

## 初期宇宙における銀河形成の研究

### 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

初期宇宙における銀河形成の理解とそれと密接に関連する重要な宇宙物理学における未解決問題である「ダークマターの物理的性質」や「巨大ブラックホールの宇宙論的文脈における成長」に取り組む。2023 年度は、(i) 初期宇宙における銀河形成の輻射流体シミュレーション、(ii) 銀河形成におけるブラックホール軌道進化の数値シミュレーション、(iii) ダークマターの衝突・散乱を取り入れたダークマターハローの数値シミュレーションを行うことを目的とする。

#### 2. 研究成果の内容

(i) 初期宇宙における銀河形成の輻射流体シミュレーションを用いて、第一世代星の原始星連星系が合体するための物理的な条件を調べ、初期の連星の相対距離が二つの第一世代原始星の半径の和の 80% よりも小さい場合に連星の軌道角運動量が原始星のスピン角運動量に変換されることで潮汐固定のタイムスケールよりも短い時間で連星が合体できることを示した。

(ii) 銀河形成におけるブラックホール軌道進化の数値シミュレーションを用いて、宇宙論的な文脈におけるブラックホールの成長過程を調べ、ダークマターハローがある程度成長してから種ブラックホールが形成されるとブラックホールの成長が促進されること、JWST による観測で発見された宇宙初期での比較的大きなブラックホールの起源としてはダークマターハローの形成時に存在できる種ブラックホールであることを示した。

(iii) ダークマターの衝突・散乱を取り入れたダークマターハローの数値シミュレーションに関しては、N 体シミュレーションではなくダークマターの分布関数の時間発展を直接数値シミュレーションする Boltzmann シミュレーションを用いるが、2023 年度には衝突項計算にこれまでにない精度保証の仕組みを開発し、Pegasus システムや Cygnus システムにおいて GPU を用いた高速計算に導入した。

#### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究を遂行するにあたり、(i) 初期宇宙における銀河形成の輻射流体シミュレーションと(ii) 銀河形成におけるブラックホール軌道進化の数値シミュレーションに関しては Wisteria/BDEC-01 システムを用いたことで、数多くのシミュレーションパラメータについて系統的な調査を実施することが可能となった。また、(iii) ダークマターの

衝突・散乱を取り入れたダークマターハローの数値シミュレーションの研究では GPU による高速な衝突項の計算が本質的・不可欠であり、GPU が搭載されている Cygnus・Pegasus システムの果たした役割は大きい。

#### 4. 今後の展望

(i) 初期宇宙における銀河形成の輻射流体シミュレーションと(ii) 銀河形成におけるブラックホール軌道進化の数値シミュレーションに関しては、初期宇宙における銀河と巨大ブラックホールの共進化過程を、輻射輸送シミュレーションをはじめとする星形成や活動銀河核からのフィードバック効果を詳細に取り入れた数値シミュレーションによって明らかにしていく予定である。(iii) ダークマターの衝突・散乱を取り入れたダークマターハローの数値シミュレーションに関しては、2023 年度に予定していながら開発作業の遅れの為に実施できなかったダークマターハローの世界初となる Boltzmann シミュレーションの実現を目指す。

#### 5. 成果発表

##### (1) 学術論文

- Inoue, A., Ohsuga, K., Takahashi, H.R., Asahina, Y., “Modeling of Thermal Emission from ULX Pulsar Swift J0243.6+6124 with General Relativistic Radiation MHD Simulations”, *The Astrophysical Journal*, 952, 62
- Kobayashi, S. et al., “Decomposing the Spectrum of Ultraluminous X-Ray Pulsar NGC 300 ULX-1”, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 10, 1289432
- Otaki, K., Mori, M., “Frequency of the dark matter subhalo collisions and bifurcation sequence arising formation of dwarf galaxies”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 525, 2535
- Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., “Transonic galactic wind model including stellar feedbacks and application to outflows in high/low- $z$  galaxies”, *Publications of the Astronomical Society Japan*, 75, 1214

##### (2) 学会発表

- “GR-RMHD Simulations of Super-Eddington Flows”, *New Frontiers in GRMHD Simulations of Accreting Black Holes 2023*, 04/03 - 04/06, online, K. Ohsuga; Y. Asahina; A. Utsumi; A. Inoue; H. R. Takahashi
- “Formation of the First Bright Galaxies with Pop III stars in Cosmological Simulations and Comparisons with JWST data”, *Fake Light Workshop*, 2023 05/30 - 06/02, Flatiron Institute, New York, USA, Hidenobu Yajima
- “Radiation MHD simulations of super-/near-Eddington accretion flows and outflows”, *Astrophysical Black Holes: A Rapidly Moving Fields*, 2023 06/23 - 06/26, Hong Kong University, China, K. Ohsuga

- “Magnetohydrodynamics Simulations of Black Hole Accretion Flows and Outflows”, 34th IUPAP Conference on Computational Physics, 2023 08/04 - 08/08, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, K. Ohsuga; H.R.Takahashi; T. Kawashima; Y. Asahina; A. Utsumi; S. Takeuchi; S. Mineshige
- “Vlasov-Poisson Simulation of Self-gravitating Systems”, The 14th RESCEU symposium / From Large to Small Structures in the Universe, 2023 10/30 - 11/02, Koshiba Hall, the University of Tokyo, Japan, Kohji Yoshikawa
- “Global Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Precessing Disk around a Spinning Black Hole”, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, 2023 11/12 - 11/17, Port Messe Nagoya, Japan, Yuta Asahina; Ken Ohsuga
- “Vlasov simulation in 6-dimensional phase space for cosmological neutrinos and its application to astrophysical plasma”, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, 2023 11/12 - 11/17, Port Messe Nagoya, Japan, Kohji Yoshikawa
- “Numerical simulations of super-Eddington accretion flows”, 32nd Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, 2023 12/11 - 12/15, Shanghai, China, K. Ohsuga; H.R.Takahashi; T. Kawashima; Y. Asahina; A. Utsumi

(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	追加配分
Cygnus	○	14000	0
Pegasus	○	4000	0
Wisteria/BDEC-01	○	123000	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。			