

銀河形成シミュレーションの超新星フィードバックモデル構築

奥 裕理 (大阪大学)

利用カテゴリ XC-Trial

超新星 (SN) が星形成に必要なガスを銀河外へ吹き飛ばす働きは、重力ポテンシャルが浅い低質量銀河での主要なフィードバック機構であると考えられている。本研究では、宇宙論的銀河形成シミュレーションでの SN フィードバックモデルの構築に向けて、銀河形成シミュレーションと高分解能シミュレーションを行い、巨視的視点と微視的視点の 2 つの視点から SN フィードバックに関する理論研究を行った。

研究 1：高赤方偏移銀河の統計的性質

すばる望遠鏡でのサーベイ観測から、銀河へ降着した物質が星へと変換される効率 $SFR/\dot{M}_h$ とハロー質量 M_h の関係 ($SFR/\dot{M}_h$ - M_h 関係) は赤方偏移 $z=4-7$ の範囲でほぼ一定であることが発見された。これは、物質降着率が銀河の星形成活動を決定づける基本量であることを示唆している (Harikane et al. 2018)。しかし、 $SFR/\dot{M}_h$ - M_h 関係の起源は分かっておらず、理論的検証が求められている。本研究では、流体計算コード GADGET3-*Osaka* (Aoyama et al. 2017; Shimizu et al. 2019) を用いて宇宙論的銀河形成シミュレーションを実行し、 $SFR/\dot{M}_h$ - M_h 関係の起源を調べる。

本研究では、星形成・SN フィードバックのパラメータと分解能を変えた複数回の計算を実行した。その結果、SN フィードバックで与えるエネルギーの総量が同じであっても、複数の SN がほぼ同時に起こった場合のほうが星形成を抑制できること、ガス雲を加熱する熱的フィードバックよりも、ガスを吹き飛ばす力学的フィードバックのほうが星形成の抑制に効果的であることが分かった (図 1)。一方、シミュレーション結果は観測結果と定量的に一致せず、分解能依存性が見られた。本研究では XC50 を使って粒子数 2×512^3 の大規模シミュレーションの実行を試み、赤方偏移 $z=99$ から $z=6$ までの計算を行った。しかし、XC-trial の計算資源では $z=4$ まで計算を完遂することが困難であると判明したため、大学の小規模クラスタを使って粒子数 2×128^3 の計算を行った。本研究の成果は研究会で発表した。

研究 2：SN フィードバックの金属量依存性

研究 1 では、銀河全体での星形成活動の観点から SN フィードバックの働きを調べ、パラメータに制限を与えた。研究 2 では、高分解能シミュレーションを用いて SN フィードバックの働きを微視的素過程から理解し、星間ガスの物理量に対する SN フィードバックが与える影響を調べる。SN フィードバックは放射冷却によるエネルギー損失の影響を受けるため、冷却時間に影響を及ぼす金属量は重要なパラメータである。また、星形成活動により金属量は増加するため、銀河形成に対する SN フィードバックの役割を研究する上でも、金属量依存性は重要である。研究 1 から分かったように、時間的空間的に集中して SN が起こる場合は、効率的に星形成が抑制される。これは現実では、星団中で連続的に重力崩壊型超新星爆発が起こった場合に形成されるスーパーバブルに対応している。本研究では、乱流・複数回 SN・熱伝導を考慮し、SN フィードバックの金属量依存性を調べる。

本研究では、流体計算コード *Athena++* (Stone et al. 2020) を用いて、スーパーバブルの時間進化を計算した (図 2)。その結果、低金属量環境下では太陽金属量環境下と比べて、

SN フィードバックが与える運動量が2 倍になることが分かった (図 3)。また、パラメータサーベイの結果をフィッティングして、星間ガスの物理量に対して SN フィードバックの運動量を与える式を得た。この式を使うことで、金属量依存性・乱流・複数回の SN・熱伝導を考慮した、より現実的な SN フィードバックモデルを構築することができる。本研究の成果は研究会と学会で発表した。また、投稿論文を準備中である。

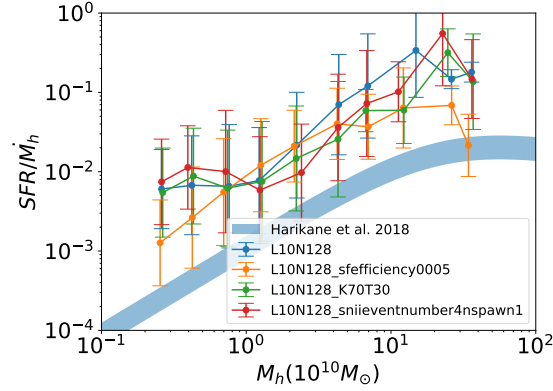


図 1: $z = 4$ での $SFR/\dot{M}_h$ – M_h 関係。青線はパラメータに標準値 (表 1) を採用した場合、橙線は星形成効率を 0.005 にした場合、緑線は力学的フィードバックの比率を 70%、熱的フィードバックの比率を 30%にした場合、赤線はフィードバックイベント数を 4、ガス粒子から生まれる星粒子の数を 1 にした場合の結果。青領域は観測値 (Harikane et al. 2018) が収まる領域。

表 1: 研究 1 で実行したシミュレーションでのパラメータの標準値

パラメータ	標準値
星形成効率	0.05
力学的フィードバックの比率	30%
熱的フィードバックの比率	70%
星粒子 1 個あたりフィードバックイベント数	8
ガス粒子から生まれる星粒子の数	2

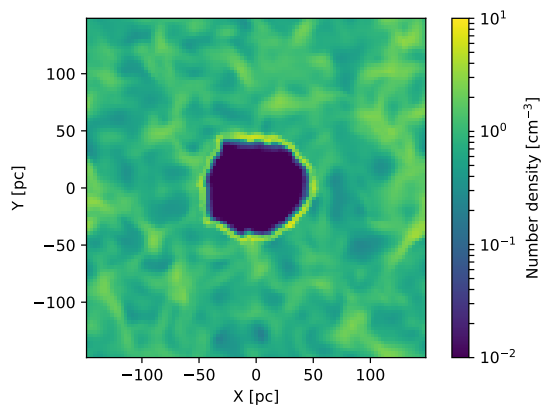


図 2: 星間ガスの個数密度 $n = 1\text{cm}^{-3}$ 、金属量 $Z = Z_{\odot}$ のときの、時間 $t = 1.53\text{Myr}$ での密度のスライスプロット。

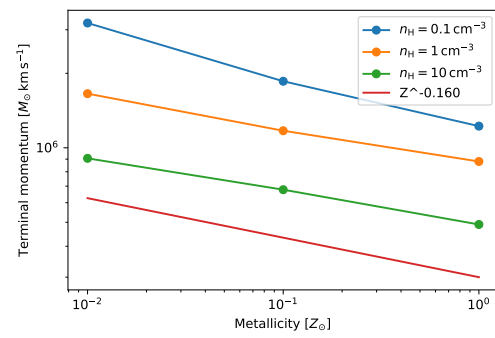


図 3: SN フィードバックによって星間ガスに与えられる運動量の金属量依存性。青線、橙線、緑線はそれぞれ星間ガスの個数密度が $n_{\text{H}} = 0.1, 1, 10\text{ cm}^{-3}$ の場合の結果。赤線の傾きは青線、橙線、緑線の傾きの平均値。