

第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明 Probing the Dark Age: From First Generation Objects to Primordial Galaxies

梅村 雅之 (UMEMURA MASAYUKI)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授



研究の概要

宇宙シミュレータ FIRST を用い、輻射流体力学と高精度N体計算によって、宇宙第一世代天体形成から原始銀河形成に至る宇宙史、特に第一世代天体における星形成過程、原始銀河からの電離紫外線光子の脱出と宇宙再電離、ライマンアルファ輝線天体の宇宙論的モデルの構築、紫外線輻射場内の球状星団形成、原始銀河における巨大ブラックホールの合体成長、について研究の進展があり、今後の研究推進の基盤を形成した。

研究分野：数物系科学（理論天文学）

科研費の分科・細目：天文学・天文学（4201）

キーワード：宇宙物理、第一世代天体、銀河形成、宇宙暗黒時代、並列計算機

1. 研究開始当初の背景

遠方宇宙の観測は、宇宙暗黒時代の終わりである宇宙再電離期に迫ろうとしており、またこれまでの理論的取り組みにより宇宙第一世代天体形成の物理について多くの理解が得られてきている。しかしながら、第一世代天体形成の後、どのような進化を経て原始銀河が誕生し、宇宙が再電離されるに至ったかという宇宙暗黒時代の宇宙史の多くはまだ謎に包まれたままである。

2. 研究の目的

本計画は、特別推進研究（H14-H19）により開発・製作した融合型並列計算機“宇宙シミュレータ FIRST”を用い、大規模輻射流体力学計算によって得られた宇宙第一世代天体に関する新たな成果を基にして、宇宙第一世代天体形成に引き続いて起こる原始銀河形成までの物理過程を明らかにし、いまだ解明されていない宇宙暗黒時代の宇宙史の物理的解明を目指す。

3. 研究の方法

宇宙シミュレータ FIRST を用い、流体計算と輻射輸送計算を結合した輻射流体力学計算によって、宇宙第一世代天体形成に引き続いて起こる原始銀河形成をシミュレーションする。また、FIRST に搭載された重力計算加速装置 Blade-GRAPE の高精度計算機能を利用し、原始銀河における巨大ブラックホールの合体過程を調べる。

4. これまでの成果

これまで、1) 第一世代天体形成と連続的星形成、2) 原始銀河形成と紫外線輻射輸送計算、3) 宇宙論的ライマンアルファ輝線天体モデルの構築、4) 紫外線輻射場内の球状星団形成、5) 原始銀河における巨大ブラックホールの合体成長、で重要な進展があった。

課題 1) では、ダークマター・カスプの重力ポテンシャルが、ビリアル温度を上昇させ、その結果水素分子冷却の熱的不安定を引き起こすことで従来の計算で求められていた質量より2桁近く小質量の天体形成が可能になることを明らかにした。また、引き続く星形成過程を調べるために、初代星からの紫外線輻射を入れた輻射流体シミュレーションを行った。この計算によって、初代星質量が25-40 太陽質量以上では、連続的星形成が可能となり、これ以下では解離光子による星形成阻害が起こることを明らかにした。また、電離波面の伝播によって、ガス雲がはぎ取られると、第二世代の星質量は20 太陽質量近くまで減少することを見出した。

さらに、これまでの粒子法流体力学 (SPH) をベースにした輻射流体力学コードをツリー構造で加速することに成功し、新たな輻射流体コード START を開発した。このコードによって、これまで正確に扱えなかった散乱光子を近似なく扱えるようになった。これにより、今後の研究推進において、原始銀河形成、宇宙再電離問題に大きな進展をもたらすことが期待できる。

課題 2)については、高精度流体計算による原始銀河のシミュレーション結果に対し、ダストの効果を入れた 3次元輻射輸送計算を行い、銀河内の電離構造、電離光子脱出確率を計算した。さらに、この結果と観測により得られている星形成密度を用いて、ライマンアルファ輝線天体やライマンブレイク銀河の宇宙再電離への寄与を見積もった。結果として、ライマンブレイク銀河は $z=3-6$ において主要な電離源であることがわかった。また、現在までに観測されているライマン・アルファ輝線天体やライマンブレイク銀河のみでは $z>6$ において銀河間ガスを電離することが困難であることが分かった。

課題 3)については、宇宙論的計算と化学進化モデルを組み合わせ、ライマン・アルファ輝線天体のモデルを構築した。特に、銀河内の各サブストラクチャーの星形成史・化学進化を独立な事象として扱い、SED の計算を行った。結果として、ライマンアルファ輝線天体には、比較的質量が軽く ($0.1M_{\odot}$ 程度)、銀河進化の極初期の星形成フェーズにある天体と、質量が重く ($10M_{\odot}$) 初期の星形成期を終了した後、ガスが降着して星形成を誘起する 2 種類の天体があることが分かった。また、これら 2 つのタイプで空間相関や予想される色光度を計算した結果、後者は近赤外の波長で観測される天体と空間相関がよく一致する事がわかった。

課題 4) については、背景紫外線の輻射輸送と流体を組み合わせた計算により、ガス雲の落下速度が電離ガスの音速を超えている場合には、ガス雲は収縮を続け、最終的には紫外線に対して光学的に厚くなることにより星団形成が起こることを明らかにした。このようなメカニズムで星団形成が起こった場合、ガスが中心付近まで収縮した後に星が形成されるため、高密度な星団が形成される。さらに、形成された天体と観測される球状星団との直接比較を行うため、上記の過程で形成された天体の力学進化を N 体計算した。シミュレーションの結果、得られたコア半径、表面輝度、速度分散、明るさは観測される球状星団の特徴をよく再現できる事がわかった。

課題 5)については、銀河中心の超巨大ブラックホールの起源を明らかにする一つのステップとして、より小さな銀河の合体によって取り込まれた複数の巨大ブラックホールを想定し、それらがどのように進化するかを、FIRST に搭載された重力計算加速装置 Blade-GRAPE の高精度計算機能を利用し、高精度 N 体計算によってシミュレートした。その結果、星との力学的摩擦によってブラックホール 3 体相互作用の効率が増し、ブラックホールの連続的合体成長により中心に一つの超巨大ブラックホールが形成されることを明らかにした。

5. 今後の計画

課題 1)については、広い領域にわたって第一世代天体における星形成の計算を行うとともに、その結果を基に、高赤方偏移ガンマ線バーストの発生率についての解析を行う。課題 2)については、START を用い、紫外線輻射場内の銀河形成について輻射流体力学計算を行う。課題 3)については、銀河の化学進化を取り入れた流体計算を行い、課題 2)と関連付ける。その結果を用い、高赤方偏移銀河が宇宙再電離に果たす役割を解析する。課題 4)については、宇宙論的初期条件をベースにした 3次元輻射流体力学計算を行い、より現実的な星団形成シミュレーションを行う。課題 5)は、様々な銀河質量、赤方偏移でブラックホールと星の重力多体系の高精度シミュレーションを行い、ブラックホール合体がどのように進行するかを解析する。この研究は、原始銀河形成の研究と融合させることで、銀河と超巨大ブラックホールの共進化の研究に展開する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- 1) Tanikawa,A., Umemura,M., Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, ApJ, 728, L31-L35 (2011)
- 2) Hasegawa,K., Umemura,M., START: Smoothed particle hydrodynamics with tree-based accelerated radiative transfer, MNRAS, 407, 2632-2644 (2010)
- 3) Shimizu,I., Umemura,M., Two types of Lyman-alpha emitters envisaged from hierarchical galaxy formation, MNRAS,, 406, 913-921 (2010)
- 4) Yajima,H., et al., The escape of ionizing photons from supernova-dominated primordial galaxies, MNRAS, 398, 715-721 (2009)
- 5) Susa,H., Umemura,M., Hasegawa,K., Formation Criteria and the Mass of Secondary Population III Stars, ApJ, 702, 480-488 (2009)
- 6) Hasegawa,K., Umemura,M., Susa,H., Radiative regulation of Population III star formation, MNRAS, 395, 1280-1286 (2009)
- 7) Hasegawa,K., Umemura,M., Kitayama, T., Formation of globular clusters induced by external ultraviolet radiation, MNRAS, 397, 1338-1347 (2009)

ホームページ等

<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/PoM/pom.html>