

初期宇宙における天体形成

Structure Formation in the Early Universe

吉川 耕司

筑波大学 計算科学研究センター

1. 研究目的

初期宇宙における銀河形成の理解に不可欠な「大質量ブラックホールの宇宙論的文脈における成長過程の理解」と「ダークマターの物理的性質」という問題に取り組むため、i) 宇宙再電離期における銀河・ブラックホール共進化の数値シミュレーション、ii) 星団中におけるブラックホール成長と星団共進化の数値シミュレーション、iii) ダークマターの衝突・散乱家庭の影響を取り入れたダークマターハロー形成の数値シミュレーションを行う。

2. 研究成果の内容

i) 及び ii) については、星団形成の数値シミュレーションを **Adaptive Mesh Refinement (ARM)** を用いて分子雲スケールから個々の恒星へのガス降着まで分解できる高い空間分解能で行うための流体力学シミュレーションコードを GPU を用いて高速化した。

iii) については 2024 年度までの学際共同利用プログラムで得られた GPU で高速化されたダークマターの分布関数からボルツマン方程式の衝突項を計算するコードを既存のブラソフ方程式を 6 次元位相空間で直接数値積分するコードと組み合わせて、6 次元位相空間でボルツマン方程式を数値シミュレーションするコード開発し、希薄流体における様々な数値シミュレーションに適用することでその妥当性を検証した。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

星団の数値シミュレーションでは、**Pegasus** システムや **Miyabi-G** システムの GPU の利用が不可欠であった。これらのシステムを用いることで、星団を形成する元になる分子雲の空間サイズから個々の星のサイズ程度までの極めて広いダイナミックレンジに亘って大規模な自己重力流体シミュレーションを行うことが可能となった。

ボルツマン方程式の数値シミュレーションでは、分布関数から衝突項を計算する手法は GPU を用いて高速化することが不可欠であり、GPU を備えている **Pegasus** システムや **Miyabi-G** システムの利用が不可欠であった。

4. 今後の展望

今年度のプロジェクトで開発した GPU で高速化された流体力学シミュレーションコードに輻射輸送シミュレーションコードを追加することで星形成の最終段階の数値シミュレーションや他の天体形成の数値シミュレーションに応用する。

また、ボルツマン方程式の数値シミュレーションコードを用いてダークマター粒子同士の衝突・散乱効果を考慮した self-interacting dark matter (SIDM) モデルでのダークマターハロー形成の数値シミュレーションを行い、世界で初めて有限体積法に基づくボルツマン方程式の数値シミュレーションによる SIDM モデルの数値シミュレーションを実施することが可能になる。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- Hirashima, Keiya, Fujii, Michiko S, Saitoh, Takayuki R, Harada, Naoto, Nomura, Kentaro, Yoshikawa, Kohji, Hirai, Yutaka, Asano, Tetsuro, Moriwaki, Kana, Iwasawa, Masaki, Okamoto, Takashi, Makino, Junichiro, “The First Star-by-star N -body/Hydrodynamics Simulation of Our Galaxy Coupling with a Surrogate Model”, SC '25: Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis 1859-1873
- Higuchi, Hayato, Pedersen, Juan William, Toyozumi, Kiichiro, Yoshikawa, Kohji, Kiumi, Chusei, Yoshikawa, Akimasa, “Quantum calculation for two-stream instability and advection test of Vlasov-Maxwell equations: numerical evaluation of Hamiltonian simulation”, Journal of Plasma Physics, 91, E116

(2) 学会発表

- Haojie Hu, Yuta Asahina, Shogo Yoshioka, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, “Clumpy Outflows from Super-Edd. Accreting BHs I: RHD Simulations & Observational Implications”, XRISM International Conference 2025 (Kyoto, Oct. 20-25, 2025)
- K. Ohsuga, H.R. Takahashi, Y. Asahina, T. Kawashima, S. Yoshioka, H. Hu, M. Nomura, S. Mineshige, “Numerical Simulations of Black Hole Accretion Disks and Outflows”, The 50th Anniversary Workshop of the Disk Instability Model in Compact Binary Stars (Tomakomai, Sept. 23-26, 2025)
- Yuta Asahina, Ken Ohsuga, Hiroyuki R. Takahashi, Akihiro Inoue, “Numerical Simulations of Supercritical Accretion Flows Around a Compact Object”, Relativistic Fluids around Compact Objects (Nicolaus Copernicus Astronomical Center (CAMK), Polish Academy of Sciences, Poland, May 5-7, 2025)
- Akihiro Inoue, Ken Ohsuga, Hiroyuki R. Takahashi, Yuta Asahina, “Three-Dimensional General Relativistic Radiation MHD Simulations of

Supercritical Accretion onto a Magnetized Neutron Star”,
 AAPPS-DPP2025 (Fukuoka, Sept. 21-26, 2025)

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	7920		
Miyabi-G	○	13266		
Miyabi-C	○	7040		
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				