

低金属度衝撃波圧縮ガス層の分裂

宮澤 航平 (東北大学大学院 天体理論グループ M1)

Abstract

初代銀河における星の質量関数はまだ不明な点が多い。銀河に流入するガスは衝撃波を伴いハローに落ち込むと考えられており、本研究では衝撃波により圧縮・加熱されたガスからの星形成を考えた。初代銀河で形成される典型的な星の質量を見積もるために、ガスの熱進化を追うことで母体となる fragment の質量スケールを求めた。一般に初代星はおよそ $100M_{\odot}$ の大質量星であると考えられているが、重水素分子による冷却やダストによる水素分子生成が有効になるに従い、 $10M_{\odot}$ 程度の小質量星ができることを示唆する結果が得られた。これは初代銀河で誕生した低金属度星が直接観測できる可能性があることを示す結果である。

1 Introduction

初代星 (種族 III) の典型的な質量は $10M_{\odot}$ から $100M_{\odot}$ と考えられている一方で太陽近傍の星 (種族 I) や低金属度星 (種族 II) は太陽質量程度で小質量である。このことから宇宙の星形成史の中で、星の典型的な質量が大質量から小質量へと遷移したと考えられている。(Pop III / II Transition) 本研究の目的はこの遷移がどのように起こるのかを明らかにすることである。先行研究で球対称に自由落下するガスを初期条件とした質量スケールの見積りはされている一方で、銀河形成期に衝撃波を経験したガスを初期条件とした fragment の質量スケールについて系統的な議論はあまりなされていない。この問題を考える上でハローに流入するガス密度は正確にわかっていないので、今回は $n_{\text{pre}} = 0.01\text{cm}^{-3}$ から 10^5cm^{-3} まで幅広い初期密度に対し fragment の質量スケールを計算した。

2 Methods

定常的な一次元の流れを仮定し、衝撃波通過後の領域 (Post-shock region) について One-zone 計算した。衝撃波面の前後はランキン-ユゴニオの関係式で結ばれる。

$$x = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{(\gamma + 1)M_1^2}{(\gamma - 1)M_1^2 + 2} \quad (1)$$

$$y = \frac{p_2}{p_1} = \frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1} \quad (2)$$

ここで波面前方の物理量を p_1, ρ_1, v_1 、後方の物理量を p_2, ρ_2, v_2 とし、 M_1 は前方でのマッハ数である。定常流の仮定からショック通過後のガスは質量と運動量を保存しながら進化する。温度進化は (5) のエネルギー方程式を解く。 e は単位質量あたりの熱エネルギーであり Λ_{net} は単位体積あたりの正味の冷却率である。これには輝線とダスト放射の冷却、及び化学反応の反応熱を考慮した。輝線に関しては HI の Ly α と C, O の微細構造線、 H_2 , HD, CO, OH, H_2O の分子輝線を考え、光学的に薄いことを仮定した。

$$\rho v = \rho_2 v_2 \quad (3)$$

$$\rho v^2 + p = \rho_2 v_2^2 + p_2 \quad (4)$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} - \frac{\Lambda_{\text{net}}}{\rho} \quad (5)$$

ガスの分裂条件は Post-shock region の中心の最も冷えた領域が最も早く重力的に不安定になると仮定し、ガスがジーンズ条件: $t_{\text{ff}} < t_{\text{cross}}$ を満たしたらジーンズスケールに分裂するとした。ここで $t_{\text{ff}} = \sqrt{3\pi/32G\rho}$, $t_{\text{cross}} = L_{\text{layer}}/C_s$ であり L_{layer} は中心ガス層の厚さ、 C_s は音速である。初期の化学組成比は (Nakauchi et al. 2014) より $y_{\text{ini}}(\text{H}) = 0.99$, $y_{\text{ini}}(\text{H}^+) = 0.01$, $y_{\text{ini}}(\text{D}) = 3.96 \times 10^{-5}$, $y_{\text{ini}}(\text{D}^+) = 4.0 \times 10^{-7}$, $y_{\text{ini}}(e^-) = y_{\text{ini}}(\text{H}^+) + y_{\text{ini}}(\text{D}^+) + y_{\text{ini}}(\text{C}^+)$ とした。ここで $y(i) \equiv n_i/n_{\text{H}}$ である。重元素は C, O 及びその化学反応を考え、C, O の個数比は Pollack dust model (Pollack et al. 1994) より与えた。

3 Results

初代銀河は $z \sim 10$ に形成されたと考えられていることから、衝撃波の速度を初代銀河のハローの質量 $M_{\text{halo}} = 10^8 M_{\odot}$ に対応するドリアル速度である $v_s = 20 \text{ km/s}$ とした。今回は $Z = 0, 10^{-4} Z_{\odot}, 10^{-2} Z_{\odot}$ の 3 つの金属量に対し分裂条件を満たすまで計算を行った。以下に $Z = 0, 10^{-2} Z_{\odot}$ の場合の熱進化を示す。今回の設定では $Z = 10^{-4} Z_{\odot}$ の場合の進化は $Z = 0$ の場合と比較し有意な変化が見られなかったため図は省略する。すべての場合で 7000 K から 8000 K までは HI の Ly α 輝線によりすばやく冷却されるが、以降の熱進化は密度や金属量によって異なる。各図では流入するガス密度が $n_{\text{pre}} = 0.1, 1.0, 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5 \text{ cm}^{-3}$ の場合を示した。背景紫外線や宇宙線の効果は計算に含めていない。

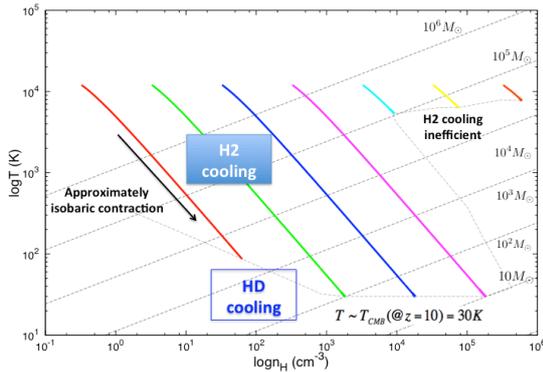


図 1: $Z = 0$ の熱進化

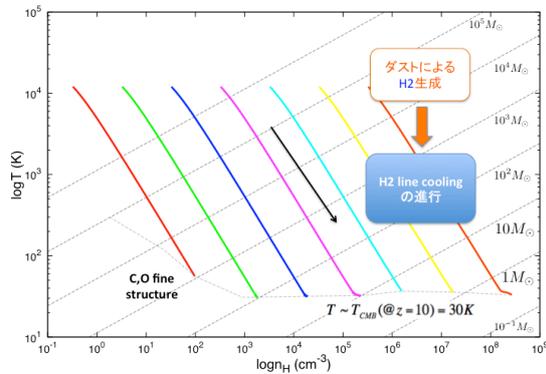
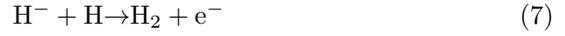


図 2: $Z = 10^{-2} Z_{\odot}$ の熱進化

$Z = 0$ のダストのない環境下では H_2 は電子を触媒とした H^- チャンネルにより生成される。



さらに $\lesssim 150 \text{ K}$ の低温では H_2 から HD が有効に生成されるようになり、およそ 100 K 以下では HD 冷却が H_2 冷却を上回り有効な coolant となる。



中心のガス層は流入するガスのラム圧により支えられるため、冷却に伴い近似的に定圧のまま圧縮される。図 1 より初期密度が低・中密度の場合では $y(\text{H}_2) \sim 10^{-3}$ まで十分に H_2 が生成され、振動・回転遷移輝線によりおよそ 100 K まで冷却が進んだ。密度が高いほうが冷却率が高く cooling time が短いのですばやく H_2 冷却が進行し、ガス層が重力不安定になるほど十分厚くなる前に HD 冷却が進んだ。最終的に分裂条件を満たすまでに約 30 K まで冷却された。これは $z = 10$ の CMB 温度に対応している。 $n_{\text{pre}} \gtrsim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ の高密度の場合ではおよそ 8000 K まで冷却された後、 H_2 の衝突解離が進むためこれ以上冷えることができない。この境となる密度は H_2 の臨界密度に対応している。

$Z = 10^{-2} Z_{\odot}$ の場合では初期密度が低密度の場合において C, O の微細構造線の冷却が加わるために $Z = 0$ の場合よりもわずかに冷却が進行した。しかしこれにより fragment の質量スケールが大きく変化することはないようである。高密度の場合ではダスト表面での H_2 生成が有効に進むため、 $Z = 0$ の場合と異なり高密度領域においても H_2 の輝線による冷却が進行し最終的に約 30 K まで冷却が進んだ。

4 Conclusion

$Z = 0$ の場合の熱進化については先行研究と同様の結果が得られた。流入するガスが $\lesssim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ の低密度の場合で HD 冷却が十分に効く場合には $10 M_{\odot}$ から $100 M_{\odot}$ の fragment が生じ、低質量星が生まれる可能性がある。(Nakauchi et al. 2014) しかし今回の計算では比較的高い初期電離度を用いた。式 (6),(7)

より H^- チャンネルでの H_2 生成効率は電離度に依存し、今回は H_2 が効率よく生成され冷却効率が高いために fragment 質量が小さく見積もられた可能性がある。より低い電離度の場合についても分子冷却の効果を調べ、fragment の質量スケールを検証する必要がある。一方で高密度の場合にはおよそ $10^5 M_\odot$ の大質量 fragment が生じ、これが初期宇宙における超大質量ブラックホールの種になることが示唆される。(Inayoshi, Omukai. 2012)

先行研究によるとガスが強い背景紫外線に晒された場合、分子の破壊が進行するために分子冷却が効かなくなることから低質量 fragment が生じなくなる。しかし今回の研究からダストの存在は低質量 fragment の生成に大きく寄与することが期待される。今後背景紫外線が存在する環境下で低質量 fragment が生成されうるかを検証するとともに、閾値となる金属量: critical metallicity (Z_{crit}) を見積もることでどれくらい星間ガスに重元素が蓄積されれば低質量星が生成されるのかを調べる必要がある。また重元素の微細構造線の冷却により、ダストのない環境で低質量星が形成されうるかも検証したい。

Reference

- Nakauchi D. and Inayoshi K. and Omukai K. 2014. MNRAS, 422, 2667N
- Inayoshi K. and Omukai K. 2012. MNRAS, 422, 2539
- Safranek-Shrader C. and Bromm V. and Milosavljević M. 2010. ApJ, 723, 1568