

次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム2007

融合型並列計算機 FIRST による宇宙第一世代星形成の高分解能シミュレーション

諏訪多聞, 梅村雅之, 佐藤大介, 須佐元

所属名, 筑波大学 計算科学研究センター

メールアドレス, tamon@ccs.tsukuba.ac.jp

概要: 宇宙で最初に誕生した星の質量を調べるため、我々は高解像度の宇宙論的流体/N体計算を行った。重力計算には Particle-Particle-Particle-Mesh (P³M) 法を用い、その PP 部分については重力計算専用ボード GRAPE を使った。流体成分については Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法によって計算した。シミュレーションは筑波大学で開発した宇宙計算専用 PC クラスタ FIRST 上で 64 並列ジョブとして実行し、バリオン成分の質量解像度として 0.3 太陽質量を計算領域の全域において実現した。これにより、初代星の質量を決定する上で重要な役割を果たすと考えられる小スケールの質量揺らぎを分解する事が可能になっている。我々は実際に計算領域中のもっとも高密度な分子雲が非対称な構造を形成し、最終的には複数の分子雲へと分裂する事を発見した。

1 はじめに

宇宙で最初に形成される星について、Abel, Bryan, & Norman (2002) や Yoshida et al. (2006) の計算においては 100Mo 以上の大質量星が形成されることが示唆されている。一方で Nakamura & Umemura (2001) によれば第一世代星として比較的小質量の星が形成される可能性も示されており、その初期質量分布がどのようなものであるかはいまだ明らかではない。

第一世代星の質量は、その周囲の星間空間ガスを電離する紫外光の量や、超新星爆発を起こしたときに撒き散らされる重元素の量と密接に関係するため、その質量分布がどのようなになるかは、その後の銀河形成などに非常に大きくかかわる重要な問題である。

そこで我々は高解像度の宇宙論的 N 体/流体シミュレーションを用いて、初代星の生まれる状況において星の種となる分子雲が単一の塊として収縮するのか、さらに小さな細片に分裂しうのかを調べた。第一世代星形成において母天体となる分子雲が分裂を起こすかどうかには小スケールでの密度揺らぎが重要な役割を果たすと考えられる事から、バリオンの質量解像度にして約 0.3 太陽質量の初期揺らぎを計算領域全体に実現した。

2 手法

FIRST クラスタ

本研究の計算には筑波大学計算科学研究センターにおいて開発した宇宙計算専用融合型並列計算機 FIRST を用いた。FIRST は 256 台構成の PC クラスタシステムであり、各計算ノードが重力計算専用ボード GRAPE を搭載している点に特徴がある。このため宇宙論的なシミュレーションにおいて主たる部分を占める重力計算を大きく加速することができ、今回行ったような天体形成の大規模並列計算に特に適している。

重力・流体計算

宇宙論的な天体形成シミュレーションでは重力と流体計算が主たる部分を占める。我々は粒子間の重力相互作用を効率的に計算する手法として、Particle-Particle-Particle-Mesh (P³M) 法を用いた。これは粒子間距離が遠距離の時はメッシュ上の密度を用いて高速に、近距離の時は直接相互作用を計算する事で精度よく解く手法である。近距離力を計算する際に GRAPE を使うことで計算速度を向上させている。流体計算の手法としては流体粒子法の一つである Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いた。これは流体の密度などの物理量を、広がりを持った流体粒子の重ねあわせとして表現する手法である。

流体粒子に対しては輻射冷却・加熱過程と水素分子形成過程を合わせて計算した。これにより、重力的に束縛されたガスがエネルギーを放射の形で失いながら収縮するという星形成に必要な過程が扱える。

計算領域として一辺 100kpc の領域を用意し、その中に重力相互作用のみを行うダークマター粒子と通常の物質であるガス粒子をそれぞれ約 2000 万個ずつつぎこんだ。粒子の位置・速度の初期条件は赤方偏移 15 (宇宙年齢約 2.8 億年)の宇宙における密度揺らぎを解析的なモデルを用いて生成した。

3 結果

計算の結果最も高密度になった領域を図 1 に示す。上下方向に伸びた形をしており、球対称からずれた構造を持ちながら収縮している事が確認できる。このようなフィラメント状の構造を形成する事は密度ピークにおいて重力不安定が成長し、分裂を起こすための必要条件といえる。

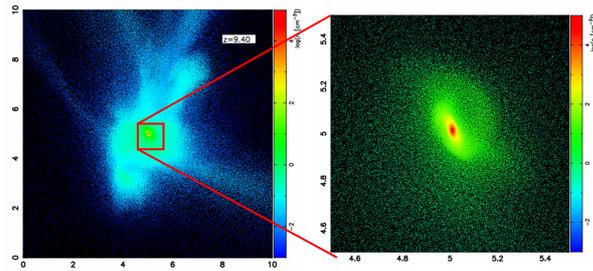


図 1 : 赤方偏移 9.4 (宇宙年齢約 5.4 億年)における密度ピーク。計算領域の中で最も密度の高い領域を 10kpc 立方(左)と 1kpc 立方(右) だけ抜き出してプロットした。色はガス密度に対応する。

さらに計算を進め、赤方偏移 9.3 の時期における密度ピークのプロットを図 2 に示す。分子雲の中心部が四つの細片に分裂した事が確認できる。

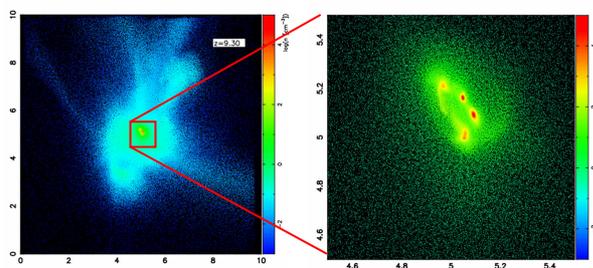


図 2 : 赤方偏移 9.3 (図 1 の時点から約 800 万年後)における密度ピーク。プロットした領域の大きさは図 1 と同じ。

宇宙論的な初期条件から始めた現実的な状況

において、第一世代星の母天体となる分子雲が実際に分裂するというを示した計算はこれが初めてのものである。この計算において分裂を確認できた要因としては、計算領域の全体にわたって高解像度を実現できた事が考えられる。例えば O'Shea & Norman (2007) は第一世代星の形成では常に孤立した大質量の星が出来るという結果を示しているが、彼らを始めとして先行する研究では低い解像度で全体を計算した後、星形成を起こすと考えられる高密度領域の解像度を上げて解く手法が採用されている。このような手法のもとでは小スケールの揺らぎが計算の初期には含まれないため、重力不安定が起こりにくかった可能性がある。

この計算の結果できた分裂片は 100 から 200 太陽質量であり、これらがさらに分裂して小質量星を形成するのか、それともそのまま数十から 100 太陽質量という大質量星になるのかについてはまだわからない。今後さらに計算を進め、第一世代星の質量分布に制限を課すことが重要な課題である。

4 まとめ

宇宙第一世代星の形成過程を調べるために高解像度の宇宙論的シミュレーションを行い、以下の結果を得た。

- 密度ピークの成長は必ずしも球対称な収縮とは限らない事が示された。特に細長い構造を形作る事はその後の分裂の可否に密接に関係する。
- 一つの密度ピークが複数の分裂片に分かれる事を宇宙論的な計算を用いて初めて示した。

参考文献

- [1] Abel, Bryan, & Norman, 「The Formation of the First Stars in the Universe」, Science 295, 93, 2002
- [2] Yoshida, Omukai, Hernquist, & Abel, 「Formation of Primordial Stars in a Λ CDM Universe」, The Astrophysical Journal, 652, 6, 2006
- [3] Nakamura & Umemura, 「On the Initial Mass Function of Population III Stars」, The Astrophysical Journal, 548, 19, 2001
- [4] O'Shea & Norman, 「Population III Star Formation in a Λ CDM Universe I」, The Astrophysical Journal, 654, 66, 2007