

原始星内部構造までを含めた初代星形成過程の解明 Understanding Primordial Star Formation : Resolving Internal Structure of Protostars

木村和貴
東北大学

1. 研究目的

本研究の目的は、宇宙初期に形成される初代星の性質を、原始星内部構造までを分解した超高解像度の 3 次元輻射流体シミュレーションにより明らかにすることである。従来の 3 次元シミュレーションでも原始星内部構造の進化に注目したものはあるが (c.f. Stacy+2013)、輻射輸送が解かれておらず原始星の内部構造に関しては十分に解明されていないのが現状である。そこで本研究では、輻射輸送を解きつつ原始星内部まで分解可能な超高解像度の 3 次元シミュレーションを実施し、星形成ガス雲から形成される原始星の進化過程を計算する。これにより、原始星の光度や自転の性質を定量的に評価し、それらが最終的な初代星質量に与える影響を明らかにすることを目指す。

2. 研究成果の内容

本年度は、原始星形成の高解像度シミュレーションを実行するための輻射流体計算コードの開発に注力した。

本研究では、計算効率を良くし長時間の進化を追うために光速制限法を導入しているが、この手法は系全体のエネルギー保存を損なう問題があり、原始星の進化に深刻な影響を及ぼすことが確認された。これに対処するため、原始星内部では光速を制限せず、外部領域のみで制限を適用する新たな手法を開発し、エネルギー保存と計算効率の両立を実現した。

加えて、原始星の内部構造を分解しつつ長時間計算を安定に行うため、コードの複数箇所に改良を加えた。具体的には、化学反応および輻射の放射・吸収過程に関するソルバーを改良し、計算の収束性と高速化を達成した。また、重力エネルギーを含む系全体のエネルギー保存を保証す、重力計算にエネルギーが計算機精度で保存するスキームを導入した。その他安定性向上のための各種修正も随時実施している。

これらの改良を経て、現在コードは安定して動作しており、各種テスト計算も完了した。本手法の詳細については現在論文化を進めている段階である。さらに、宇宙初期における超大質量星形成環境を模擬した初期条件のもと、3 次元シミュレーションも開始しており、従来の 1 次元的原始星進化モデルとは異なった新たな進化の描像が得られつつある。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究では大規模な輻射流体計算を必要とするため、学際共同利用プログラムによる計算資源の提供は極めて重要であった。特に、コード開発の段階においては計算を即座に実行できる環境が非常に重要であり、本プログラムにより研究を円滑に進めることができた。

4. 今後の展望

今後はまずコードの手法と超大質量星形成における原始星の 3 次元進化の結果をまとめ、論文として公表することを目指す。その後は、宇宙論的シミュレーションから初代星が形成されるガス雲を複数取ってきて、本年度の開発したコードを用いることで、実際に形成される初代星の典型的な性質や多様性を明らかにしていく予定である。

5. 成果発表

- (1) 学術論文
- (2) 学会発表

- 1. First Stars VII, 「Co-evolution of Accreting Protostar and Circumstellar Disk in 3D RHD Simulation : Evolution toward the Supermassive Star Formation」, ポスター発表, 2024 年 5 月, New York
- 2. ILR workshop "From Galaxy Formation to Supermassive Black Holes", 「Protostellar Evolution via Disk Accretion during the Early Stages of Supermassive Star Formation in 3D RHD Simulation」, 口頭発表, 2024 年 9 月. 大阪大学
- 3. 2024(令和 6)年度 国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング, 「急速なガス降着下における原始星進化の 3 次元輻射流体シミュレーション」, ポスター発表, 2024 年 11 月, 国立天文台

- (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				
Pegasus				
Wisteria/BDEC-01	○	120000		
※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				