

星団形成シミュレーションへ向けた輻射流体コードの開発

Development of radiation hydrodynamics code for simulations of star cluster formation

福島肇

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

宇宙において、星は星の集合体である星団として誕生する。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解明する必要がある。星団形成の理論研究では、数値シミュレーションを用いた研究がこれまでも盛んに実施されてきた。これまでの研究から、星形成過程には、ガスの流体力学や重力収縮を起こす自己重力の他にも、アウトフローなどを駆動する磁場やガス雲全体の破壊に関連する電離光子の輻射輸送や熱進化に関連した非平衡化学などの多くの効果を同時に計算することが必要であることが明らかになった。また、星形成では、重力収縮により、ガスの密度が約 20 桁程度上昇することから、高密度領域に選択的に格子を配置すること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の導入が必要不可欠となる。星・星団形成についての計算コードは、上記のように考慮する過程の多さや、AMR 法などの複雑なアルゴリズムを採用する必要があることから、これまでは主に CPU を主体にした計算に主眼が置かれてきた。しかし、領域間通信を多く行う必要があるコードの特性上、通信部分がボトルネックとなり、数千並列以上の多並列計算には適さないという特性も持ち合わせていた。しかし、昨今の GPU を用いた計算機を用いれば、1 プロセスあたりの演算数を飛躍的に向上させ、更に高解像度の計算を実施できる可能性がある。しかし、これまで CPU を用いた計算が主流であった経緯から、GPU への移行は全世界的にみても進んでいない。そこで、本プロジェクトでは星団形成シミュレーションを GPU 上で実行可能な、輻射磁気流体シミュレーションコードの開発を行うことを目標としている。

2. 研究成果の内容

開発 2 年目の 2024 年度では、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についてのコード開発を完了し、科学的成果を導出可能なコードを開発することに成功した。自己重力については、multigrid 法を実装することで、Poisson 方程式を計算することが可能となった。星粒子についても 1 万個以上の星粒子の同時計算可能なコードを開発した。化学反応計算と輻射輸送については、これまでのコードで用いられてきた隠的な時間発展計算では、GPU 上の計算コストが膨大となることから、陽的な時間発展が可能な計算方法を新たに開発・実装す

ることで、既存のコードと同様の結果を高速に導出可能なコードを開発した。これらのコードと関連したテスト計算も行い、例えば化学と輻射輸送計算については、図 1・2 に示すように電離領域の膨張についてのテスト計算を行い、正確に計算が実施できることを確認した。

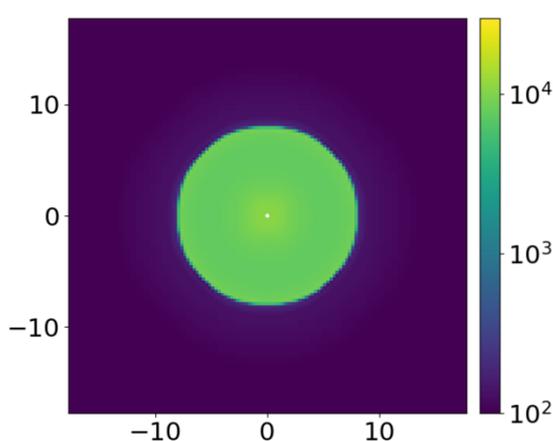


図 1: 電離領域の膨張計算: ガス温度

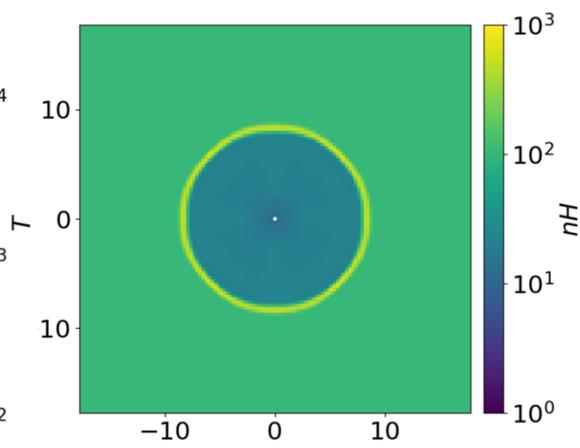


図 2: 電離領域の膨張計算: 密度

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用プログラムにより、GPU を用いたコードの開発・実行に取り組むことが可能となった。特に、宇宙物理研究用のアプリケーションで用いられてきた方法は、GPU 上での計算にそのまま使用できないアルゴリズムも多々あり、その選定も含めて、実際に計算コードを実行できる環境は必要不可欠であった。GPU を用いた AMR 法を用いた計算コードの開発は国際的に見ても途上であるため、その競争の最先端に到達する機会を得られた点についても、学際共同利用が本プロジェクトで果たす役割は非常に大きいと言える。

4. 今後の展望

星団形成シミュレーションに必要なコード開発が完了したため、次年度から科学的成果の創出を目指す。特に、近年観測が飛躍的に進んでいる高赤方偏移銀河における星・星団形成解明に向けた高解像度シミュレーションを実施する予定である。加えて、星形成以外にも多くの宇宙物理分野にも、本プロジェクトで開発している流体コードを用いることが可能であるため、例えばブラックホールへの降着成長といった、様々な問題に応用していく予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

“Impacts of stellar wind and supernovae on the star cluster formation: origins of extremely high N/O ratios and multiple stellar populations”, Hajime Fukushima, Hidenobu Yajima, Publications of the Astronomical Society of Japan, 76, 1122 (2024)

(2) 学会発表

“GPU 上で動く AMR 法による自己重力流体コードの開発”, 日本天文学学校 2025 年春季年会, 福島肇, 松本倫明

“GPU 上で動く AMR 自己重力流体計算コードの開発”, 第 37 回理論懇シンポジウム, 福島肇, 松本倫明

“GPU 上で実行可能な AMR 法による流体コードの開発”, 令和 6 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

“GPU 上で動く AMR 流体計算コードの開発と現状について”, 初代星・初代銀河研究会 2024, 福島肇

(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	○	7000		
Pegasus	○	4200		
Wisteria/BDEC-01				
※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				