

宇宙シミュレータ“FIRST”の開発

<概要>

筑波大学計算科学研究センターでは、平成 16 年度より文部科学省特別推進研究「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」(代表 梅村雅之・数理解析学科学科・教授)によって、これまでにない大規模な宇宙シミュレーションを実行するプロジェクトを推進している。このたび、このプロジェクトの下、世界で初めて PC クラスタ埋め込み型の宇宙計算専用ボード(**Blade-GRAPE**)を開発し、これを組み込んで**宇宙シミュレータ “FIRST”** 1 号機を完成させた。宇宙シミュレータ “FIRST”は、専用機を PC クラスタに合体させた**新世代型並列計算機**であり、専用機部分 35Tflops、汎用機部分 3.5Tflops (Tflops は 1 秒間に 1 兆回の演算を行うことのできる速さ)という演算性能を、約 3 億円のコストで実現することができる。このシミュレータは、宇宙で最初の天体の誕生を直接計算し、宇宙史のミッシングリンクを解き明かすことを目的としたものである。このような目的で作られた計算機としては、世界初、世界最高速である。また、国内の宇宙の研究分野全体で見ても、最速の計算機となる。

※ Blade-GRAPE の開発・製作は浜松メトリクス(株)の技術協力を得て行われた。また、FIRSTシミュレータの構築については、日本ヒューレット・パカード(株)、ビジネスサーチテクノロジー(株)、住商エレクトロニクス(株)各社の協力を頂いた。

<科学的背景>

140 億年の宇宙の歴史の中で、最初に天体が生まれたのは、宇宙誕生から 1 億年の頃であると考えられている。しかしながら、その形成過程は、多くがまだ謎に包まれている。”すばる”などの大型望遠鏡による最近の観測で、宇宙誕生から 10 億年の頃の宇宙の様子がとらえられるようになってきた。そこでは、すでに銀河が誕生していることが見えている。一方、宇宙背景放射から知ることのできる宇宙年齢 50 万年の頃の宇宙は、温度は高いが物質は極めて一様(宇宙が東京ドームの大きさだとしたら、1 ミリ程度の凸凹がある程度)であり、天体らしきものは存在しない。さらに、宇宙背景放射の詳しい解析から、宇宙は年齢 1 億年の頃に再イオン化したことがわかってきている。再イオン化が起きたということは、そこで強い紫外線を放射するような天体が形成されたことを意味する。従って、宇宙年齢 50 万年から 1 億年の時代に宇宙で最初の天体(**第一世代天体**)が形成されたということになる。この時代は、**宇宙暗黒時代**と呼ばれる。今のところ、宇宙暗黒時代を、直接観測で見ることはできず、この時代に何が起こったのかは、よくわかっていない。その意味で、宇宙暗黒時代は、**宇宙のミッシングリンク**となっている。

宇宙背景放射で見る宇宙年齢 50 万年の宇宙には、地球や太陽、そして我々の体を作っている重たい元素(炭素、酸素、窒素、鉄...等)が存在していない。重たい元素は、星の誕生によって作られ、星の爆発(超新星爆発)によって、宇宙に蓄えられていく。従って、宇宙暗黒時代に第一世代天体として星が誕生しなければ、現在の地球や太陽は生まれなかったことになり、我々人類も誕生しなかったことになる。その意味で、宇宙第一世代天体は、宇宙の全ての天体と元素の起源となるものである。我々は、第一世代天体の誕生を解き明かすために、宇宙暗黒時代の宇宙進化について、これまでにない大規模なシミュレーションを行うことを計画している。このシミュレーションによって、多くの謎に包まれてきた宇宙暗黒時代の歴史(宇宙のミッシングリンク)と宇宙第一世代天体の解明を目指している。

< FIRST シミュレータ >

宇宙現象において、重力は常に現れる相互作用であり、数値シミュレーションする場合、多くの計算を必要とする部分である。この重力部分を専用機化すれば、計算の高速化と計算機コストの大幅な削減を図ることができる。例えば東大の GRAPE プロジェクトはその例である。一方で、天体の形成過程をシミュレーションするためには、重力部分だけでなく、物質や光の作用も高速に計算する必要がある。そのためには、汎用機部分も高速化しなければならない。汎用機の高速化は大規模化を意味する。よって、これを実現するためには汎用機の高密度化が行えるかどうかは鍵となる。汎用機の高密度化の観点で、現在最も普及しているアーキテクチャはクラスタである。よって、クラスタサーバ内に専用機を組み込むことができれば、高性能融合型クラスタが実現する。これまで、重力専用機は、AT 互換機等で使用されている ATX マザーボードの PCI バスに外部接続するものであったため、汎用機部分の高密度化は難しく、よって大規模な計算機システムの構築ができなかった。我々は、PC クラスタの各ノードに専用機を埋め込んでしまう新世代型の並列計算機アーキテクチャを考案し、このコンセプトで**宇宙シミュレータ”FIRST”**を完成させた。

このシミュレータの実現を可能にしたのは、クラスタサーバ組み込み型の重力計算専用ボード **Blade-GRAPE** の開発である。これまでの重力専用機が外部接続であったのに対し、Blade-GRAPE は、クラスタ・サーバ(2U サイズ)の PCI-X バスのフルサイズカード2スロット分に完全に収まる。理論ピーク性能は1台で 136.8Gflops である。この Blade-GRAPE の開発・製作は浜松メトリックス(株)の技術協力を得て行われた。Blade-GRAPE は、PCI-X バスからの 3.3V の電源供給に加えて、+12V、+5V の直流電源供給を必要とする。この電源供給は、日本ヒューレット・パカード(株)の協力の下、同社のクラスタサーバで実現している。今回は16ノード(32CPU+16Blade-GRAPE)の FIRST シミュレータを完成させた。FIRST シミュレータの構築に関しては、ビジネスサーチテクノロジー(株)、住商エレクトロニクス(株)各社の協力も頂いた。計画として、2006 年度第一・四半期までに 256 ノード(512CPU+256Blade-GRAPE)の FIRST シミュレータを完成させる予定である。このクラスタの各ノードは Gbit Ether のトランク結合による2次元ハイパースペーネットワークによって結合され、柔軟な並列処理環境が実現する。FIRST シミュレータの最終的な理論ピーク性能は、専用機 35Tflops、汎用機 3.5Tflops である。FIRST シミュレータは、新世代の超高密度融合型並列計算機への道を切り拓くものである。FIRST クラスタにより、人類が今まで見たことのない宇宙に生まれた最初の天体を直接計算できるようになる。



Blade-GRAPE



FIRST シミュレータ
(16 ノード)

宇宙シミュレータ FIRST



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

理学(宇宙物理分野)

<コアメンバ>

- 梅村 雅之 (計算科学研究センター
・数理物質科学) <代表者>
- 中本 泰史 (計算科学研究センター
・数理物質科学)
- 平下 博之 (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)

<研究員>

- 加藤 成晃 (計算科学研究センター)
- 佐藤 潤一 (計算科学研究センター)
- 諏訪 多聞 (計算科学研究センター)

工学(計算機工学)

<コアメンバ>

- 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)

理学・工学の研究者の緊密な協力体制

プロジェクトの3つの特徴

・サイエンス

第一世代天体 (宇宙で最初の天体) = 天体の起源 & 物質の起源
宇宙のミッシングリンクを解き明かす

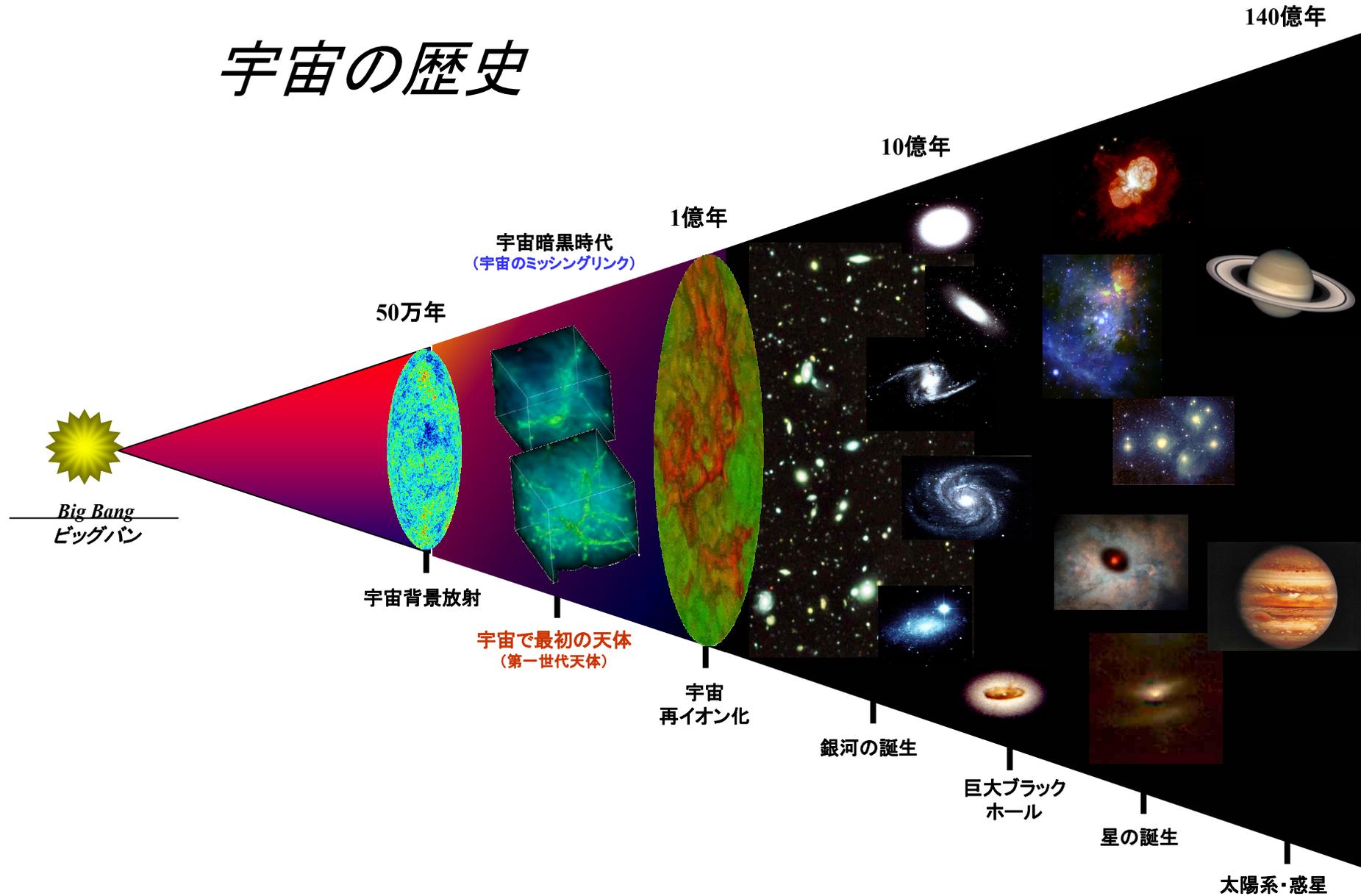
・方法

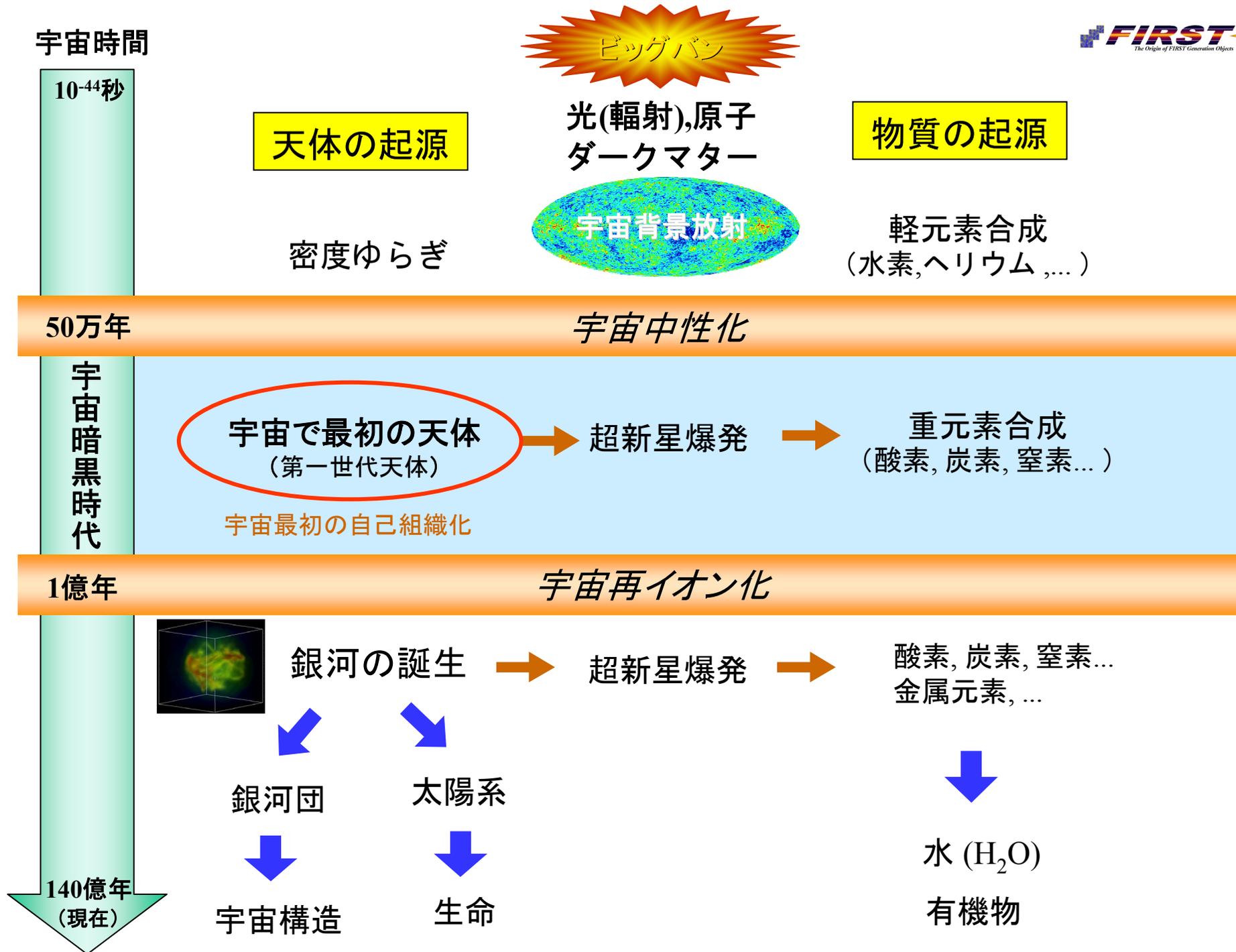
宇宙輻射流体力学 = 光・物質 + 重力
世界初の先駆的取り組み

・新世代型並列計算機開発

PCクラスタ + 重力計算専用エンジン
超高密度融合型並列計算機の実現

宇宙の歴史



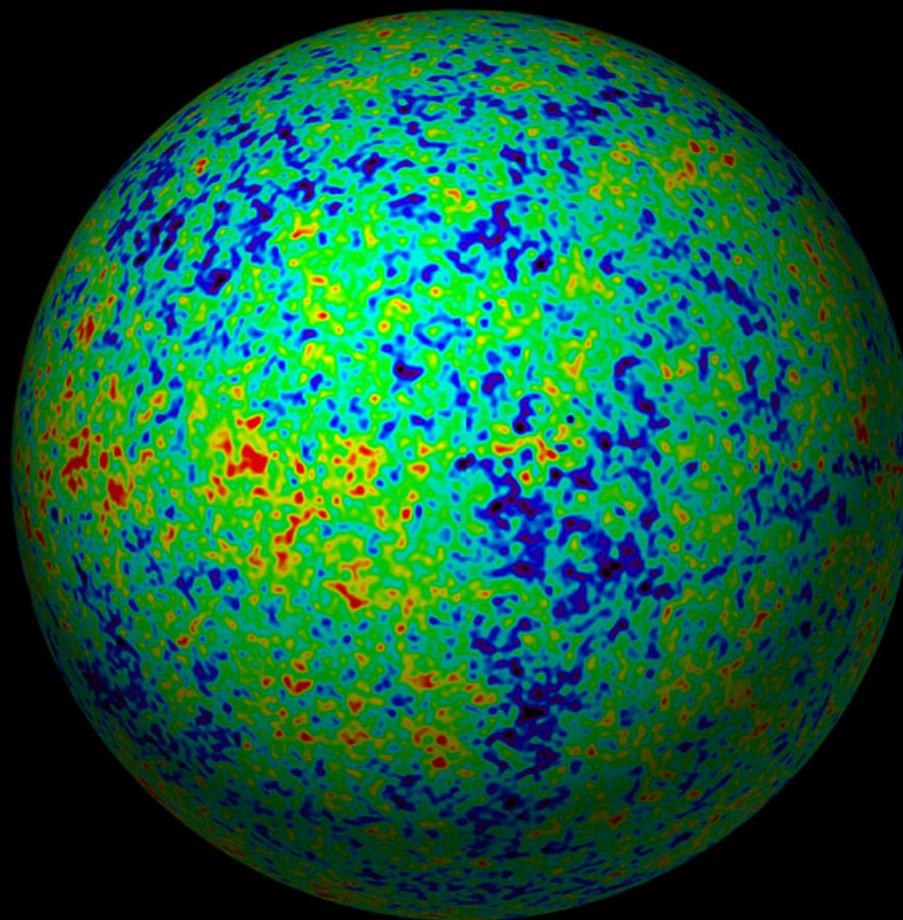


天体形成の初期条件

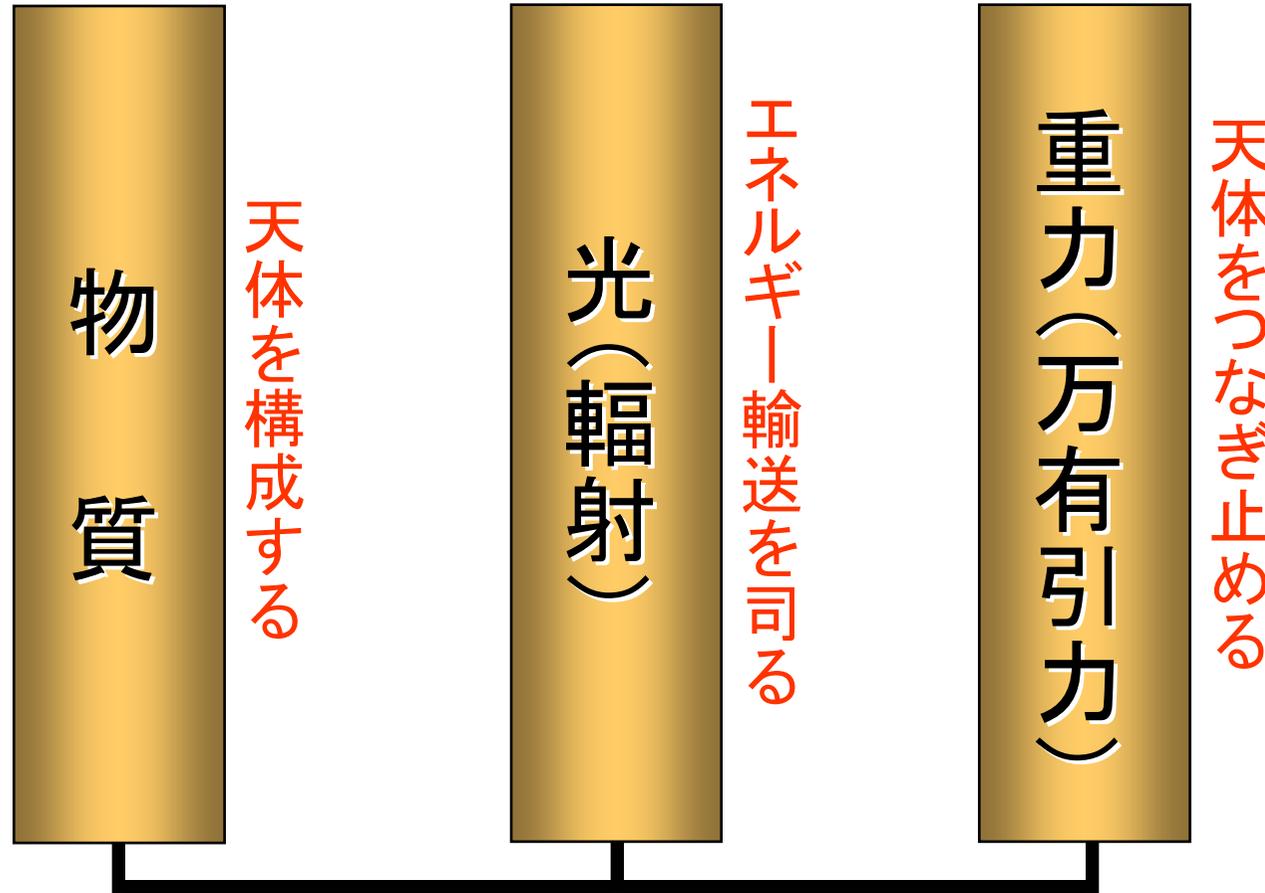
宇宙背景放射は宇宙年齢50万年の宇宙の情報(天体形成の初期条件)を提供する



ダークマター
ダークエネルギー
原子密度
密度ゆらぎ

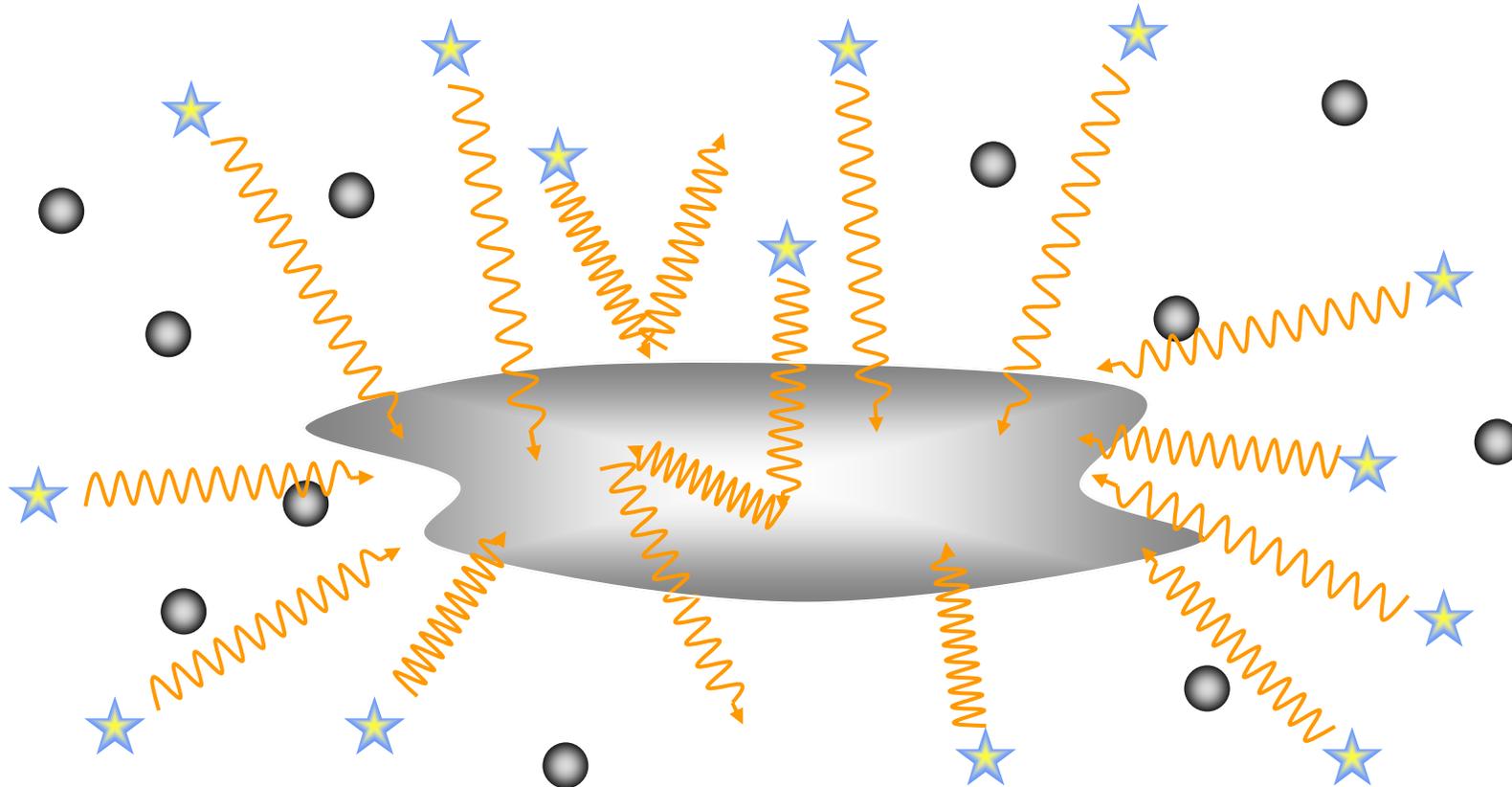


第一世代天体に必要な3つの要素



宇宙輻射流体力学

物質と光

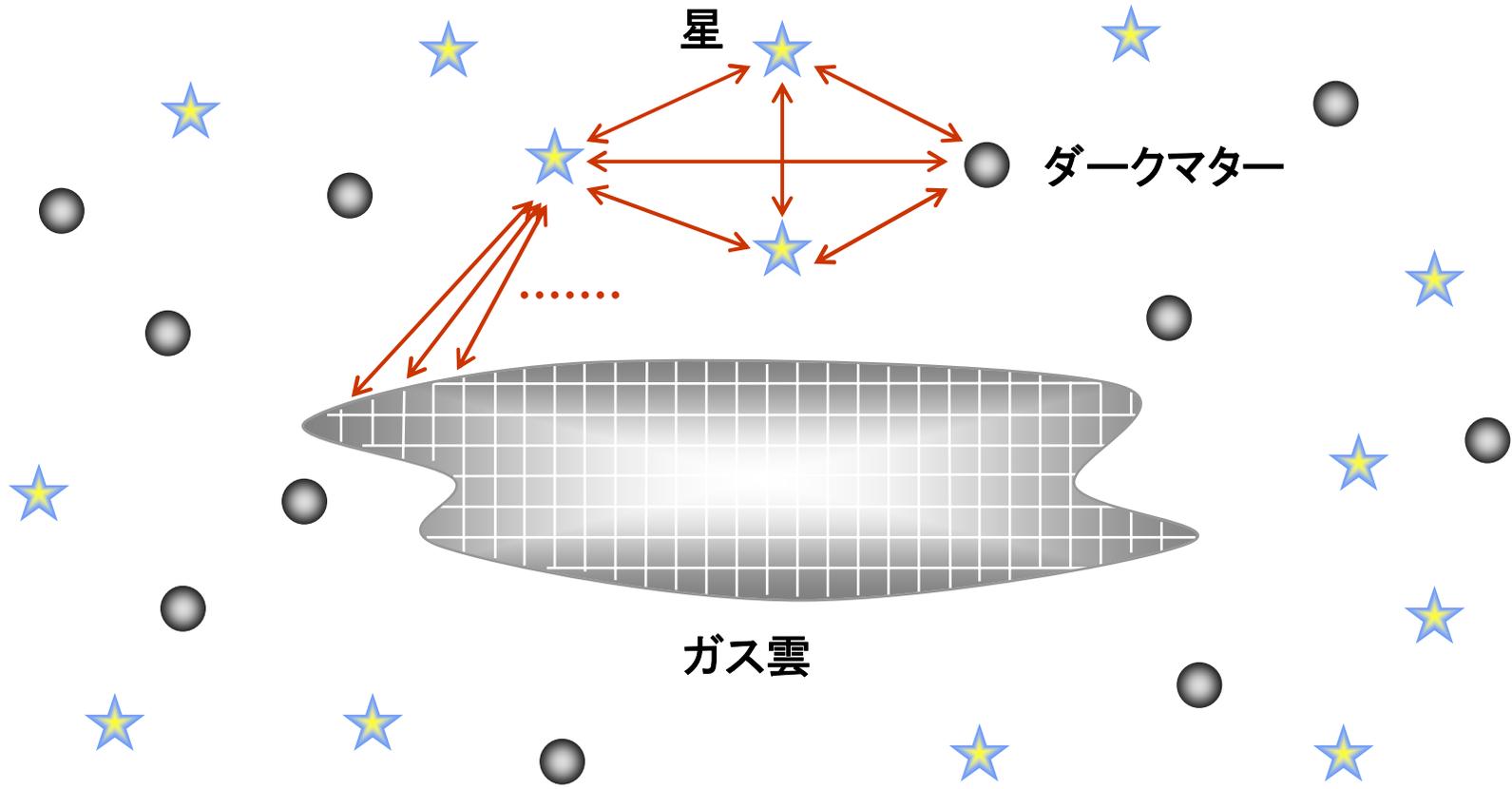


輻射流体力学計算：6次元(空間, 方向, 振動数)

計算量 $\propto N_x N_y N_z \cdot N_\theta N_\varphi \cdot M_\nu = 5$ 兆回 ($N = 100, M_\nu = 500$)

5兆回 = $5 \times 10^{12} = 5$ T(テラ)

重力(万有引力)



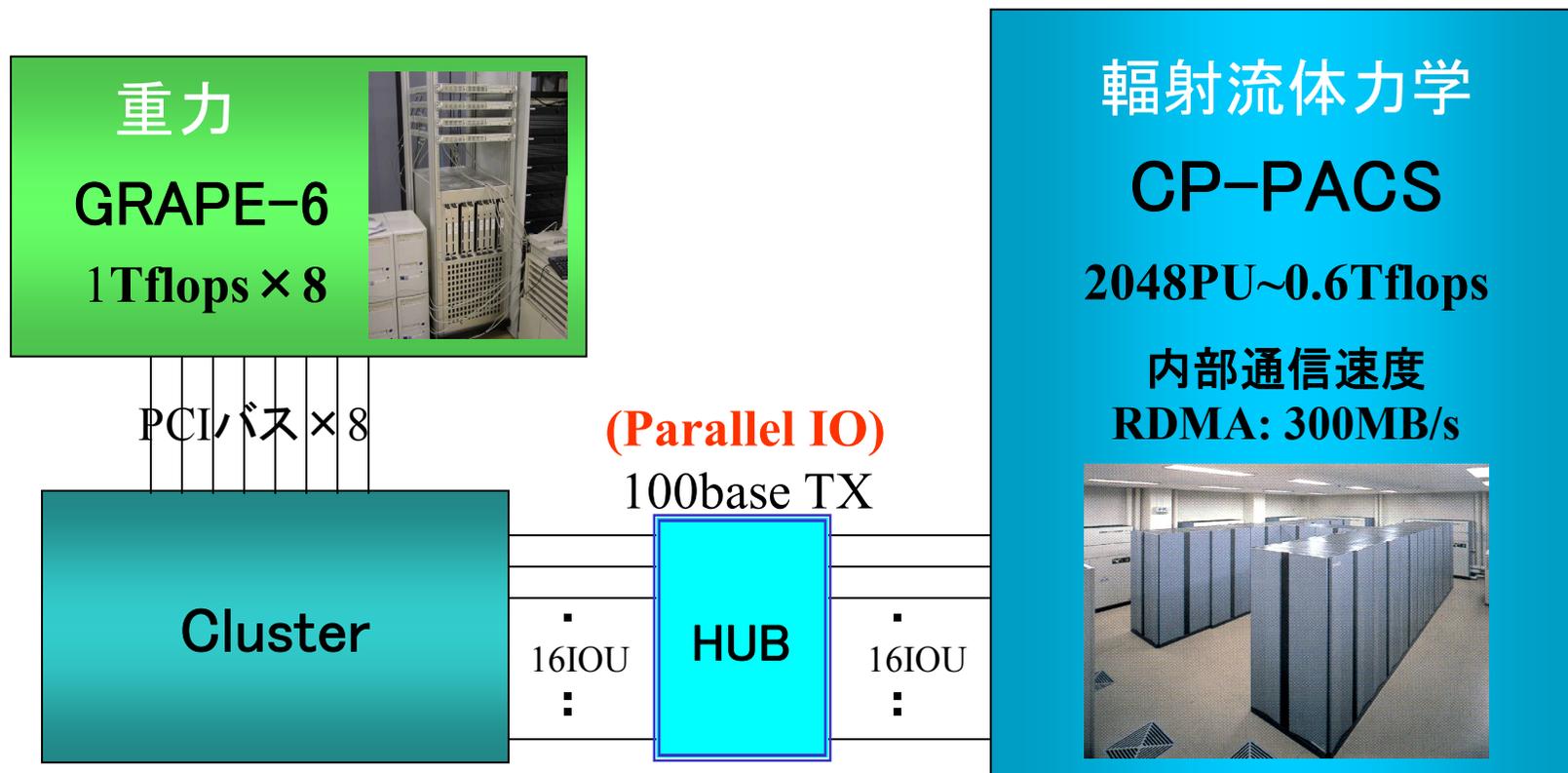
全ての物質間の重力を計算

計算量 $\propto {}_N C_2 = \frac{N(N-1)}{2} = 50$ 兆回 ($N = 1000$ 万) **50 T(テラ)**

HMCS: Heterogeneous Multi-Computer System

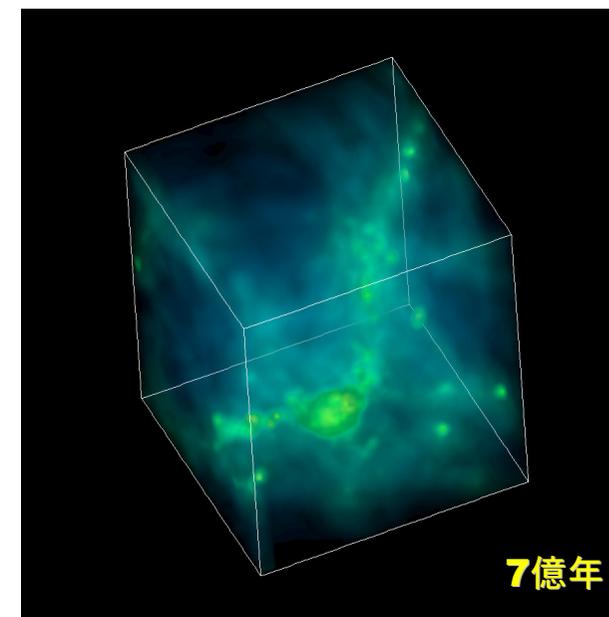
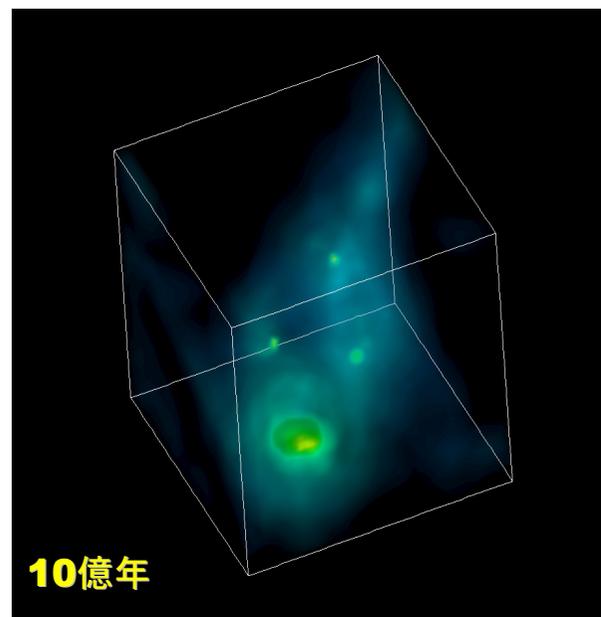
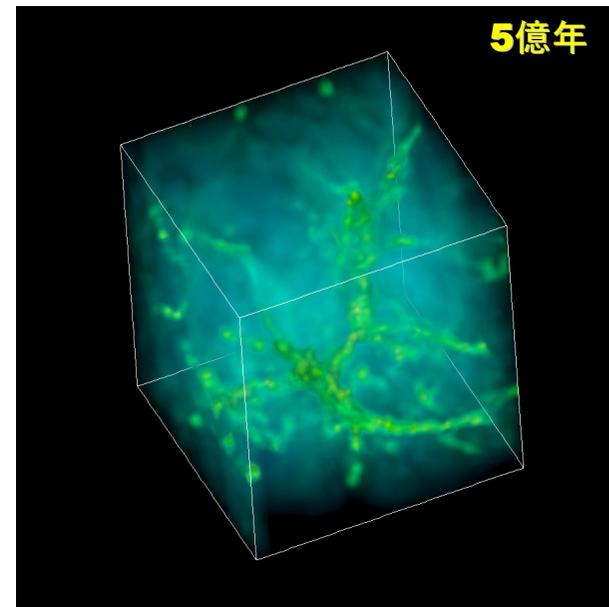
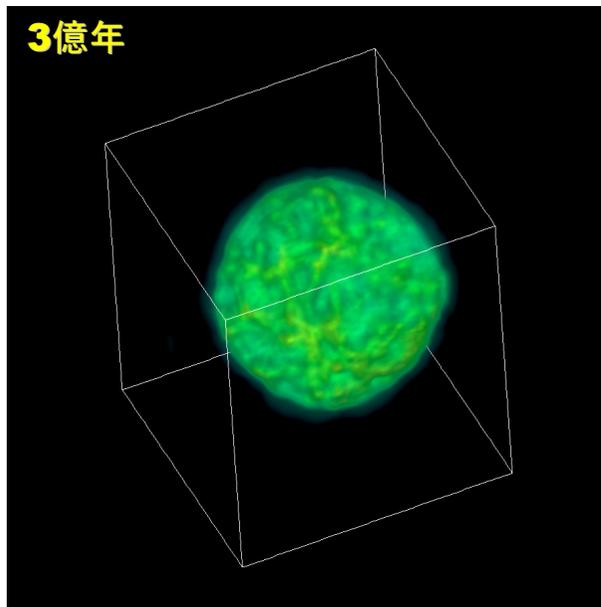
筑波大+東大

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



目標と要求要件

目標

- **1000万体の宇宙輻射流体計算**
第一世代天体を $0.1M_{\odot}$ (M_{\odot} は太陽質量)の
質量分解能で計算
- 宇宙年齢50万年から1億年までを数ヶ月で計算

要求要件

- ① 汎用機: 数Tflops (1 Tflops = 1秒で1兆回の演算)
- ② 重力専用機: 数10 Tflops
- ③ 通信性能の大幅な向上

高密度・大規模化を可能にする
専用機融合型クラスタ

① 汎用機の高高速化

大規模化＝高密度化

⇒ 最も普及しているアーキテクチャはクラスタ

② 専用機の高高速化

クラスタの各ノードに組み込む(融合型)

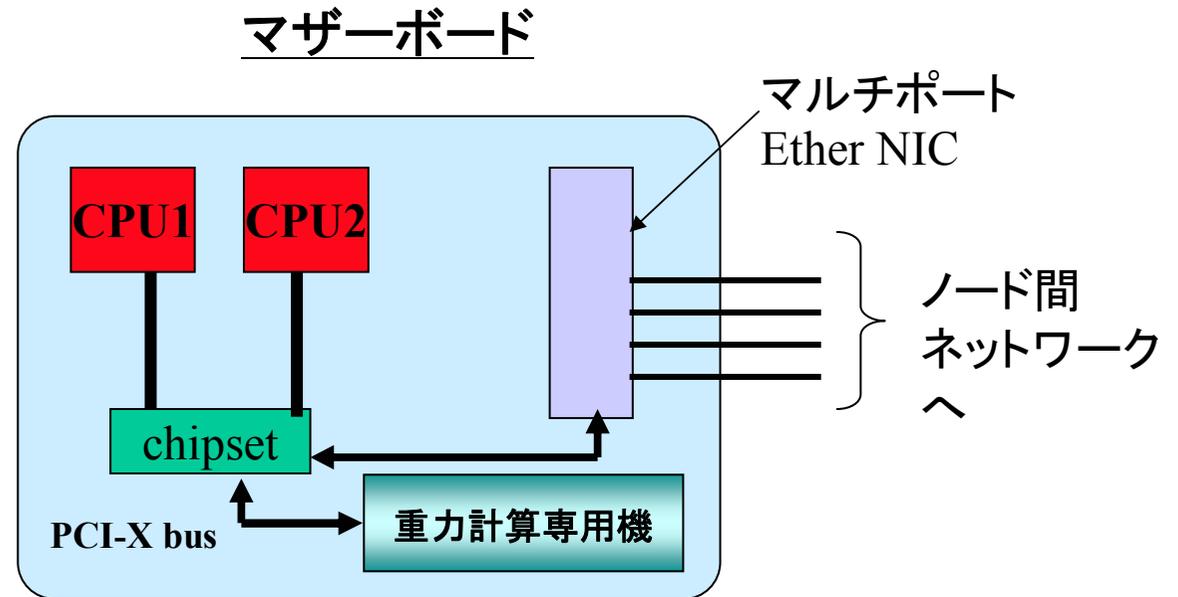
③ 通信性能

各ノードに専用機が分散し

クラスタサーバのPCI-Xバスに直結

宇宙シミュレータ FIRST

新世代型並列計算機
 — 専用機融合型クラスター —



- 2U型クラスタサーバ(Dual Xeon 3.4GHz)をノードとする
 (高密度化, 低価格化)
- PCI-Xバスによって重力計算専用ボードをサーバ内に組み込む
 (CPUとGRAPE間的高速データ転送を実現)

Blade-GRAPE

サーバ埋め込み型重力計算専用機 (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 (136.8 Gflops) (電力~50W)
重力計算用メモリ16MB (26万粒子)

GRAPE6チップ
×4

ヒートシンク

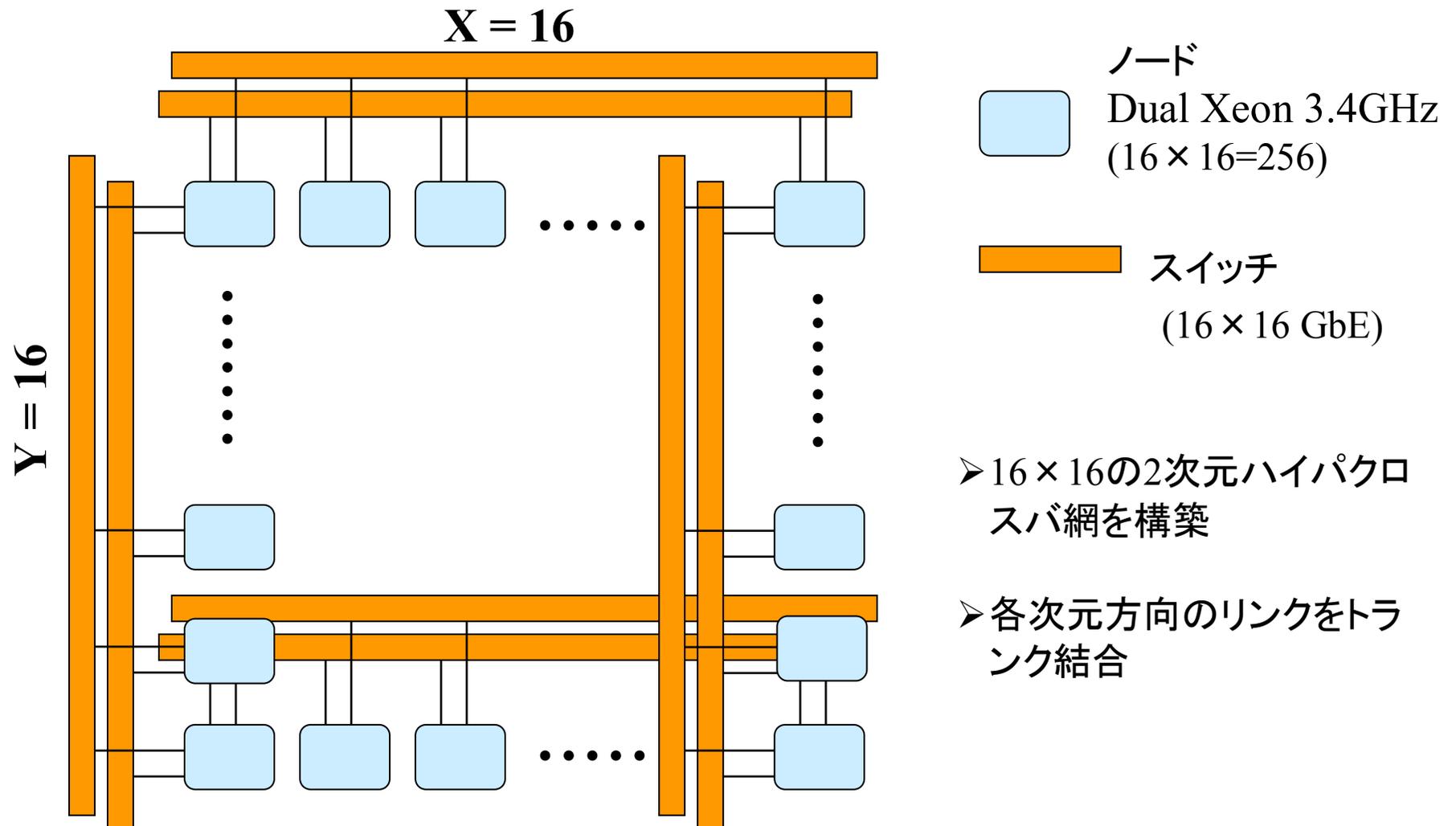


2Uサーバへの実装

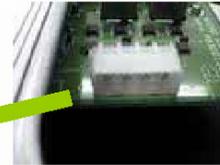
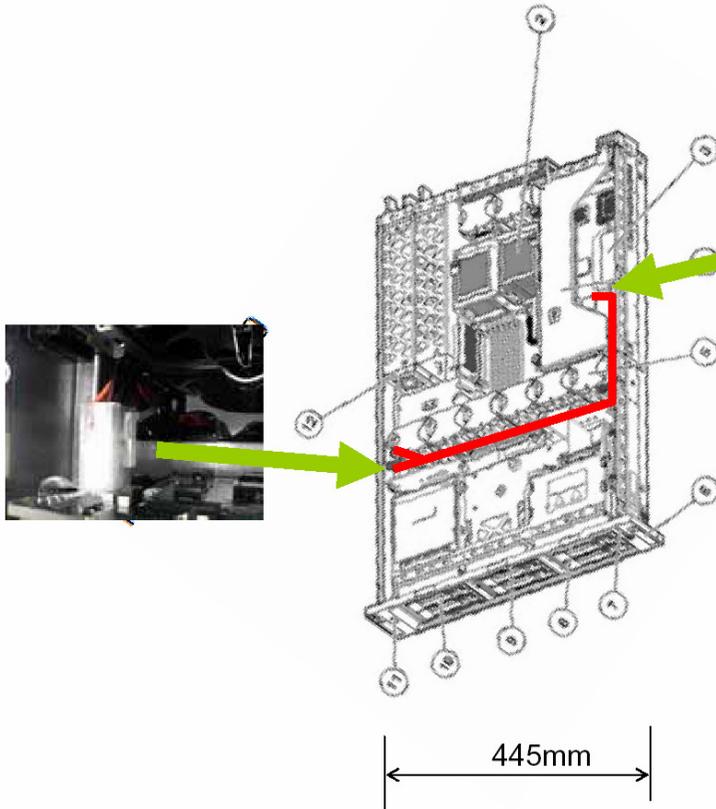
技術協力
浜松メトリックス(株)

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



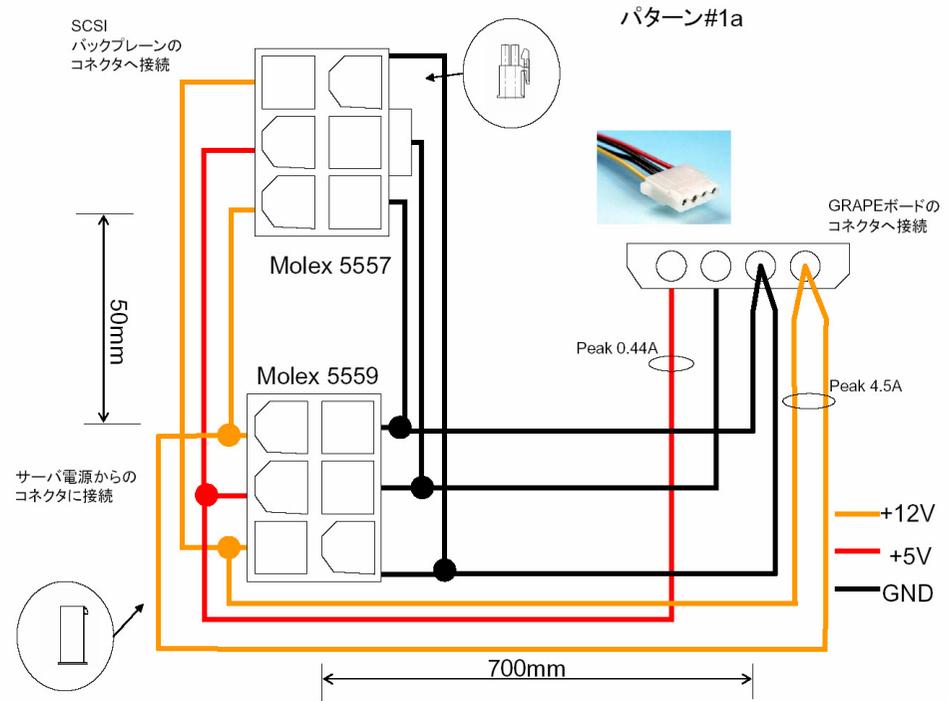
Blade-GRAPEへの電源供給



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。

PCI-Xバス 3.3V
+12V系 54W, +5V系 2.2W

日本ヒューレット・パカード(株)
のクラスターサーバで実現



FIRST 1号機



16ノード

2005年3月

16ノード (32 CPU + 16 Blade-GRAPe)

演算性能

汎用機(クラスター) 217 Gflops

(1秒間2170億回の演算)

専用機(Blade-GRAPe) 2.2 Tflops

(1秒間2.2兆回の演算)

**宇宙第一世代天体のための
シミュレータとして世界初**

技術協力

日本ヒューレット・パッカード(株)
ビジネスサーチテクノロジー(株)
住商エレクトロニクス(株)

FIRST 最終構成機

2006年度(第一・四半期)

256 (16×16)ノード

512 CPU + 256 Blade-GRAPe

演算性能: 汎用機(クラスタ) 3.5 Tflops

(1秒間3.5兆回の演算)

専用機(Blade-GRAPe) 35 Tflops

(1秒間35兆回の演算)

電力: ~100kW

宇宙第一世代天体
のためのシミュレータ
として世界最高速

宇宙物理分野の
シミュレータとして
国内最高速



1号機

2~16号機
2006年完成予定

まとめ

宇宙暗黒時代 = 宇宙のミッシングリンク

宇宙で最初の天体が誕生

宇宙物理の最終課題の一つ



宇宙シミュレータ **FIRST**

宇宙のミッシングリンク
を解き明かすために作られた世界初の計算機