

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

星間ガスの進化は、輻射による加熱や冷却に大きく影響を受ける。また、光度の大きな天体では、輻射による力がガスダイナミクスを支配することさえある。したがって、輻射輸送を加味した数値流体計算（いわゆる輻射流体計算）は、様々な天体の形成過程を解明する上で重要である。本研究の目的は、輻射流体シミュレーションを駆使し、宇宙の天体形成史を解明することである。特に、宇宙大規模構造、銀河や星団、巨大ブラックホールの形成や進化過程の解明を目指している。また、現在利用されている輻射流体計算コードは、多かれ少なかれ輻射輸送を近似的に扱っているため、より現実的な状況を調べるためには、高精度な輻射輸送計算コード（ボルツマンコードやブラソフコードも含む）を新規に開発し、高速化する必要がある。これも本研究の目的である。

2. 研究成果の内容

(1) 紫外線輻射流体力学計算による初代銀河中の星団形成過程の研究

本研究では、Adaptive Mesh Refinement (AMR) 法による流体力学計算と M1-closure 法を組み合わせた輻射流体力学計算コード (Sfumato-M1) を用いて、初代銀河中の星団形成過程に関するシミュレーションを実行した。初期条件は高解像度の初代銀河形成シミュレーションによって生成し、初代星の誕生から初代星超新星爆発による重元素の放出、ならびにその集積過程を解き、初代銀河中で種族 II の星団形成が開始されるまでの進化を正確に追ったものである。3つの初代銀河モデルに対して計算を行った結果、超新星爆発が起こる以前に作用する紫外線フィードバックが、ガス雲中の星形成の抑制に重要な役割を果たすことを明らかにした。紫外線フィードバックにより星形成効率は 4-6% となり、重力的にゆるく束縛された diffuse な星団が形成されやすいことがわかった。

(2) 一般相対論的輻射磁気流体力学計算による回転するブラックホールへの超臨界降着流の研究

本研究では、M1-closure 法を採用した一般相対論的輻射磁気流体力学計算コード、

UWABAMI、を用いて回転するブラックホールへの超臨界降着流およびそこから発生するガス噴出流について調べた。その結果、ブラックホールが回転している方が、回転していないよりも多くのエネルギーが解放されることがわかった。特に、磁場エネルギーの解放率がブラックホールの回転と強く相関することがわかった。これは、ブラックホールの回転エネルギーが磁場を介して抽出されている可能性を示唆するものである。なお、解放される光のエネルギーと運動エネルギーの比は、超臨界降着流の候補天体である超高光度 X 線源の観測と矛盾しないこともわかった。

(3) ボルツマン方程式の衝突項の数値計算手法の開発

我々の宇宙の質量の大半を占めるダークマターは無衝突な成分とされているが、近年の観測からダークマター同士の散乱を考慮したダークマターモデルの可能性が指摘されている。我々がこれまで開発してきた 6 次元位相空間の分布関数を直接数値シミュレーションする手法を散乱を考慮したダークマターモデルに適用するために、ボルツマン方程式の衝突項を分布関数に対して計算する必要があるが、この計算は運動量に関して 5 重積分を実行する必要があり計算コストが極めて大きい。本研究ではスペクトル法を応用した計算方法を用いて衝突項を高速に計算する手法を開発した。

(4) Vlasov シミュレーションの SIMD 命令を用いた高速化

無衝突自己重力系の数値シミュレーションに用いられる 6 次元位相空間における無衝突ボルツマン方程式の数値解法を SIMD 命令 (AVX と AVX-512) を用いて高速化することに成功した。これは富岳の A64FX プロセッサの SVE 命令で我々が行った実装を Intel KNL プロセッサにも移植することで実現し、これまでは非常に大きなメモリ空間を利用するためのキャッシュミスとステンシル計算特有の SIMD 命令の利用のしにくさの為に制限されていた実効性能を大幅に改善することが出来た。

3. 学際共同利用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 Oakforest-PACS 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

紫外線輻射流体力学シミュレーションにおいては、より広いパラメータ範囲で計算を

実施し、星団形成の条件をより詳しく調査する。また、一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションは、磁場強度の強い状況や、中心天体を中性子星にした計算も実施し、超高光度 X 線源の中心天体の解明を目指す。新たに開発した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

筑波大学計算科学研究センター学際共同利用報告書の通り

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	○	4,032	0
Oakforest-PACS	○	41,040	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。			