



輻射流体力学による宇宙物理の新展開

梅村 雅之

筑波大学 計算科学研究センター

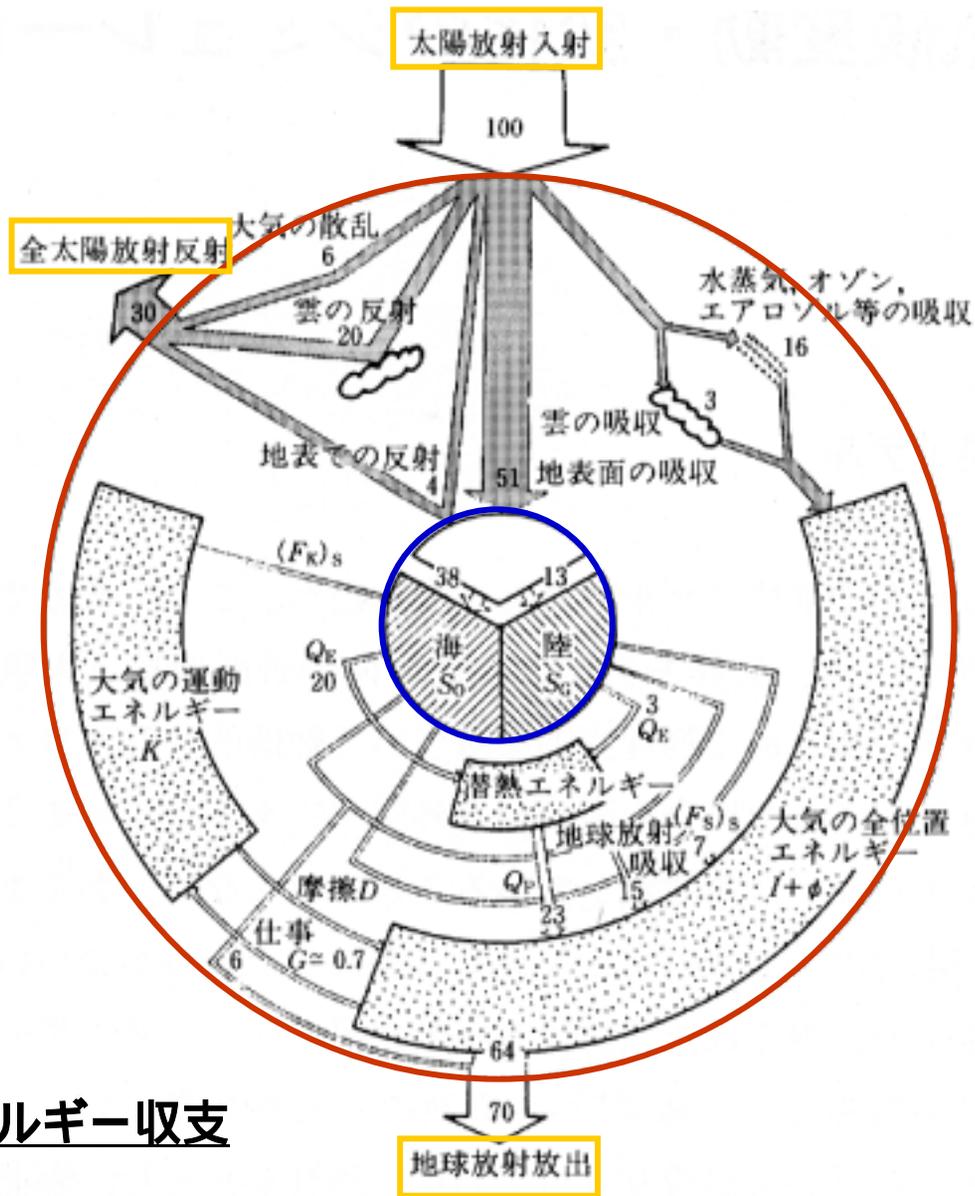
計算科学研究センター発足シンポジウム
「計算科学による新たな知の発見・統合・創出」
2004年6月10, 11日

輻射流体力学とは

輻射(光)による
エネルギー輸送

+

流体の運動



地球のエネルギー収支

宇宙物理学の3本柱

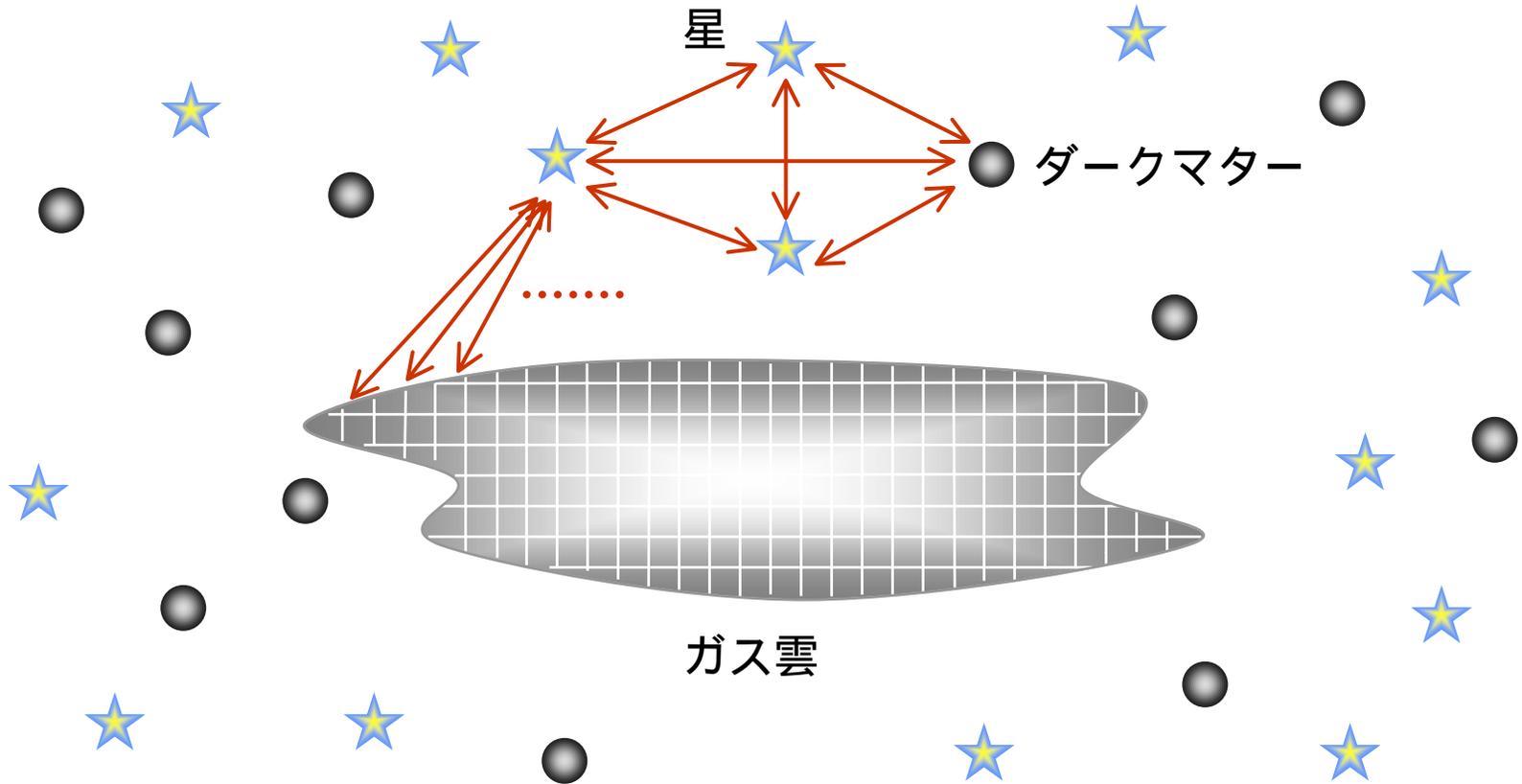
重力
(万有引力)

流体
(核子物質)

輻射
(光)

宇宙輻射流体力学

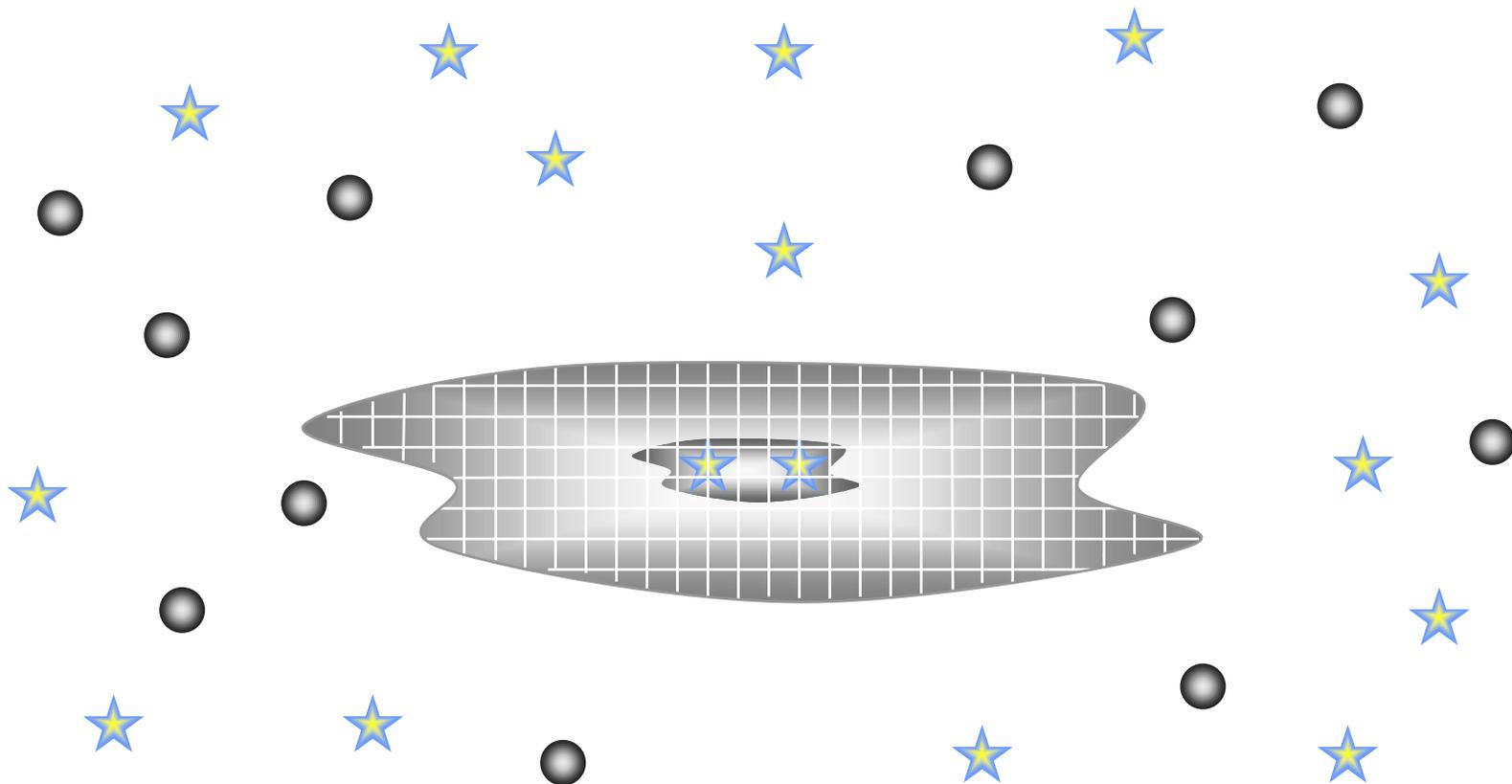
重力（万有引力）



高精度重力計算

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

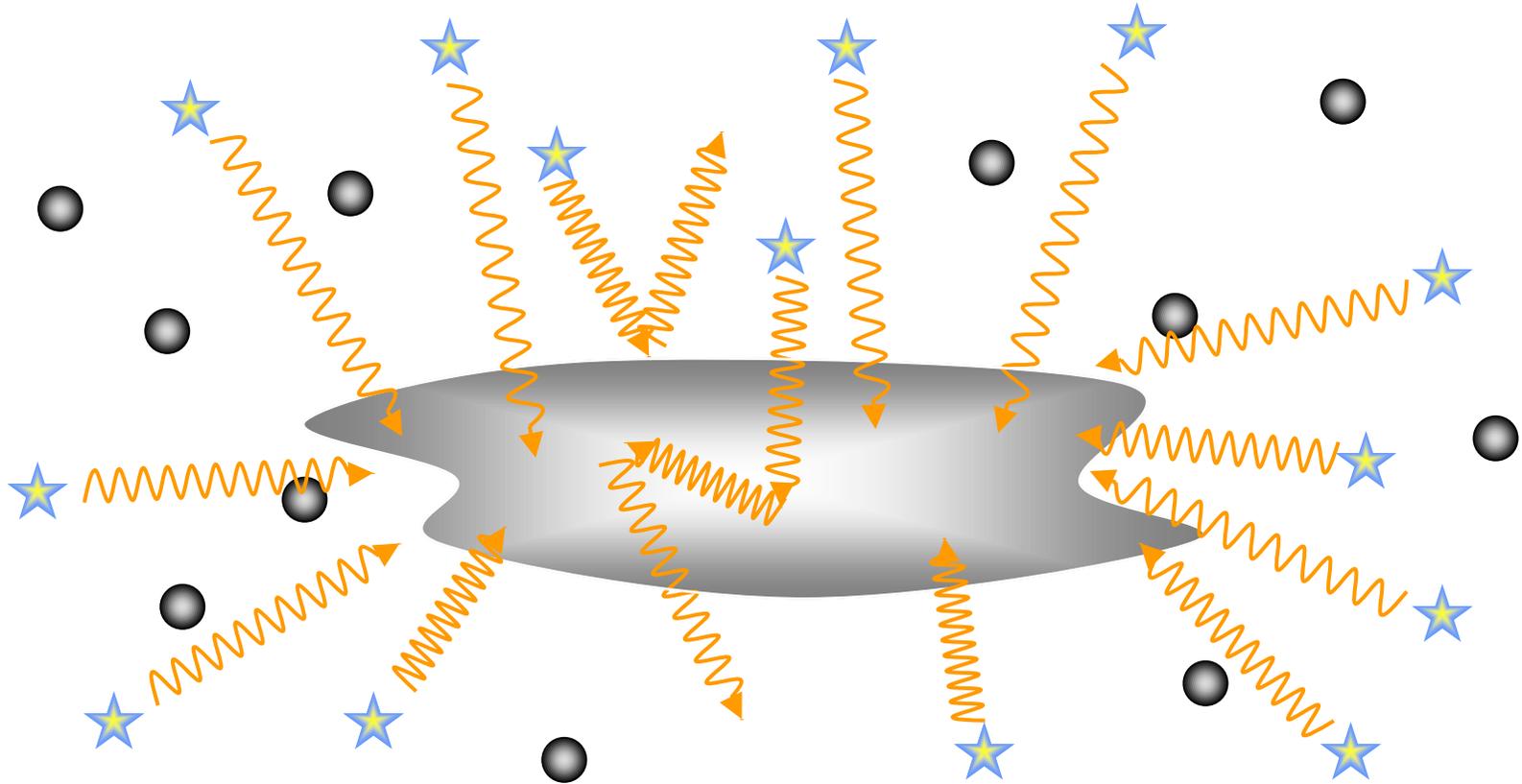
流体（核子物質）



流体力学計算（複雑な計算）

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)

輻射輸送方程式

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

光子分布関数に関する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

$$N^3 = 128^3, N_\theta = N_\phi = 128, N_\nu = 6$$

Total Memory: $23N^3 + 3N^2N_\theta N_\phi N_\nu = 38.7\text{GB}$

Total operations: $f N_{\text{iter}} N^3 N_\theta N_\phi N_\nu = 1.14 \text{ Tflops} \cdot \text{hr}$ ($f \approx 200, N_{\text{iter}} = 100$)

CP-PACSで実現

輻射流体力学の世界的現状

FLD: 拡散近似, RT: 輻射輸送, RHD: 輻射流体力学

星の構造と進化

星の内部構造 (1D-FLD/RT/RHD), 惑星状星雲の進化 (1D-FLD/RHD)

星・惑星系の誕生

原始星の進化 (1D-FLD/RT/RHD)

原始惑星系円盤の形成と進化 (1D-RT/RHD, 2D-FLD/RT/RHD)

星間雲の分裂 (1D-FLD/RT/RHD, 2D-FLD)

超新星爆発

輻射, ニュートリノによるエネルギー・運動量輸送 (1D-FLD/RHD, 2D-FLD/RT)

ブラックホール天体

巨大ブラックホールと降着ガス円盤 (1D-, 2D-FLD/RT)

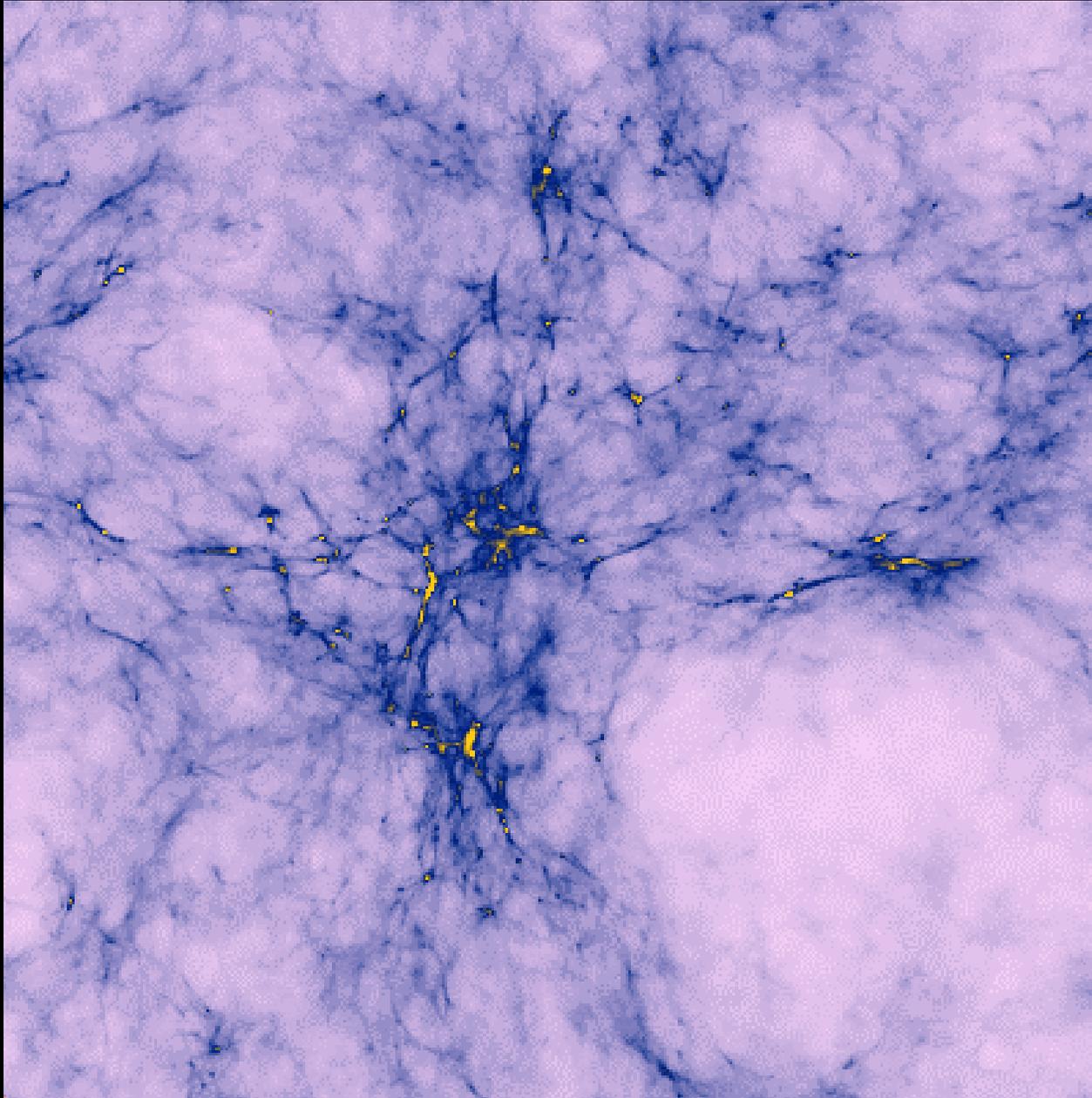
銀河形成・宇宙論

宇宙再イオン化 (1D-RT/RHD, 3D-FLD, 3D-RT)

原始銀河雲の進化と銀河の誕生 (1D-RT/RHD, 3D-RHD)

原始元素組成の決定 (1D-RT)

ダークマター宇宙における構造形成

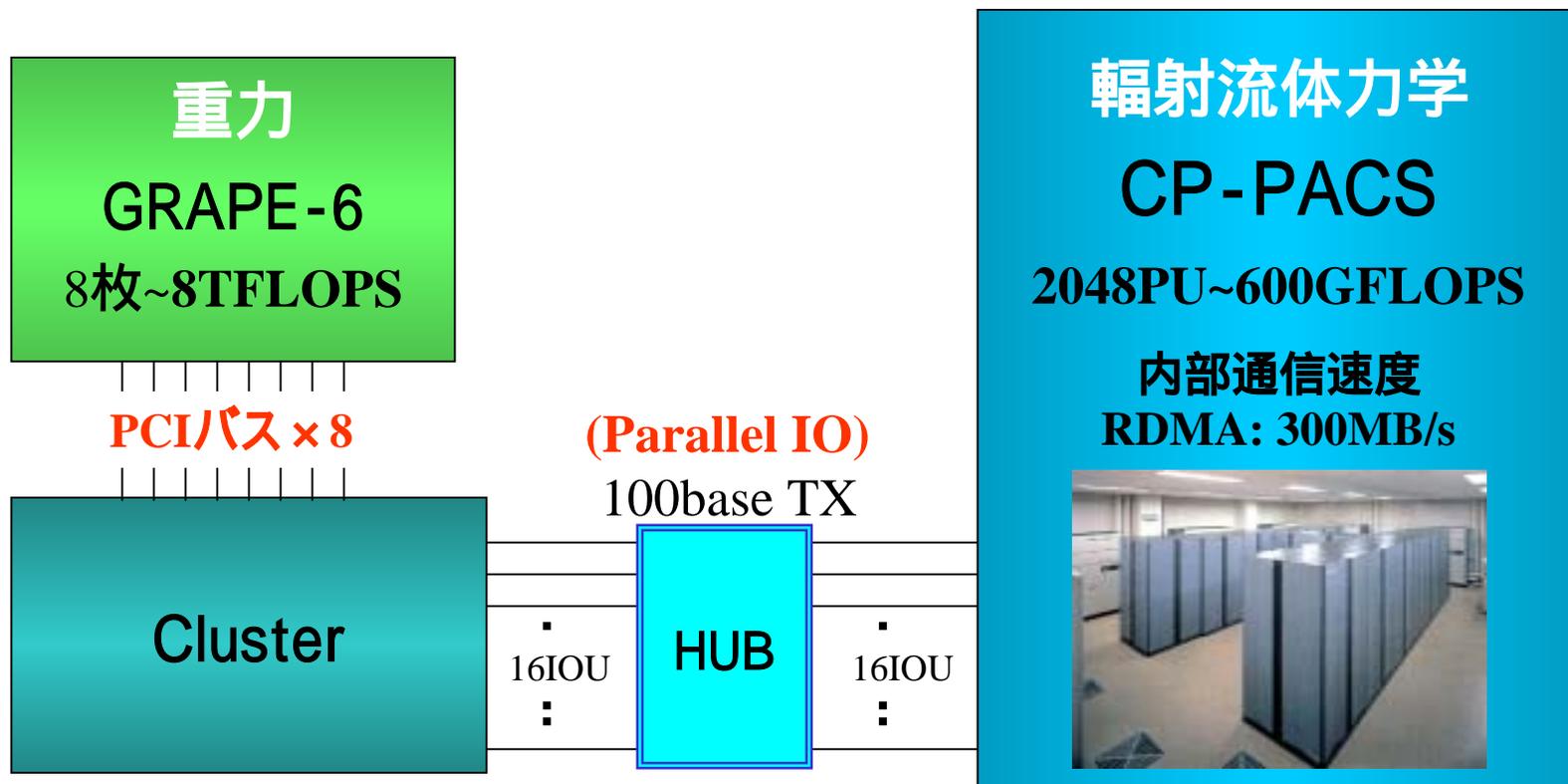


**Yoshida
et al.**

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

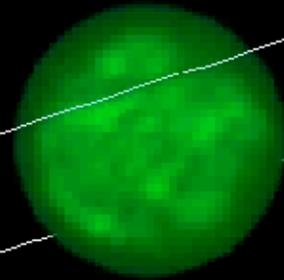


平成14年度日本情報処理学会論文賞

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

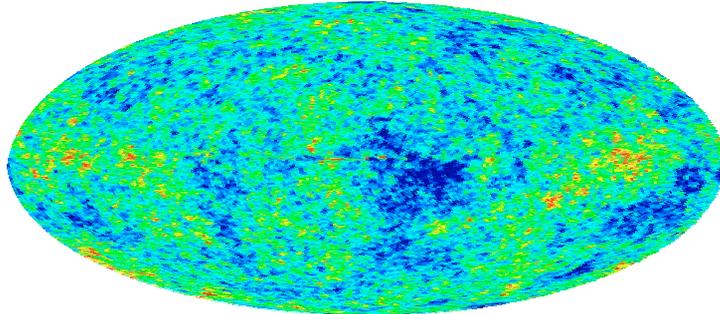
10万粒子輻射流体計算 (Susa & Umemura 2004)

世界初

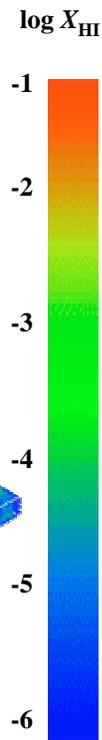
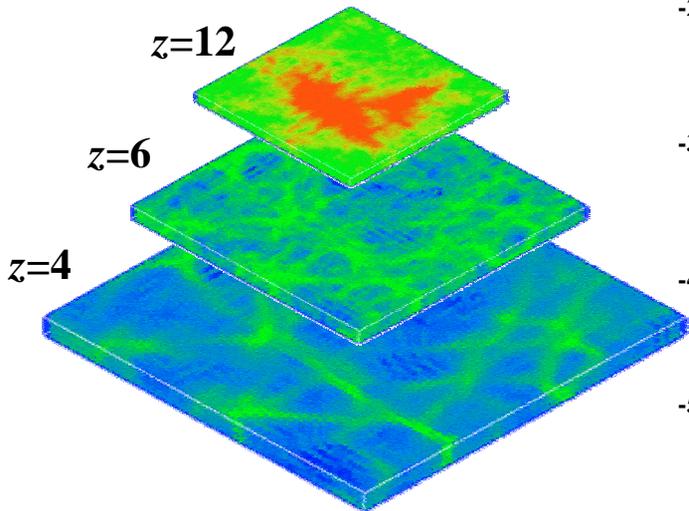


3次元輻射輸送による宇宙再電離計算と紫外線強度進化の推定

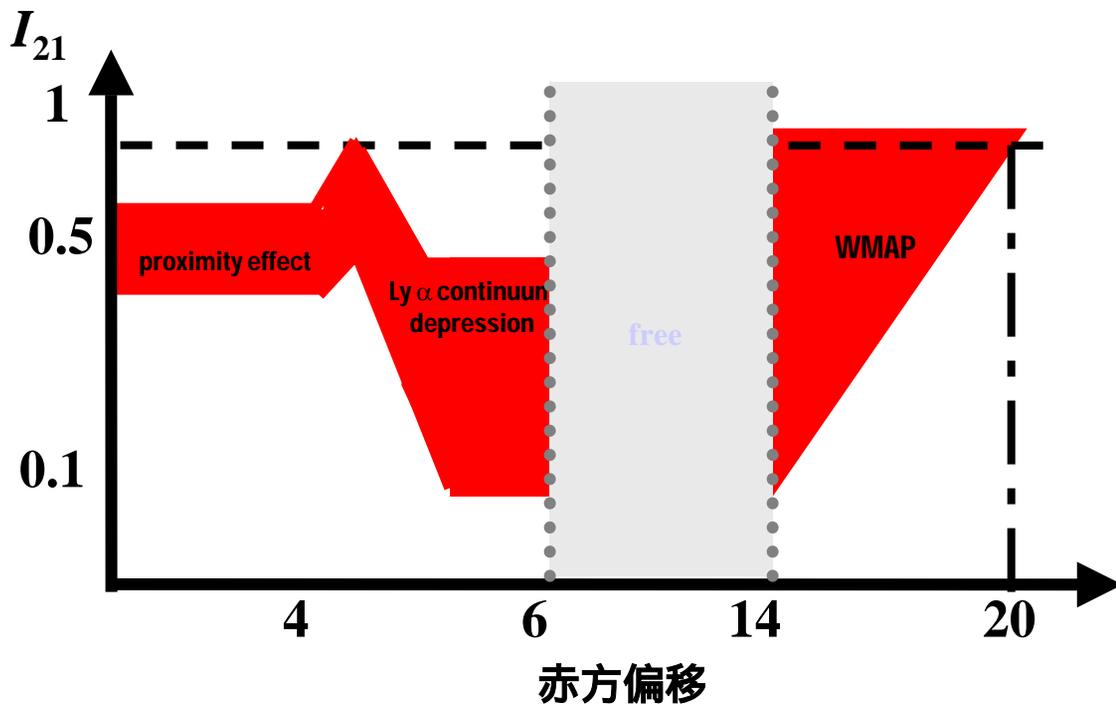
WMAPによる宇宙背景放射観測



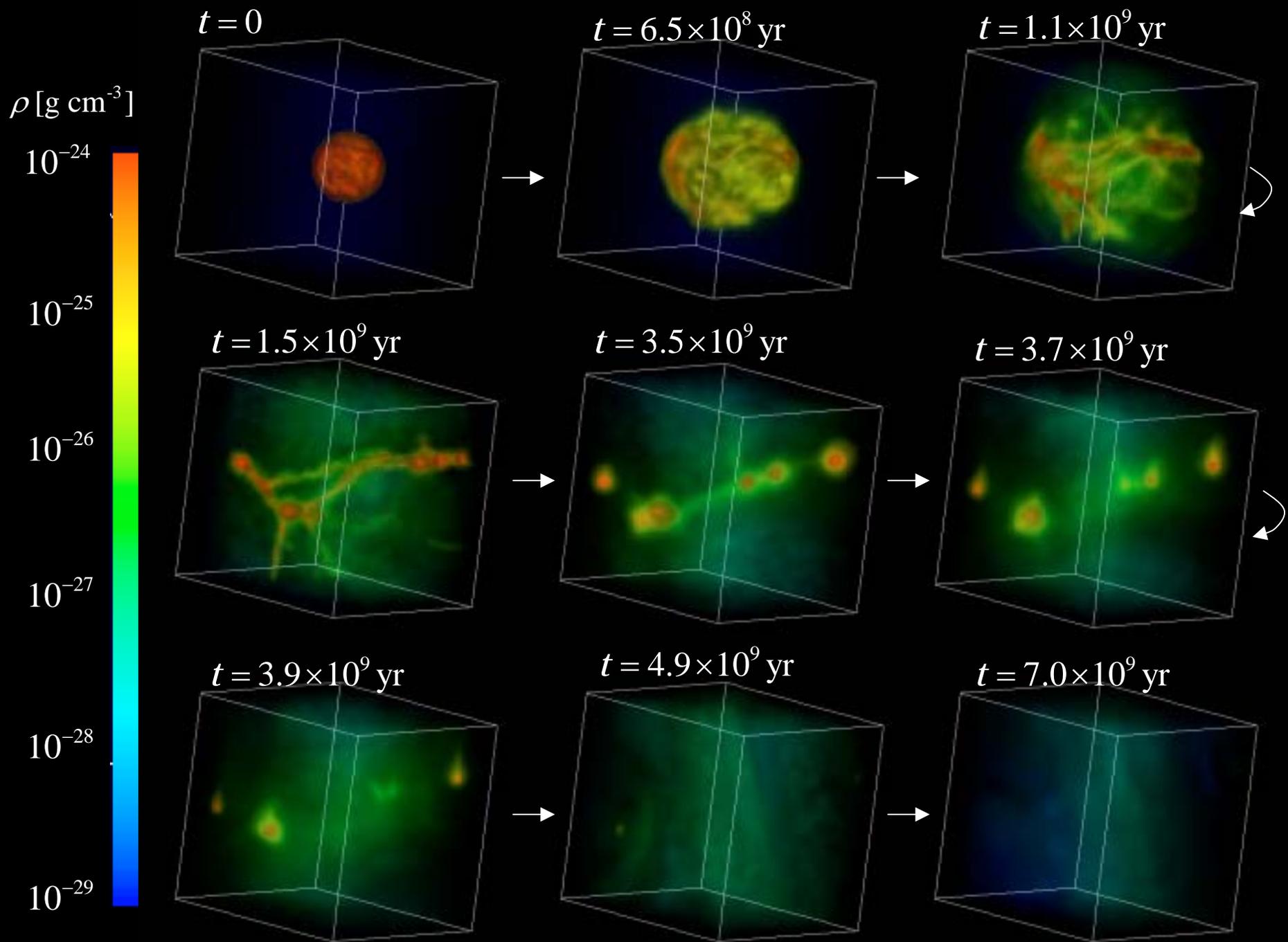
3次元輻射輸送計算



宇宙紫外線強度への制限



紫外線による銀河の蒸発



新展開

FIRST プロジェクト(仮称)

「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」

Elucidation on Origin of
FIRST Generation Objects by HMCS-E

宇宙時間

10⁻⁴⁴秒

天体の起源

ビッグバン



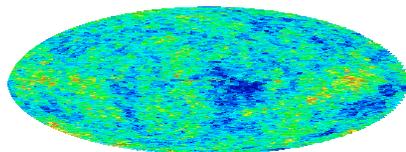
密度ゆらぎ

物質の起源

光 (輻射)



軽元素合成
(水素, ヘリウム, ...)



50万年

宇宙中性化

第一世代天体

(宇宙で最初に生まれた天体)

紫外線放射

超新星爆発

重元素合成
(酸素, 炭素, 窒素...)

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 (H₂O)

有機物

宇宙構造

生命

140億年

(現在)

プロジェクトの3つの特徴

・サイエンス

第一世代天体 (宇宙で最初为天体) = 天体の起源 & 物質の起源
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

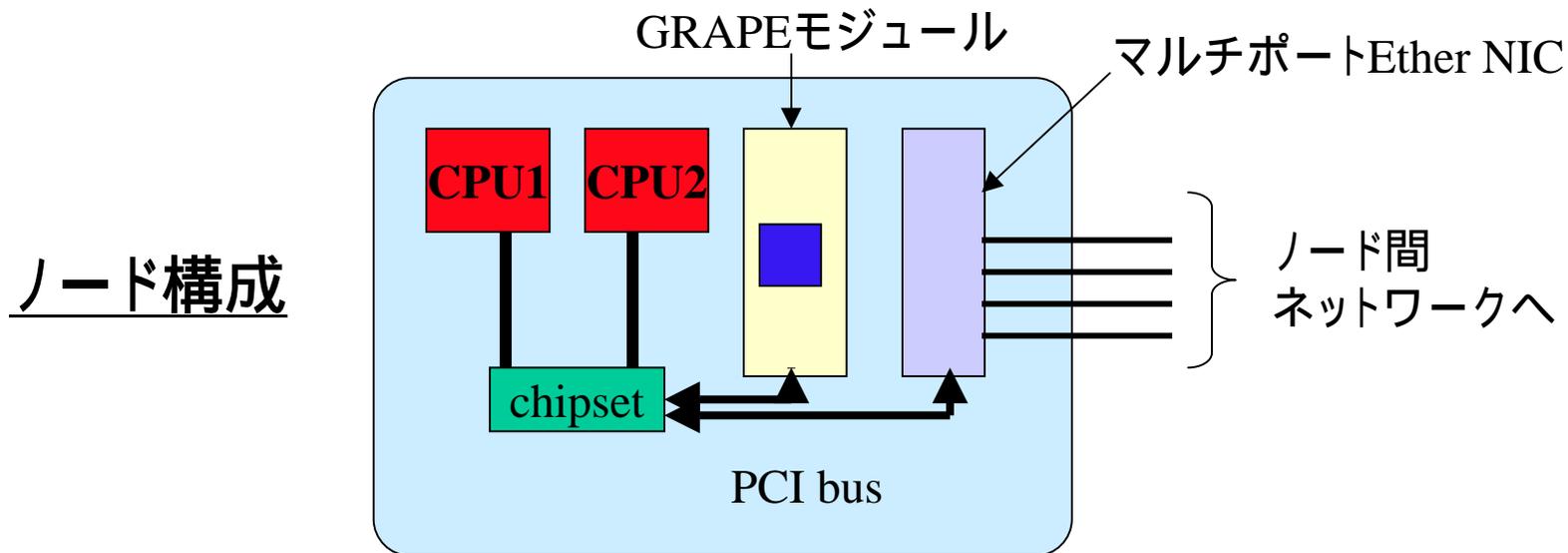
・方法

輻射流体力学 = 光伝播 + 流体力学
世界に先んじた1000万粒子規模の計算

・融合型並列計算機開発

HMCSパラダイムの発展形
理学・工学の研究者が共同

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

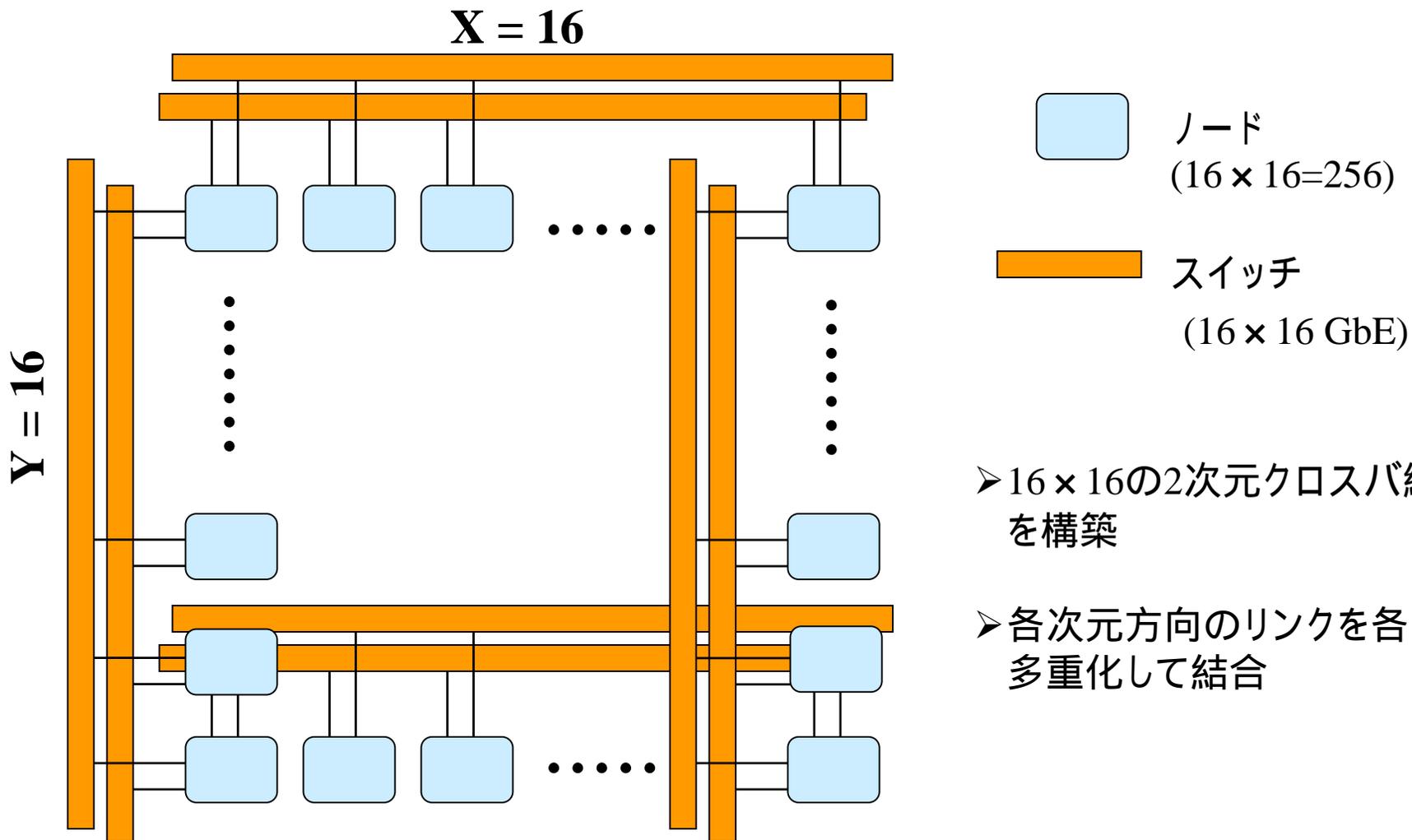


2U-size Server PC

- dual-CPU構成のサーバ用PCをノードとする
(汎用製品の利用による低価格化・高密度化)
- PCIバスによってGRAPEモジュールをオンボード実装する
(CPUとGRAPE間的高速データ転送を実現)

HMCS-E ネットワーク構成

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



要求性能

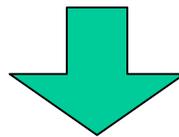
目標: 1千万粒子 (10^7) 以上, $0.1M_{\odot}$ の質量分解能

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

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

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

$$\text{通信時間(CPU-GRAPE)} = 0.1\text{hr} \left(\frac{N}{10^7} \right) \left(\frac{N_{\text{list}}}{100} \right) \left(\frac{N_{\text{PU}}}{512} \right)^{-1} \left(\frac{T_{\text{PCI}}}{100\text{MB/s}} \right) \left(\frac{N_{\text{step}}}{10^4} \right)$$



CPU性能: 数Tflops
GRAPE: 数10Tflops

融合型並列計算機の製作

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



天文コミュニティにおける連携

「数値天文台」構想

宇宙物理シミュレーション関係者の全国組織

21世紀型宇宙物理シミュレーション

望遠鏡

検出器

データベース

解析ソフト

観測天文台
Astronomical Observatory

仮想天文台
Virtual Observatory

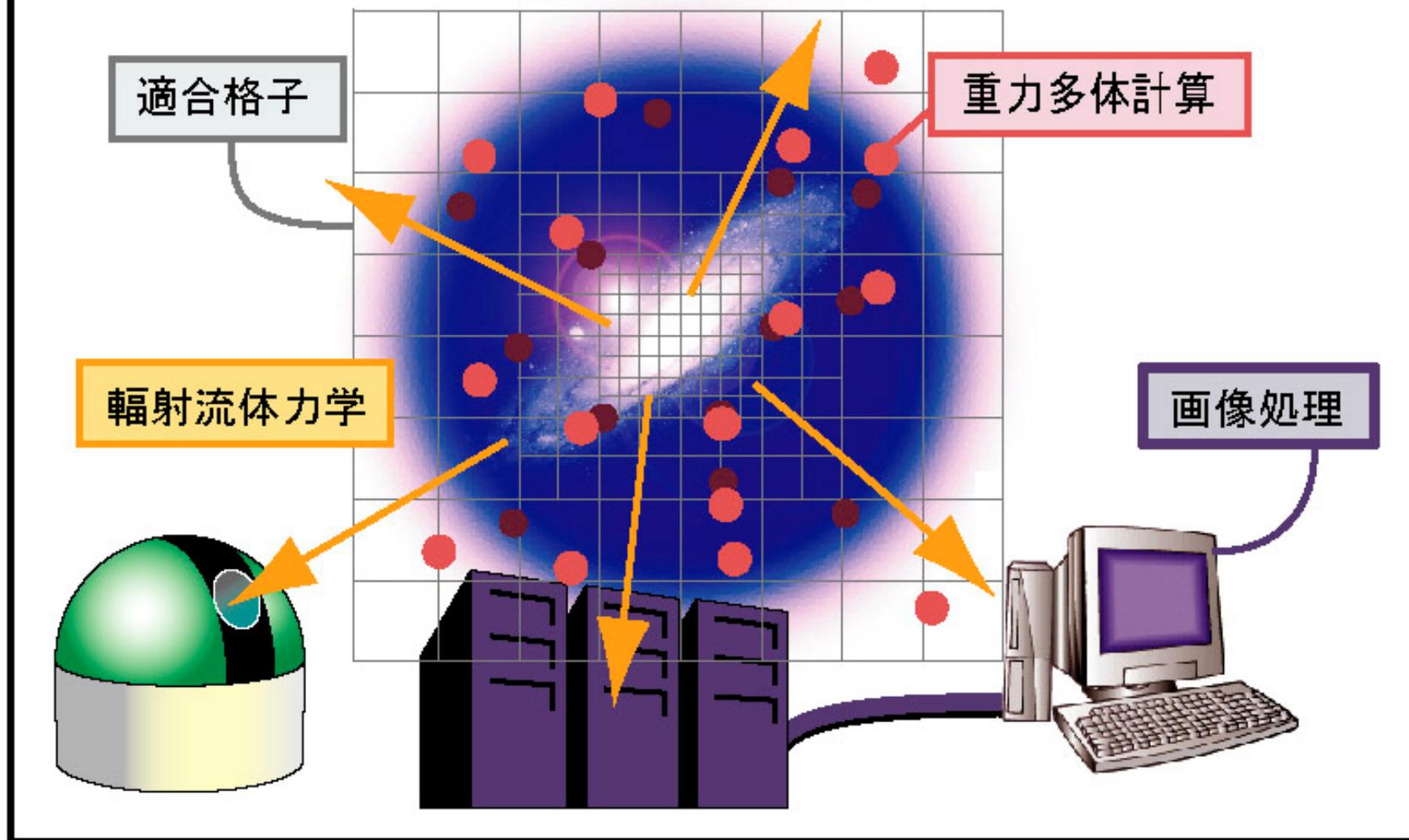
数値天文台
Computational Observatory

ソフトウェア

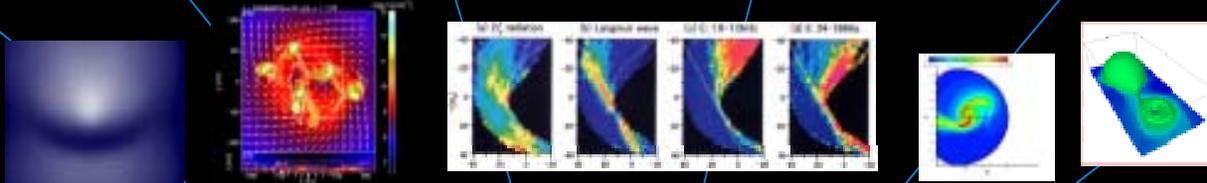
ハードウェア

「数値天文台」構想

観測密着型シミュレーションによる
宇宙の統合的研究



Computational Observatory 数値天文台



宇宙の起源の解明

ミクロとマクロの物理学の融合



Big Bang
ビッグバン

Dark Age
宇宙暗黒時代

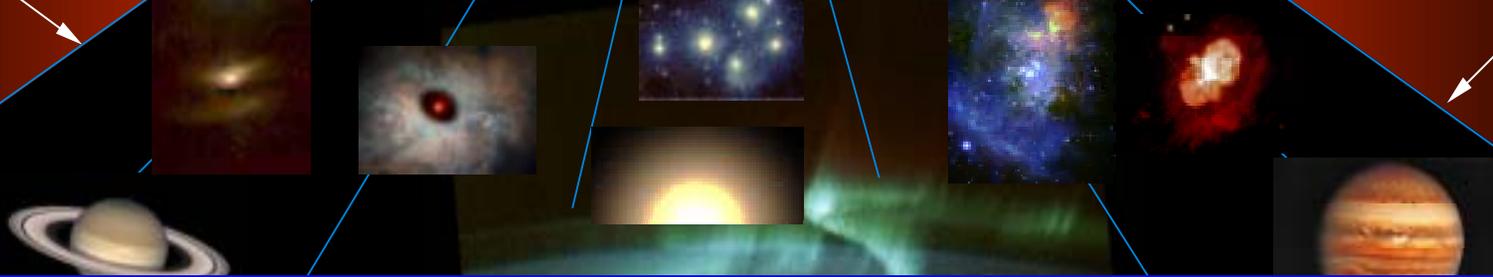
Galaxy Formation
銀河形成

Black Hole
ブラックホール

Star Formation
星形成

Supernova
超新星

Sun & Earth
太陽・地球



Astronomical Observatory 観測天文学