

乱流分子雲におけるフィードバックのシミュレーション

島 和宏 (北海道大学大学院 宇宙物理研究室)

Abstract

乱流分子雲での星形成に対する Photoionizing Radiation と Supernova フィードバックの役割を Enzo コードを用いた 3次元 AMR シミュレーションによって研究している。乱流を加えた Bonnor-Ebert (BE) 球を初期条件としたモデルと、銀河シミュレーションから切り取られた分子雲を初期条件としたより現実的なモデルとを用意し、フィードバックによる Star Formation Efficiency (SFE) の変化をそれぞれ調べた。BE 球では Radiation によって SFE が上昇し、Supernova によっても SFE が上昇する結果が得られた。その後両者において SFE の上昇は徐々に緩やかになっていき、1 free-fall time 程度後の時間では SFE が抑えられる。現実的なモデルではフィードバックを加える前からガスのフラグメントが十分に進んでおり、そのような環境では SFE が常に抑制される結果となった。

1 Introduction

観測されている分子雲での星形成率は数% (e.g. Lada & Lada 2003) と非常に低いことが知られている。星が分子雲コアの重力収縮によって形成される、つまり重力的に束縛されているにもかかわらず星形成率が低いということは、何らかの星形成を止めてガスを散逸させるプロセスがあると考えられる。そのプロセスとしては星からのフィードバックが有力である。フィードバックは Radiation pressure、Protostellar Outflows、Main Sequence Winds、Photoionization、Supernova 等の様々なプロセスが混在する非常に複雑なものであるため、本研究では巨大分子雲 (GMC) のスケールで重要だと思われる Photoionization と Supernova に限って研究を行う。また、上記ではフィードバックが星形成を阻害する負の効果に注目したが、その逆の正の効果が全くないと決まったわけではなく Photoionization によって形成された HII 領域の膨張が星形成を引き起こす研究もなされている (e.g. Whitworth et al. 1994)。フィードバックの役割ははまだまだ解明されておらず、乱流分子雲での Photoionizing Radiation と Supernova の役割を 3次元シミュレーションによって明らかにすることを目的とする。

2 Numerical Methods

シミュレーションには AMR コードの Enzo を使用する。分子雲に対して self-gravity、chemistry、Radiative Cooling を考慮し、密度が 10^{-4} [atoms/cc] を越えたセルに対してそのセルの 0.5 倍の質量を持った StarParticle を形成し、Photoionization は各々の StarParticle の Radiation について ray-tracing アルゴリズムを使用して輻射輸送方程式を解くことで計算される。また、質量が 100 [Msun] を越えた StarParticle はその寿命 (4 [Myr]) の最後に Supernova として Thermal Energy を放出する。これらは Wise & Cen (2009) の Radiative star clusters のコードを元に行っている。

本研究では初期条件として 2つの分子雲を用いた。

• BE-cloud

静水圧平衡状態にある半径 36 [pc]、質量 10^5 [Msun] の Bonnor-Ebert (BE) 球に対して温度を 10 [K] とし、Larson's Law を仮定した乱流をビリアル平衡となるように導入する。乱流の Mach number は 11、k-range は $6 \leq k \leq 19$ である。BoxSize は 200 [pc]、RootGrid は 128^3 、MaximumRefinementLevel は 5 (MinimumCellSize=0.05 [pc]) としている。

• Extracted-cloud

Benincasa et al. (2013) による銀河ディスクシミュ

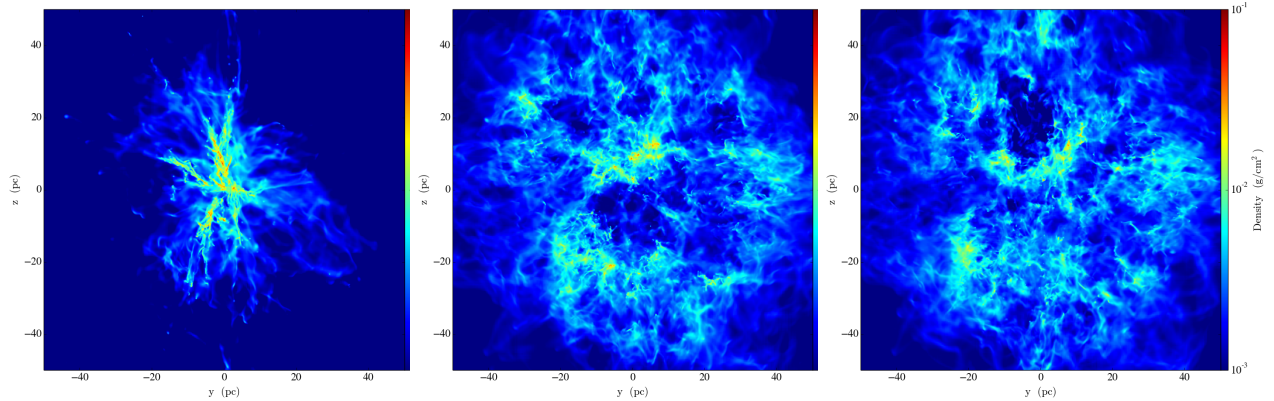


図 1: BE-cloud run F(左) run R(中) run S(右) の 12[Myr] での柱密度

レーションから GMC を切り出したカタログが公開されており、そのうちの一つをより現実的な初期条件を持った分子雲として採用した。ただし、切り出されたデータはそのままでは解像度が悪いため AMR を 1 dynamical time(6[Myr]) 発展させた結果を初期条件とする。BoxSizeSize は 500[pc]、RootGrid は 64^3 、MaximumRefinementLevel は 6(MinimumCellSize=0.1[pc]) としている。

これらの分子雲に対して

run F StarFormation のみ

run R Radiation フィードバック

run S Radiation + Supernova フィードバック

の計算を行った。

3 Results

3.1 BE-cloud

図 1 は 1 free-fall time(12[Myr]) 後の柱密度を表している。run F では乱流が散逸してしまうためガスは自己重力によって中心に落ち込んでいく。一方 run R では電離で加熱されたガスによって全体が膨張している。run S ではシェルのような構造も見えている。図 2 は SFE の時間進化を表したグラフである。Radiation(緑色)と Supernova(赤色)の両方において SFE が一旦上昇してから、StarFormation のみ(青色)に比べてその値が抑えられている。

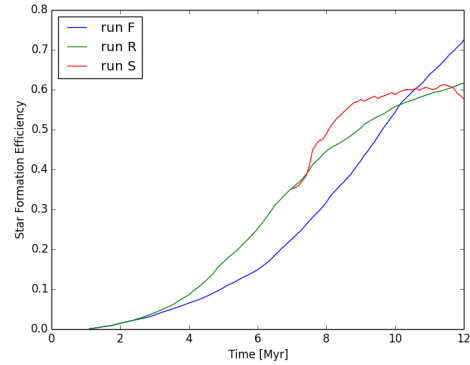


図 2: BE-cloud SFE の時間進化

3.2 Extracted-cloud

図 3 に run F と run R の柱密度をのせている。run S については計算コードがうまく動かず結果が得られていない。run F ではガスのフラグメントがよく見えるが、run R ではガスがより拡散しているのが確認できる。だが、BE-cloud とは違い赤色で見える高密度領域がフィードバックで壊されようとはなく存在し続けている。非常に密度が高いために escape velocity が高く、HII 領域の膨張速度程度では壊されないと考えられる。それでも SFE の時間進化を表した図 4 では run R の SFE(緑色)が run F(青色)よりも下がっていることから、Radiation フィードバックが SFE を常に抑えていることがわかる。

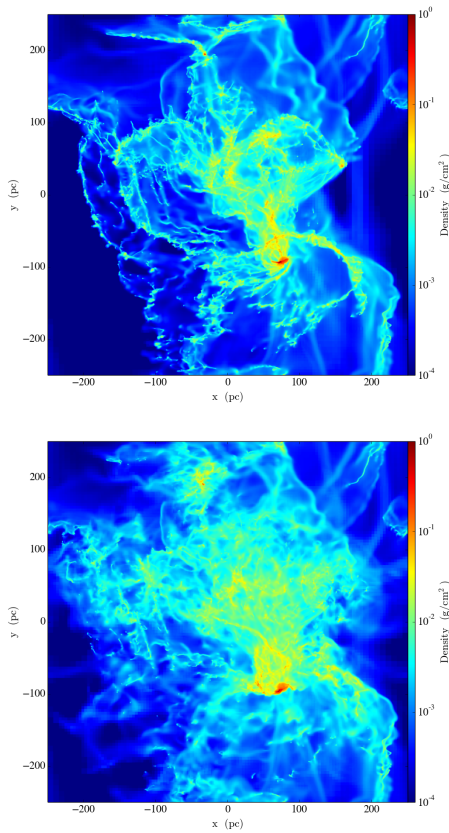


図 3: Extracted-cloud run F(上) run R(下) の 12[Myr] での柱密度

4 Discussion

・BE-cloud において SFE が上昇する理由

理由として考えられるのは「StarParticle がより多く形成されている」もしくは「各 StarParticle がより重くなっている」である。前者ならばフィードバックが星形成のトリガーになっていることを意味するが、run F と run R で StarParticle の個数は SFE が上昇している時期においてほぼ変化がなかった。よって、各々の StarParticle の質量がフィードバックによって増加したと考えられる。そのメカニズムは、フィードバックによってガスのフラグメントが阻害され各 StarParticle での Accretion mass が増加したからだと考えている。

・フィードバックは SFE を上げるのか下げるのか?

BE-cloud においてフィードバックの影響は途中で正から負に転じている。Extracted-cloud ではフィード

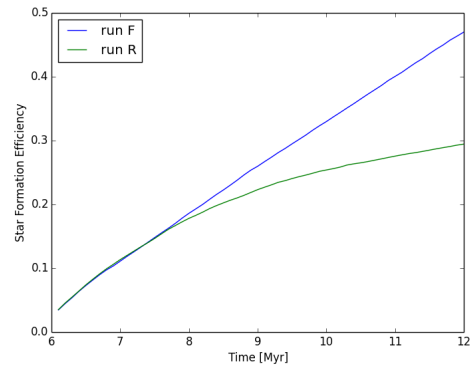


図 4: Extracted-cloud SFE の時間進化

バックの影響は常に負となっている。この両者の違いもガスのフラグメントによって説明できると考えている。BE-cloud は初期条件として球対象な非常に滑らかな密度分布を持っており、乱流によってフラグメントが進む。ガスのフラグメントが進んでいる間はフィードバックの影響が正として現れ、フラグメントが十分に進むとその後はフィードバックの影響が負としてしか現れない。Extracted-cloud では AMR を発達させる必要があったため、フィードバックを加えた計算を始めたときには既に十分フラグメントが進んでおり SFE が常に抑えられる結果になった。

5 Conclusion

BE-cloud ではフィードバックによりフラグメントが阻害された結果 Accretion mass が増加し、質量の大きい StarParticle が形成される。フラグメントが十分に進むと、フィードバックがそのフラグメントされた高密度領域を壊すことで SFE が下がると考えられる。Extracted-cloud では最初からフラグメントが進んでいたため、フィードバックの効果が常に負になったと考えられる。

Reference

- Dale J.E. et al. 2012, MNRAS, 424, 377
- Wise J.H. et al. 2012, MNRAS, 427, 311
- Benincasa et al. 2013, Apj, 776, 23