

初期宇宙における銀河形成

Galaxy 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

本プロジェクトの目的は、2023 年度からの継続課題として「初期宇宙における銀河形成過程」とそれ密接に関連する「巨大ブラックホールの宇宙論的なタイムスケールでの成長過程」と「ダークマターの物理的性質」の理解を数値シミュレーションによって行うことである。

具体的には、宇宙再電離期の銀河とブラックホールの共進化の数値シミュレーション、銀河スケールにおける巨大ブラックホールの成長過程の数値シミュレーション、ダークマター同士の散乱過程を考慮した **self-interacting dark matter (SIDM)** モデルや **warm dark matter (WDM)** モデルにおけるダークマターハローの数値シミュレーションを実施する。

2. 研究成果の内容

(i) 球状星団 (GC) は初期銀河で形成されると考えられているが、その形成過程はまだ謎に包まれている。GC は、He、N、Na などの軽元素の濃度が高く、C や O の濃度が低い第 2 世代の星の種族から成る。最近、JEST は初期銀河に大質量でコンパクトな星形成領域を発見し、それらの中には窒素の存在量がこれまでの理論予想よりも大きく、N/O 比は GC の第 2 世代星と類似している天体が発見された。窒素の構成からの放出は CNO サイクルによって起こるため、**Wolf-Rayet(WR)** 星からの恒星風が GC における金属濃縮の候補である。我々は恒星と超新星からの金属汚染を考慮した星団形成の数値シミュレーションを行った。その結果、WR 恒星風によって窒素を濃縮したガスと星が形成されることがわかった。

(ii) 自己重力系における衝突・散乱効果を、N 体シミュレーションではなく有限体積法に基づいて離散化した分布関数を用いてショットノイズなく計算する手法を前年度までに GPU で高速化することに成功したが、今年度は計算手法にアダプティブに計算精度をチューニングする手法を新たに開発することで、世界で初めて 6 次元位相空間での自己重力系の **Boltzmann** シミュレーションで行うことを可能にした。これによって、SIDM モデルにおけるダークマターハローの数値シミュレーションをこれまでになく精度よく計算することが可能になった。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

球状星団の数値シミュレーションでは、Pegasus システムや Wisteria 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り、本共同利用プログラムの利用が必要不可欠であった。

SIDM モデルでのダークマターハローシミュレーションに向けて、分布関数を有限体積法に基づいて離散化した場合の Boltzmann シミュレーションを世界で初めて科学的に意味のある規模で達成する上で、Pegasus システムの NVIDIA H100 の高いパフォーマンスが必要不可欠である。

4. 今後の展望

今年度のプロジェクトでは、将来の星団形成シミュレーションに向けた Adaptive Mesh Refinement (AMR) 法による自己重力流体力学シミュレーションコードの開発も並行して行っている。このシミュレーションコードは GPU によって AMR 法による流体シミュレーションの高速化を図っており、現在の数値シミュレーションでは不十分な数値シミュレーションのダイナミックレンジを大幅に改善することが出来ると期待される。

2024 年度のプロジェクトで開発した、6 次元位相空間での Boltzmann シミュレーションを行うコードを用いて、Pegasus システムや Miyabi-g システムにおいて世界で初めて 6 次元位相空間での Boltzmann シミュレーションによる SIDM モデルにおけるダークマターハローの形成シミュレーションを実施することを目指している。特に、これまでの N 体シミュレーションでは困難な SIDM における重力熱不安定性の数値シミュレーションが可能となることが期待される。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- Yuta Asahina and Ken Ohsuga. “General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Precessing Tilted Super-Eddington Disks”. ApJ 973.1, 45 (Sept. 2024). P. 45
- Akihiro Inoue, Ken Ohsuga, Hiroyuki R. Takahashi, Yuta Asahina, and Matthew J. Middleton. “GR-RMHD Simulations of Super-Eddington Accretion Flows onto a Neutron Star with Dipole and Quadrupole Magnetic Fields”. ApJ 977.1, 10 (Dec. 2024). P. 10
- Takuya Mushano, Takumi Ogawa, Ken Ohsuga, Hidenobu Yajima, and Kazuyuki Omukai. “Impact of the Ly α radiation force on super-Eddington accretion on to a massive black hole”. PASJ 76.6 (Dec. 2024). Pp. 1260–1269
- Yuta Asahina and Ken Ohsuga. “General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Precessing Tilted Super-Eddington Disks”. ApJ 973.1, 45 (Sept. 2024). P. 45.

- Hajime Fukushima and Hidenobu Yajima. “Impacts of stellar wind and supernovae on star cluster formation: Origins of extremely high N/O ratios and multiple stellar populations”. PASJ 76.5 (Oct. 2024). Pp. 1122–1130
- Taichi Igarashi, Hiroyuki R. Takahashi, Tomohisa Kawashima, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, et al. “Radiation MHD Simulations of Soft X-Ray Emitting Regions in Changing Look AGN”. ApJ 968.2, 121 (June 2024), p. 121

(2) 学会発表

- K. Ohsuga, A. Inoue, A. Utsumi, S. Yoshioka, H.R.Takahashi, et al. “Numerical Simulations of superEddington flows around BHs and magnetized NSs”. Accretion Disks: The First 50 Years (Bern, Switzerland, June 17–21, 2024)
- Hajime Fukushima and Hidenobu Yajima. “Formation of massive star cluster under radiative and stellar wind feedback: origins of extremely high N/O ratios and multiple stellar populations”. Cosmic Dawn at High Latitudes Conference (Stockholm University, Sweden, June 24–28, 2024)
- Kohji Yoshikawa, “SIMD acceleration of particle-based simulation and Vlasov simulation on A64FX processor” 、第 14 回 A64FX 向けチューニング技術検討会（オンライン）

(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*	追加配分
Cygnus	○	8960	0	0
Pegasus	○	3200	0	0
Wisteria/BDEC-01	○	98400		0
※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				