

適合格子細分化法を用いた輻射流体計算による星団形成の研究

Radiation hydrodynamics simulations of star cluster formation with adaptive mesh refinement

福島 肇

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

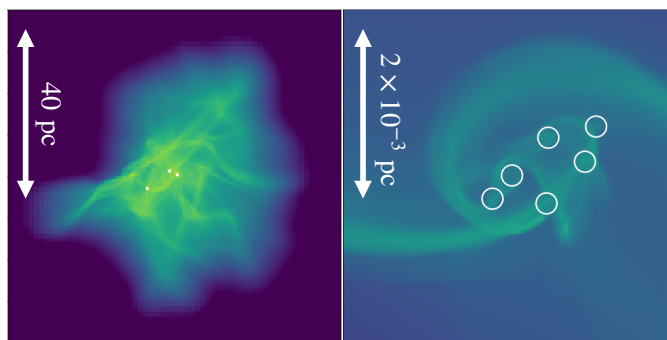
星はガスが重力により集積することで誕生する。その際、星は単独では誕生せず、星団と呼ばれる星の集団として生まれる。このため、星形成の解明には、複数の星が同時に誕生する過程を考慮する必要がある。また、星団形成については、星の誕生だけを計算すれば良いわけではなく、誕生した星から周囲のガスへの影響を考慮する必要がある。これは、例えば大質量星が起こす電離領域形成、星風や超新星爆発、小質量星も含めた成長段階にある星が駆動するアウトフローにより、運動量・エネルギーの星間ガスへの注入が起こることで、星団の母体となるガス雲の破壊が起こる。これらの現象により、ガス雲から星へと変換される割合を表す星形成効率も決定する。また、星形成では重力収縮により、ガスの密度・空間スケールともに何桁にも及んで変化する。上記の現象を取り扱うために、本プロジェクトではこれまで、高密度領域に選択的に格子を配置することができる適合格子細分化法(Adaptive Mesh Refinement; AMR 法)などのアルゴリズムを導入し、かつ輻射輸送や化学反応などをシミュレーション中で取り扱うことが可能な、AMR 自己流体計算コード SFUMATO# (HF & Matsumoto submitted to PASJ)を開発してきた。このコードを用いて、実際に星団形成についての高解像度輻射流体シミュレーションを実施することを目的としている。また、このコードでは流体、自己重力、非平衡化学、熱進化と異なる計算アルゴリズムを採用している。各パートの開発は完了しているが、実際の星団形成シミュレーションを稼働させることで、ボトルネックとなる部分を特定し、更なる最適化を実施することも目標とする。

2. 研究成果の内容

開発3年目の2025年度では、すでに開始当初から、星団形成シミュレーションに必要な自己重力、星粒子、化学反応や輻射輸送計算のコード開発を完了しており、科学的成果の導出を実施する計算の実行へと段階を移行した。一方、実際に計算を実行すると、自己重力計算と非平衡化学計算がボトルネックとなることが判明し、これらの最適化が必要であることも判明した。具体的には、自己重力計算については、その solver 内でのメモリー確保や reduction 等に時間が過度に必要なことが判明したため、アルゴリズムの変更によりそれらの実行頻度を現象させ、高速化を実現

した。また、非平衡化学についても、ダスト温度のアップデートの時間ステップが非常に小さくなることに起因して、計算コストが増大することがわかった。このため、ダスト粒子の比熱容量について、計算に影響しない程度まで値を増加させる手法を開発し、計算時間を削減することに成功した。また、各パートの計算性能についても一様格子や *nested grid* 構造の場合について計算を実施した。これらの成果をまとめ、現在 *Publications of the Astronomical Society of Japan* に論文を投稿中である。

また、実際の星団形成のシミュレーションも実行中であり、右図のように星団スケールにおけるガス運動の計算を行いながら、星粒子周囲に形成される降着円盤について同時計算を実行することが可能となった。



星団形成シミュレーションにおけるガス分布の様子。
左図: 星団形成領域のガス密度分布。白点は星粒子の位置を表す。
右図: シンク粒子周囲の降着円盤の様子。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

依然として、宇宙物理分野では、GPU を用いたコードの開発・実行は広く進んでいない状況にある。特に、GPU を用いた計算資源の確保が容易ではないことも原因の一つと考えられる。この中で、最新の GPU である GH200 やそれに準ずる GPU を計算資源として使用できる学際共同利用プログラムは、計算コードの開発から実行までのすべての段階において、その存在価値は非常に高い。また、GPU を用いた計算コードの開発は国際的に見ても成長段階にあるため、最新の GPU を用いて競争の最先端に到達する機会を得られる点でも、学際共同利用プログラムが果たす役割は非常に大きい。

4. 今後の展望

今後は引き続き、星団形成についてのシミュレーションを実行する予定である。特に、形成過程が未解明である、総質量が太陽の十万倍を超えるような大質量星団の形成過程について、降着円盤スケールまで解像した計算を実行する予定である。他にも、ブラックホールの降着成長などの星形成以外の他の宇宙物理における研究にも、本プロジェクトで開発した計算コードを応用する予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

“GPU 上で動く AMR による自己重力流体コードの開発”, ビッグデータアストロノミー, 福島肇, 松本倫明

“星団形成：高赤方偏移銀河形成とアストロバイオロジーとの接続を目指して”, 初代星・初代銀河研究会 2025, 福島肇

“低金属量星団形成シミュレーション”, 第38回理論懇シンポジウム, 福島肇, 松本倫明

“高密度星団形成時における星への質量降着過程の解明”, 2025(令和7)年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング, 福島肇, 松本倫明

“Simulations of low-metallicity star cluster Formation with a GPU-accelerated code”, Coastline Workshop: Star Formation Across Galactic Environments, Hajime Fukushima

“Radiation Hydrodynamics Simulations of Star Cluster Formation Resolving Protostellar Accretion”, PRIMA-J All-in-One Meeting FY2025, Hajime Fukushima

(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 | ○ | 14400 | | |
| Miyabi-G | ○ | 45360 | | |
| Miyabi-C | | | | |
| ※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 | | | | |