

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料  
〔事後評価用〕

平成16年度採択分

平成20年 3月31日現在

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Elucidation on the Origin of First Generation Objects  
by HMCS-E (Heterogeneous MultiComputer System-Embedded)

研究代表者

梅村 雅之（UMEMURA MASAYUKI）

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授



研究の概要：汎用並列計算機組み込み型の重力専用計算機 Blade-GRAPE を開発し、専用機・汎用機融合型の宇宙シミュレータ FIRST を開発・製作した。これを用いて、これまでにない超高分解能のシミュレーションを実現し、宇宙第一世代天体における星形成過程について、従来の理解とは質的に異なる新たな知見を得た。

研究分野：数物系科学（理論天文学）

科研費の分科・細目：天文学・天文学（4201）

キーワード：宇宙第一世代天体、銀河形成、輻射流体力学、専用計算機

#### 1. 研究開始当初の背景

宇宙第一世代天体は、宇宙の全ての構造の起源となる天体であり、その誕生は、宇宙全体の進化、銀河の誕生、重元素の起源に関わる根源的な問題である。第一世代天体における星形成過程は、これまで多くの研究が行われてきたが、その質量、個数、形成率については、まだ十分な理解が得られていない。

#### 2. 研究の目的

第一世代天体とそこでの星形成過程について、宇宙論的初期条件を出発点として、自己重力、流体力学、輻射輸送、化学反応過程を整合的に扱った輻射流体力学計算により、これまでにない質量分解能で解き上げることによって、初代星形成についての物理的理解を確立する。

#### 3. 研究の方法

高分解能大規模シミュレーションを集中して行うために、重力専用計算機を汎用並列計算機に組み込んだ新たな融合型並列計算機を開発・製作する。この融合型並列計算機を用い、Tree SPH 法や P<sup>3</sup>M SPH などの計算スキームをベースに、重力専用機による高速化法を施したスキームを開発して、質量が 10<sup>6-7</sup> M<sub>☉</sub> 程度の第一世代天体形成について、全計算領域において 0.1 M<sub>☉</sub> 以上の質量分解能をもつ大規模シミュレーションを行う。これにより、第一世代の中で生まれる星形成過程、輻射性フィードバックなどを詳細に調べる。

#### 4. 研究の主な成果

##### 【宇宙シミュレータ FIRST の開発・製作】

第一世代天体形成の大規模シミュレーションを行うために、PC クラスターの各ノードに重力専用機を埋め込む新しい並列計算機アーキテクチャを考案し、組み込み型の重力計算専用ボード Blade-GRAPE を開発した。そして、これを PC クラスターに融合させた宇宙シミュレータ FIRST を開発・製作した（下写真）。FIRST は、平成 16 年度から段階的に製作され、最終構成機を平成 19 年 3 月に完成させた。最終機は、256 の計算ノード、496 の CPU からなり、総演算性能は、36.1TFLOPS（内ホスト部分 3.1TFLOPS、Blade-GRAPE 部分 33TFLOPS）、主記憶容量は 1.6TB である。また、分散したローカルディスクから一つの共有ファイルシステムを構築する Gfarm システムが導入されており、総計 22TB の共有ファイルシステムが構築されている。このような融合型並列計算機の開発は、世界でも例を見ないものである。



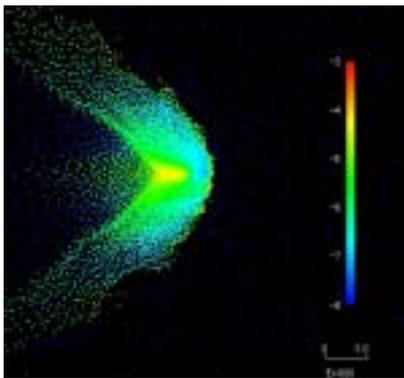
## 【大規模シミュレーションによる成果】

### (1) 第一世代星形成についての新たな知見

ダークマターの質量分解能が $\sim 100 M_{\odot}$ の場合、従来の結果と同様、ダークマターゆらぎによって誘起された小スケールのバリオン密度ゆらぎは、互いに合体し、 $10^4 M_{\odot}$ 以上の固まりを作ってから重力収縮を起こし、その結果中心に一つの星が誕生する。しかしながら、分解能を従来の計算よりも2桁上げた全粒子数3千800万個、ダークマター質量分解能 $2.4 M_{\odot}$ 、バリオン $0.4 M_{\odot}$ 、冷たいダークマターゆらぎの減衰スケールに近づける計算を行ったところ、小スケールのバリオン密度ゆらぎは、合体することなく重力収縮を起こし、ダークマターハロー内に複数の密度ピークが現れることが明らかになった。詳しい解析の結果、この違いは高質量分解能の計算によって初めて分解できるようになった小スケールのダークマターカスケードが引き起こしていることがわかった。これにより、これまで信じられてきたダークマターハローに第一世代星が一つだけ誕生するという仮定は正しくないことが明らかになった。

### (2) 第一世代星による輻射性フィードバック

これまで、第一世代天体の中では最初の星が誕生すると、その星からの強い紫外線が、冷却剤である水素分子の解離を引き起こし、次世代の星形成は阻害されるとされてきた。しかし、宇宙シミュレータ FIRST を用いて行った3次元大規模輻射流体力学計算(下図)により、最初の星からの紫外線輻射は電離波面前方に水素分子層を形成し、これによって水素分子解離輻射が効率よく遮蔽され、第一世代天体の広い領域で次世代の星形成が可能であることが明らかとなった。これは、これまでの定説を覆す結果である。



また、様々な条件から始めた計算を解析した結果、輻射性フィードバックは、基本的に電離波面がR型からM型へと変わる所を境とすることが明らかになった。さらに、最初の星質量に依存して、電離光子と解離光子の相対比が小さくなることによる効果を調べたところ、星質量が $25 M_{\odot}$ 以下になると、解離光子の影響が卓越して、星形成の阻害が起こることが明らかとなった。

### 5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

本研究課題は、研究目的のために、新しいアーキテクチャに基づく専用計算機を開発し、それによって新たな学術的成果を収めたものであり、世界的に見ても独創的な研究である。国際的外部評価においても、「FIRSTプロジェクトは、国際的にみてもユニークで、アプリケーションからのニーズによって革新的なコンピュータアーキテクチャやシステム研究をドライブし、これが翻ってアプリケーション分野における最先端の科学の成果をもたらすという、センターの能力を特徴付けるプロジェクトである。」との高い評価を得ている。また、本研究課題で行われた超高分解能の第一世代天体シミュレーションは、他のグループ行われてきた計算分解能を大きく上回るものであり、従来の理解とは質的に異なる新たな知見をもたらした。これらは、第一世代天体に引き続いて起こる銀河形成や宇宙再電離に多大な影響をもたらすものであり、学術的インパクトは大変高い。

### 6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

- 1) **M. Umemura**, H. Susa, T. Suwa, D. Sato, and FIRST Project Team, FIRST Project: Formation and Feedback of First Stars, *First Stars III*, 386-389 (2008)
- 2) M. Mori, R. M. Rich, The Once and Future Andromeda Stream, *ApJ Letters*, 674, L77-L80 (2008)
- 3) H. Susa, Photodissociation Feedback of Population III Stars onto Neighboring Prestellar Cores, *ApJ*, **659**, 908-917 (2007)
- 4) H. Susa, **M. Umemura**, Secondary Star Formation in a Population III Object, *ApJ Letters*, **645**, L93-L96 (2006)
- 5) I.T.Iliev, B.Ciardi, M.A.Alvarez, A.Maselli, A.Ferrara, N.Y.Gnedin, G.Mellema, T.Nakamoto, M.L.Norman, A.O.Razoumov, E.Rijkhorst, J.Ritzerveld, P.R.Shapiro, H.Susa, **M.Umemura**, D.J.Whalen, Cosmological Radiative Transfer Codes Comparison Project I: The Static Density Field Tests, *MNRAS*, **371**, 1057-1086 (2006)
- 6) 朴泰祐, **梅村雅之**, 佐藤三久, 高橋大介, 中本泰史, 須佐元, 森正夫, "FIRST - 第一世代天体の起源解明のための専用・汎用計算機融合型クラスタ", 情報処理学会ハイパフォーマンスコンピューティング研究会, 2005-HPC-103, pp.145-150, (2005)

ホームページ等

<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/people/umemura/FIRST/index-j.html>