

## 宇宙輻射流体シミュレーションによる初期天体形成の研究

### Structure Formation in the Early Universe using Radiation Hydrodynamic Simulations

代表者氏名 梅村雅之

所属 筑波大学計算科学研究センター

#### 1. 研究目的

宇宙晴れ上がり期から宇宙で最初の恒星・銀河が形成されるまでの時代は、宇宙における天体形成を理解するうえで重要な時期であるが、そのほとんどは未だに観測が及ばないこともあり理論的にも観測的にも未解明な点が多い。観測的には、初期宇宙で中性水素の Lyman  $\alpha$  輝線が非常に明るい Lyman  $\alpha$  emitter (LAE) と呼ばれる銀河がすばる望遠鏡の主焦点カメラ数多く観測されており、将来的にもすばる超広視野分光観測 (Prime focus Spectrograph, PFS) をはじめとした次世代観測機器によって、遠方宇宙における LAE の観測的研究は大きく進展すると考えられており、LAE とそれらによる宇宙再電離の理論的モデルの構築が急務である。しかしながら、これらの天体の数値シミュレーションについては計算コストの大きさから電離領域からの再結合放射や Lyman- $\alpha$  光子の輻射輸送の計算が困難で、これまでは詳細な数値シミュレーションが行われてこなかった。本プロジェクトでは、宇宙輻射流体シミュレーションによって、初期宇宙での天体形成及びそれらの数値シミュレーションの高速化について研究することを目的とする。

#### 2. 研究成果の内容

##### (1) SPH 粒子データを用いた Lyman $\alpha$ 輝線輻射輸送計算コード SEURAT の開発

観測から得られる高赤方偏移 LAE の特性を理論的に検証するためには、流体力学計算によって得られた銀河モデルに対して Ly  $\alpha$  輝線の輻射輸送計算を行う必要がある。銀河形成シミュレーションでは、粒子法の一つであり広いダイナミックレンジを取り扱うことができる SPH 法がよく用いられる。その一方で、Ly  $\alpha$  輻射輸送計算コードはこれまで mesh ベースで開発されてきた。このため、従来の手法では輻射輸送計算の際に SPH 計算データの mesh 割り当てが必要であり、流体計算の解像度を損なう可能性があった。そこで本研究では、SPH 粒子を輻射輸送計算グリッドとして直接用いることで、SPH 計算の分解能で輻射輸送計算を行う meshfree の Ly  $\alpha$  輝線輻射輸送計算コード SEURAT (SPH scheme Extended with UV line RAdiative Transfer) を開発した。テスト計算の結果、本コードは一様ガス球からの Ly  $\alpha$  光子脱出スペクトル、dusty slab からの Ly  $\alpha$  光子脱出確率の解析解をよく再現することを示し、meshfree で Ly  $\alpha$  輝線輻射輸送を正しく解けることを確かめた。輻射流体力学計算で得られた高赤方偏移銀河モデルに対して本コードを適用した結果、銀河内のガスの複雑な構造を反映し、Ly  $\alpha$  輝線の表面輝度分布や脱出光子スペクトルといっ

た観測量は、同一の銀河であっても観測する方向によって変わることが分かった。さらに、従来の mesh ベースコードとの比較を行ったところ、mesh 割り当ての有無によってガスの速度構造に違いが生じるため、脱出光子スペクトルの形が変わり得ることを示した。

## (2) 再結合放射を考慮した初代天体形成シミュレーション

本研究では、GPU を用いて高速化した 3 次元輻射流体力学シミュレーションコード ARGOT を用いて、宇宙初期の初代星の形成過程について、これまでの研究ではほとんど取り扱われてこなかった電離領域からの水素の再結合放射がどのように影響するかに着目した研究を行った。一般に初代星形成領域に対して近傍の星などの他の放射源からの電離光子はその初代星形成を抑制すると考えられるが、再結合放射を考慮すると周囲のガスを電離させる一方で、加熱を起こさず、ガスの冷却と紫外線の遮蔽の役割を担う水素分子を増やす効果もある。このように再結合放射が初代星形成を促進・阻害する条件を様々な設定で網羅的に調べることが本研究の目的である。我々のグループが開発した再結合放射の効果を正しく取り入れることが可能なシミュレーションコード ARGOT を用いた計算の結果、再結合放射がある場合は周囲の中性領域を緩やかに電離させ、水素分子の自己遮蔽領域が形成され、再結合放射を考慮しない場合に比べ初代星の形成が促進される傾向があることを示した。

## 3. 学際共同利用として実施した意義

宇宙初期天体形成において、紫外線連続光の輻射輸送による水素ガスの電離ならびに Lyman  $\alpha$  光子の輻射輸送は、キーとなる物理過程であるが、学際共同利用によって、SPH 計算法と無矛盾に Lyman  $\alpha$  光子の輻射輸送を正確に扱うコード開発を行うことができ、物理過程をこれまでの計算よりも正確に扱うことが可能となった。

## 4. 今後の展望

今後は、様々な条件の下で原始銀河形成シミュレーションを行い、Lyman  $\alpha$  光子の輻射輸送を解いて観測と直接比較しうる計算を実施することで、高赤方偏移に LAE 形成過程の解明を目指す。

## 5. 成果発表

学際共同利用報告書（様式 2-3）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
COMA	○	53,400	
Oakforest-PACS			
※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。			