

初期宇宙におけるダストの役割

山澤 大輔 (北海道大学 宇宙物理研究室)

利用カテゴリ SX9A

1. 背景

赤方偏移 $z > 5$ における初代銀河形成についての理論的な予言は、現在の天体物理学において大きな課題となっている。初代星や初代銀河は、dark ages と呼ばれる宇宙再結合期 ($z \sim 1100$) から宇宙再電離完了 ($z > 6$) までの期間に形成したと考えられており、WMAP によって明らかになった宇宙論的初期条件と近傍 ($5 > z > 0$) の天体の多様性を結ぶ missing link となっている (Robertson et al. 2010)。また、初代銀河は宇宙再電離に最も寄与した天体として重要である。過去 10 年間に行われた、初代星形成の第一原理計算 (非平衡の化学反応方程式と放射冷却機構と宇宙論的構造形成の 3 次元シミュレーションで整合的に解く) の成功によって、初代星の形成には水素分子の放射冷却により 100 Msun を超える星であることが明らかになった。 (Yoshida et al. 2008; Bromm et al. 2008)。これにたいして、初代銀河については、初代星からの放射フィードバックや超新星 (SNe) による金属汚染の空間分布について現在盛んに調べられているが (Greif et al. 2010; Wise et al. 2010; Bromm and Yoshida 2011)、初代銀河で起こる第 2 世代の星形成過程は、未解明な部分が多い。

現在までの初代銀河の研究では、低金属量・低ダスト量の環境で水素分子形成効率が急激に小さくなることを考慮していないことが大きな問題である。今までの初代銀河形成の 3 次元シミュレーションは、星形成のフィードバックの影響を明らかにすることに焦点をあてているにも関わらず、星形成率は近傍銀河シミュレーションと同様に、全ガス密度にしきい値を仮定することによりモデル化している。しかし、この扱いは明らかに不適當である。近傍銀河の観測から、星形成率は全ガス質量よりも水素分子の質量とよく相関していることが指摘されている。理論的にも、低金属量 ($Z \sim 10^{-2} Z_{\text{sun}}$) の環境では、ダスト量が少ないため、星形成効率が低くなるという指摘がある (Gnedin and Kravtsov 2011)。初代銀河はより低金属量 ($Z < 10^{-2} Z_{\text{sun}}$) の環境であり、銀河の星形成率を正しく評価するためには、ダストにおける水素分子形成率をより正確に評価することが必要なことは明らかである。

2. 研究目的・研究方法

われわれは、初代銀河環境において水素分子形成率を正確に評価するためには、ダストのサイズ分布を考慮することが重要であることを初めて示した。これまでの研究では、ダストの質量の時間発展にのみに焦点があてられ、ダストのサイズは典型的な値を仮定してきたことが以下の理由から問題である。(i) ダスト上の水素分子形成率は、ダストと水素原子の衝突率に支配されており、ダストの全表面積に比例する。(ii) よって、水素分子形成率は、ダスト量だけでなくそのサイズ分布に大きく依存する。(iii) 宇宙初期では ($z > 5$)、多量のダストの存在がクエーサー (QS0)

で確認されているが、そのサイズ分布は近傍のダストのサイズ分布とは異なることが報告されている (Maiolino et al. 2004)。(iv) これは、宇宙年齢が小さいために、寿命の長い小質量星からの漸近巨星分枝星 (AGB) によるダスト生成の寄与が小さく、寿命の短い大質量星の SNe によるダスト生成が支配的であるためである。(v) さらに SNe の衝撃波によって小さなサイズのダストがより効果的に破壊されるので、ダストのサイズ分布は銀河の進化と共に大きく異なる。これまでの研究ではダスト質量で評価し、ダストのサイズ分布の進化も考慮した研究は、今までされてこなかった。

そこで、われわれは、ダストのサイズ分布の進化に注目した銀河形成モデルを構築した。ダストのサイズ分布の時間発展を銀河の進化の枠組みの中で統合的に扱うことにより、水素分子形成率を正確に評価し、初代銀河の星形成効率を明らかにした (Yamasawa et al. 2011)。さらに得られた水素分子形成率に基づいた星形成効率を用いて、初代銀河による宇宙再電離過程への寄与を明らかにし、ダストのサイズ分布の進化の再電離過程への影響を調べた (Yamasawa et al. 2011, in preparation)。

ダストのサイズ分布の時間発展と水素分子形成率を統合的に扱った準解析的モデルを構築し、初代銀河の星形成効率とその再電離過程への影響を調べた。モデルでは、(i) ダストのサイズ分布の進化 (ii) ダスト上と気相反応における水素分子形成 (iii) 水素分子形成率を正確に評価した星形成 (iv) merger tree による DM ハローの合体過程 (v) 初代星形成からと第 2 世代の星形成への初期質量関数の遷移 の 4 つを統合的に扱っている。

3. 研究成果

われわれの研究は、銀河進化とダストのサイズ分布の時間発展を統合的に扱った最初の研究である。ダストの重要性を指摘した研究や、SN によって生成されるダストのサイズ分布に注目した研究はこれまでに多数あったが、ダストのサイズ分布の時間進化に注目した研究やダストのサイズ分布が銀河に与える影響に注目した研究は、今までなされてこなかった。初代銀河では、SNe によるダスト破壊が星形成に大きく影響することを示した。

この研究は、2010年の3月の初代星・初代銀河の研究会と天文学会の口頭発表において高く評価され、2010年4月のIPMUでのB. T. Draineを招いた国際会議で大学院生として唯一の招待講演の機会を与えられた。現在、初代銀河についての論文が *The Astrophysical Journal* において印刷中である。また、2010年6月にフランスで行われる国際研究会に口頭発表として招待されている。

われわれは、ダストの質量だけでなくそのサイズ分布の時間発展が宇宙初期の初代銀河の星形成に大きな影響を与えることを示した。SNe による reverse shock と forward shock によってダストは効果的に破壊され、水素分子形成率はダストの破壊を考慮に入れない場合に比べ大きく抑制される。 $z=10$ でダークマターハローの質量が $10^9 M_{\text{sun}}$ の銀河の場合、銀河の年齢が 0.8 Gyr において、水素分子の割合はダスト破壊を考慮した場合は、考慮しない場合に比べ、オーダーで 2.5 小さくなる。