

輻射流体シミュレーションによる天体形成の研究

Structure Formation in the Universe using Radiation Hydrodynamic Simulations

大須賀 健

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、輻射輸送シミュレーションおよび輻射流体シミュレーションを実施することで、宇宙に存在する多様な天体の形成過程を解明することである。具体的には、[1]銀河および星団の形成過程、[2]ブラックホール降着円盤やジェットのマカニズム、そして[3]ダークマターと大規模構造を解明する。なお、本プロジェクトでは、輻射流体力学計算コード (START、SUFUMART-M1、UWABAMI、ダークマターボルツマンコード) および輻射輸送シミュレーションコード (SEURAT、RAIOKU) を用いる。精度の向上と高速化を目指し、継続的にコードの開発・改良を実施する。

2. 研究成果の内容

[1]銀河および星団形成について

本年度は、星や銀河からのアウトフローにおける $\text{Ly}\alpha$ 光子の輻射力の影響を調査するため、 $\text{Ly}\alpha$ 輻射流体力学計算コードの開発に着手した。モンテカルロ法に基づいた計算手法を採用し、標準的なテスト問題をクリアした。そして、 $\text{Ly}\alpha$ 光子の多重散乱過程に伴う輻射力を定量的に評価することで、 $\text{Ly}\alpha$ 光子による定常アウトフロー形成の再現に成功した。星団形成については、自己重力と内部紫外線光の影響を含む輻射流体計算を実施し、球状星団に相当する大質量・高密度星団が形成される条件について、星の初期質量分布にどのように依存するかを調べた。大質量星が多く誕生する場合には、ガスの電離による雲破壊が効果的に進行するために、球状星団の形成には面密度が高い、つまりよりコンパクトなガス雲が必要であることを示した。

[2]ブラックホール降着円盤やジェットについて

我々は、M1-closure 法を採用した一般相対論的輻射磁気流体計算コード

“UWABAMI” を駆使し、ブラックホール降着円盤におけるエネルギー変換効率が、ブラックホールスピンの増加とともに上昇することを見出した。しかも、スピンの小さい場合は主に輻射で、大きい場合は磁場によるエネルギーが支配的になることが支配的になることが分かった。

[3]ダークマターと大規模構造について

ダークマターの分布関数の時間発展をダークマターの衝突・散乱の効果を考慮しつつ解く Boltzmann シミュレーションの開発に必要な衝突項計算の GPU を用いた高速化を行った。衝突項の計算手法は分布関数のフーリエ成分を用いるスペクトル法を用いるため NVIDIA GPU の cuFFT パッケージを用いた実装を行い、衝突項計算過程の並列性をうまく利用することで CPU における実装の数百倍という実効性能まで衝突項の計算を高速化することに成功した。また、16 ビット浮動小数点演算 (BF16) を用いることで更なる高速化を達成した。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本プロジェクトで実施した紫外線輻射流体力学シミュレーションや、一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションは、必要メモリにおいても計算時間においても小規模クラスタでは実行不可能であり、本プログラムによる大規模計算が不可欠であった。また、ダークマターやニュートリノの Vlasov シミュレーションも、6 次元位相空間をメモリに展開するため元来巨大なメモリ空間が必要であり、小規模なテスト計算であっても研究室レベルのクラスタでは実行不可能であるが、Cygnus や Wisteria を用いることで初めて実施することができた。

4. 今後の展望

赤方偏移、ハロー質量、金属量、星形成率といった銀河の特徴量をパラメータとした計算を実行し、Ly α 輻射力によるアウトフロー形成の可能性や性質について定量的に評価する。また、より現実的な初期条件として、高赤方偏移銀河についてのシミュレーションから得られたガス雲を採用し、星団形成シミュレーションを行うことで、球状星団がどのような銀河で誕生したのかを明らかにする。ブラックホール周囲の磁場が強い場合の降着円盤とジェットを解明する。ボルツマンコードや、高速化した Vlasov コードを用いた計算を実施し、宇宙大規模構造の研究を遂行する。更なるコードの開発や高速化も継続して実施する。

5. 成果発表

学際共同利用成果リストとして別途提出の通り

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	○	3,872	0
Wisteria/BDEC-01	○	44,640	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。			