

## 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

星や銀河、ブラックホールなど、宇宙に存在する多様な天体は、宇宙初期に存在する密度ゆらぎが成長して形成されたと考えられるが、未解明な点が多い。例えば、星や銀河の形成過程、宇宙の再電離過程を解明する鍵となるのが Lyman- $\alpha$  輝線で非常に明るく輝く Lyman- $\alpha$  emitter (LAE) であるが、その構造も形成過程もまだよくわかっていない。Lyman- $\alpha$  光子の輻射輸送計算のコストが大きく、詳細な数値シミュレーションが実施されていないからである。ブラックホールに関しては、歪んだ時空における電磁流体力学と輻射輸送を合わせて解く、一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションが必要であるが、膨大な計算量が障害となり、精緻な計算は実現されていない。そこで本プロジェクトでは、輻射流体シミュレーションを実施することで天体の形成過程を解明することを目的とする。同時に、数値シミュレーションの高速化についても研究する。

#### 2. 研究成果の内容

##### (1) SEURAT コードを用いた高赤方偏移 Lyman-alpha 輝線銀河の輻射輸送計算

本研究では、SPH 法を用いた輻射流体力学計算と SEURAT コードを用いた Ly $\alpha$  輝線輻射輸送計算を組み合わせ、高赤方偏移宇宙における Ly $\alpha$  輝線銀河 (LAE) の性質を理論的に調べた。特に、LAE に大質量ブラックホールが存在する可能性に注目し、星に加えて AGN からの電離光子によって形成される星間ガスの電離構造を詳細に解くことで、AGN が Ly $\alpha$  表面輝度分布といった銀河の観測特性に及ぼす影響を定量的に評価した。その結果、AGN の放射は星間ガスをより強く電離するため、Ly $\alpha$  光が銀河から脱出することが容易となり、特定の視線方向では星のみを考慮した場合に比べて Ly $\alpha$  表面輝度が増加することがわかった。

##### (2) 重元素の超微細構造線による銀河間ガスの検出可能性

現在の宇宙のバリオンの大半は、希薄で温度が  $10^5 \sim 10^7$  K 程度の銀河間ガスの状態で存在していることが知られている。しかし、観測手段が極めて限られており、現在

のところ X 線で明るく輝く天体と我々の間にある銀河間ガスをその影として検出することしかできていない。本研究では、銀河間ガスの新たな観測手段として銀河間ガスに含まれる重元素(窒素)の超微細構造線を用いることを提案し、宇宙論的構造形成シミュレーションによってこの手法による銀河間ガスの観測可能性を輻射輸送方程式を解くことで調査した。その結果、銀河間ガスのうち銀河群や銀河団の外縁部や宇宙大規模構造のフィラメント中心部に存在する成分についてはこの手法で観測可能であることが分かった。

### (3)ブラックホール降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体力学計算

本研究では、モーメント法に基づく一般相対論的輻射磁気流体力学計算コード、UWABAMI、を用いてカー・ブラックホール周りの超臨界降着円盤を調べた。その結果、単位時間あたりにブラックホールへの落下するガスの質量（質量降着率）は、ブラックホールのスピンパラメータが 1.0 に近いほど小さく、逆に-1.0 に近いほど大きくなる傾向が見られた。ブラックホールスピンのエネルギーの抽出により、スピンパラメータが大きいとジェットのパワーが上がることもわかった。

## 3. 学際共同利用が果たした役割と意義

Lyman  $\alpha$  光子および重元素の輝線の輻射輸送計算によって、LAE のより正確な観測的性質および銀河間ガスの未検出成分を観測する方法が判明した。これにより、観測とシミュレーションの比較を駆使した宇宙における天体形成史の研究が、これまでよりも高いレベルで可能となった。また、高エネルギー天体现象におけるブラックホール・スピンの重要性を示唆できた。

## 4. 今後の展望

今後は、パラメータ範囲を広げてシミュレーションを実施し、観測データと直接比較をすることで高赤方偏移天体の形成・進化過程、高エネルギー天体现象の解明を目指す。効率的な計算の実施のため、引き続きコードの最適化も行う。

## 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（様式 2-1）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			
Oakforest-PACS	○	46,900	
※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。			