board

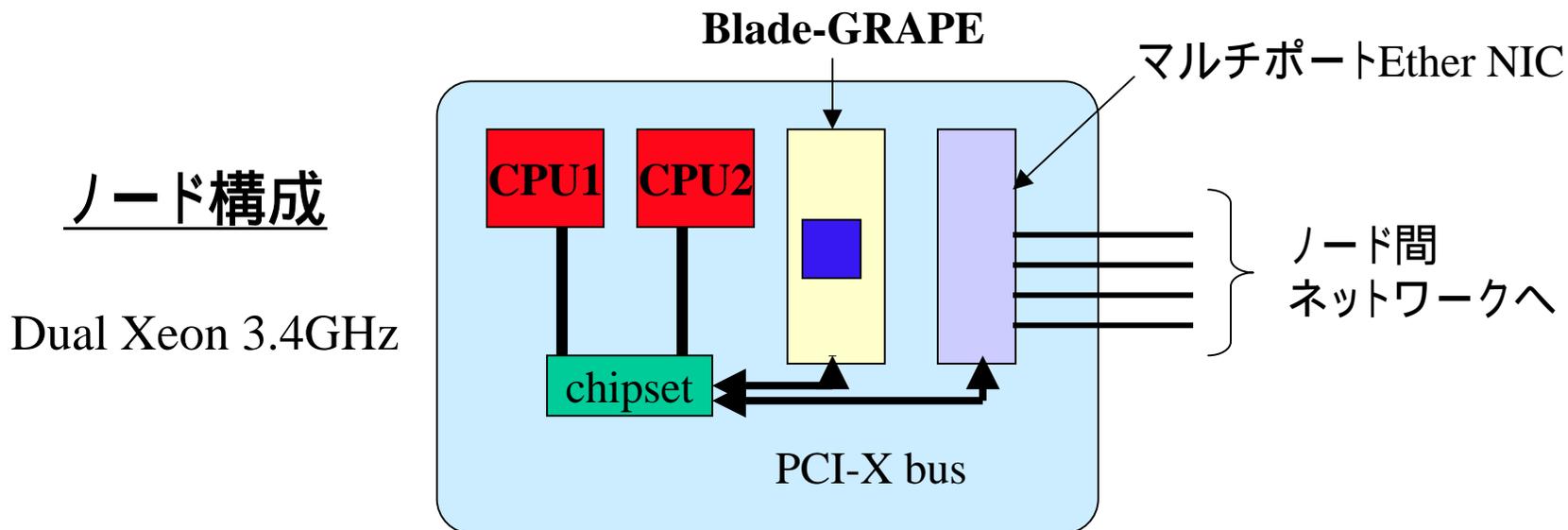
**GRAPE-6A ( 4 GRAPEチップ )**



1 ノード

Fig. 11. Photograph of the parallel GRAPE-6A cluster

# 融合型並列計算機 (HMCS-E: *HMCS-Embedded*) — HMCSの発展形(高密度・大規模化) —



- 2Uサイズサーバをノードとする  
(高密度化, 低価格化)
- PCI-XバスによってGRAPEモジュールをオンボード実装  
(CPUとGRAPE間的高速データ転送を実現)

# Blade-GRAPE

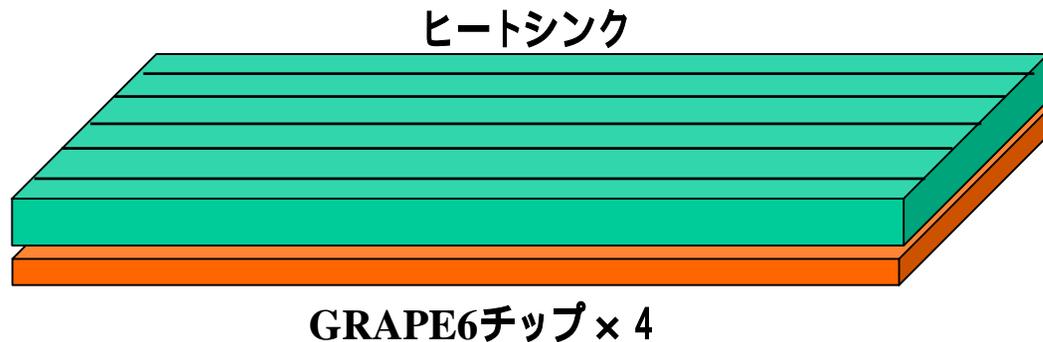
(新規開発)

2Uサーバ用 PCI-Xバス・フルスロット(2つ分)

10層基盤 (cf. GRAPE-6A 8層基盤)

GRAPE6チップ×4 (130 Gflops) (電力～50W)

GRAPE用メモリ16MB (26万粒子)



## 最終構成

Blade-GRAPE × 256 = 33.3 Tflops

GRAPE用メモリ4.1GB (6656万粒子)

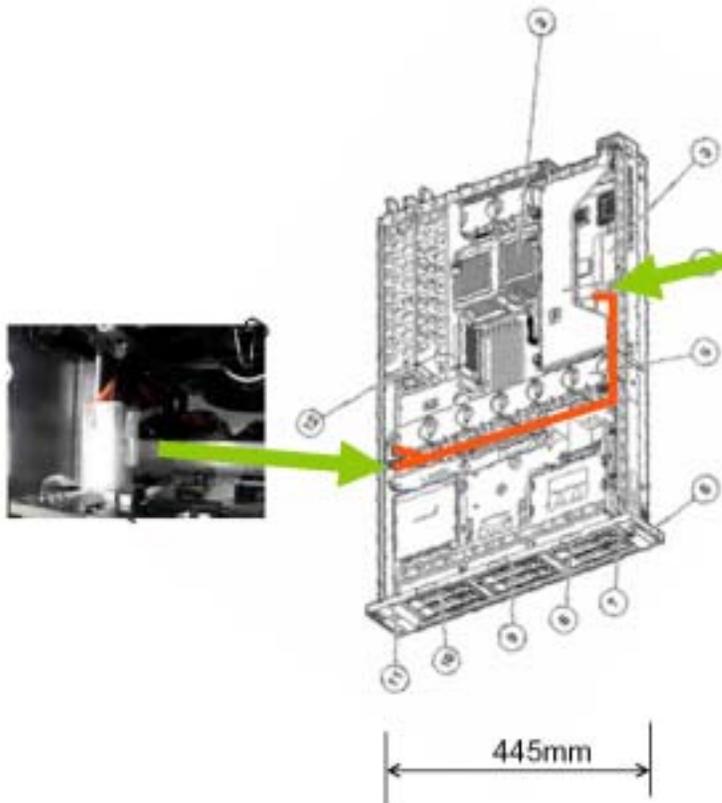
# Blade-GRAPE



## 2Uサーバへの実装

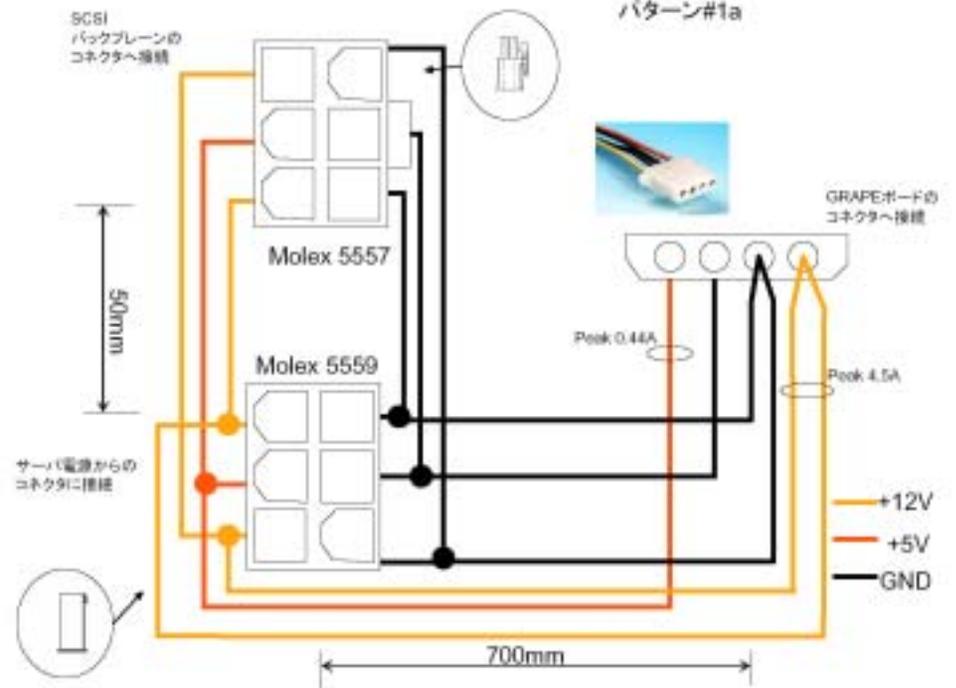


# Blade-GRAPEへの電源供給



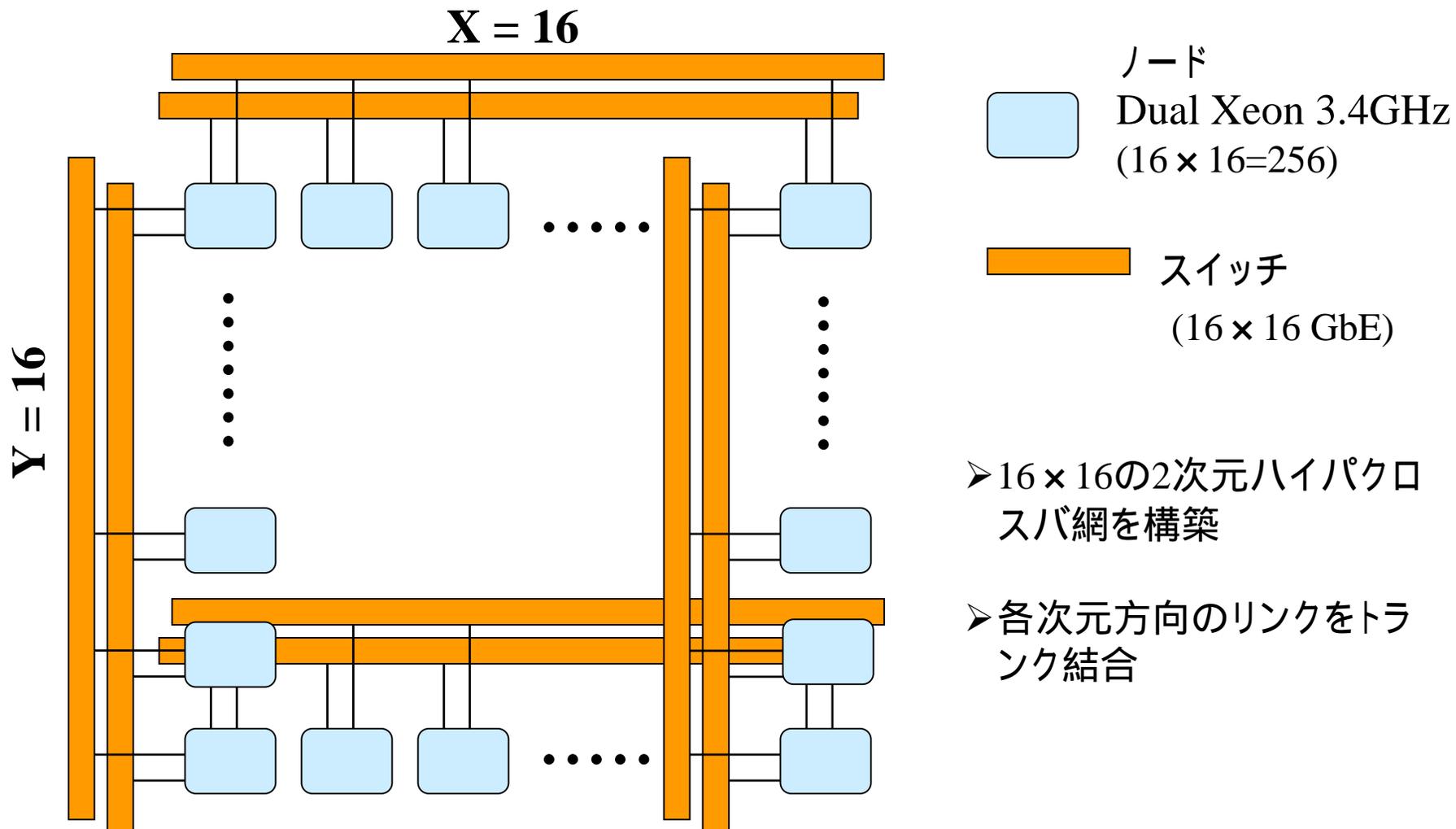
PCI-Xバス3.3V  
+12V系54W , +5V系2.2W

左の写真のコネクタの間を二股にして、一方をPCIボードに、接続/給電を行う。



# 2次元ハイパクロスバネットワーク

Gbit Ether汎用スイッチとマルチポートNICによって高速結合網を実現



# 開発ロードマップ

計算ノードラック  
X1

42	
41	DL380G4 1-1/1-1
40	
39	DL380G4 1-2/1-2
38	
37	DL380G4 1-3/1-3
36	
35	DL380G4 1-4/1-4
34	
33	DL380G4 2-1/1-5
32	
31	DL380G4 2-2/1-6
30	
29	DL380G4 2-3/1-7
28	
27	DL380G4 2-4/1-8
26	
25	DL380G4 3-1/1-9
24	
23	DL380G4 3-2/1-10
22	
21	DL380G4 3-3/1-11
20	
19	DL380G4 3-4/1-12
18	
17	DL380G4 4-1/1-13
16	
15	DL380G4 4-2/1-14
14	
13	DL380G4 4-3/1-15
12	
11	DL380G4 4-4/1-16
10	
9	
8	X1,X2,X3,X4/X1スイッチ(48ポート)
7	V1,V2,V3,V4/V1スイッチ(48ポート)
6	車道機スイッチ(24ポート)
5	iLOスイッチ(24ポート)
4	
3	PDU
2	PDU
1	PDU

16ノード

## 今年度構成

16ノード

32 CPU + 16 Blade-GRAPE

## 演算性能

PCクラスタ 217 Gflops

Blade-GRAPE 2.1 Tflops

## 最終構成 (2006年)

256ノード

512 CPU + 256 Blade-GRAPE

## 演算性能

PCクラスタ 3.5 Tflops

Blade-GRAPE 33.3 Tflops

メモリ 0.5TB 以上

ハードディスク 18.6TB

電力 ~ 100kW

# 輻射流体シミュレーショングループ

- **多次元輻射輸送グループ**

中本（リーダー）

3次元輻射輸送コードの開拓（3次元高精度高速法ART）

- **RSPH (Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics) グループ**

須佐（リーダー）

複数光源化

- **FLD (Flux-Limited Diffusion) 流体力学グループ**

森（リーダー）

Nested Grid, AMR(Adaptive Mesh Refinement)

- **ボルツマン方程式グループ**

梅村（リーダー）

粒子法, CIP法



## まとめ

- ・融合型並列計算機開発

理学・工学の研究者が共同で開発

- ・大規模輻射流体力学シミュレーションの実現

多次元輻射輸送

多次元輻射流体力学

多次元輻射磁気流体力学

多次元ボルツマン方程式

- ・天体の起源の解明

First Objects, First GRBs, Globular Clusters, Reionization,

First Galaxies, First AGNs, Galaxy Evolution