

ダスト成長を考慮した低金属量の星形成ガス雲の進化

千秋 元 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

ダストは低金属量のガス中において、低質量 ($\lesssim M_{\odot}$; M_{\odot} は太陽質量) の星形成に対し重要な役割を担うと考えられている。本研究では、低金属量の星形成ガス雲において、ダスト成長による重力収縮のガス雲の熱進化への影響を調べた。

1 Introduction

天文学では、炭素や酸素など、ヘリウムより重い元素を「金属」と呼ぶ。現在のように、金属をある程度含むガス雲は放射冷却率が大きく、より温度が小さくなる。一方、宇宙で最初に誕生した星 (初代星) は金属を含まないガス中で形成されたと考えられている。そのようなガス雲は、主に水素分子による冷却を受けるが、その冷却率は比較的小さく、ガス雲は高温に保たれる。すると、ジーンズ質量が温度に比例して大きくなるため、結果的に大質量の星 (太陽質量の数十-数百倍) が形成される傾向にあったと考えられている (e.g. Bromm et al. 2001; Abel et al. 2002)。一方、現在の星は典型的に小さい ($< M_{\odot}$) ことが分かっているが、この星質量の違いは金属量が影響している可能性がある。では、どのような金属量で典型的な星質量の遷移が起きるのか。

この問いはこれまで調べられてきている。Frebel et al. (2005) によると、金属の遷移線冷却が十分ガスの冷却に寄与するためには、金属量が太陽金属量の $10^{-3.5}$ 倍以上必要であることが分かっている。しかし、近年、銀河ハロー中に発見された星 (SDSS J102915+172927) が問題となっている。その星は非常に低金属量 ($\leq 4.5 \times 10^{-5} Z_{\odot}$) ながら質量は小さい ($\leq 0.8 M_{\odot}$) ことが分かった (Caffau et al. 2011)。つまり、金属の遷移線冷却だけでは SDSS J102915+172927 の形成を説明することができないことになる。その問題を解決する糸口となるのが、金属が凝縮して形成されるダスト (固体微粒子) の存在である。ダストは冷却率が非常に大きく、より金属量が小さい環境でも十分ガスの冷却に寄与できる可能性がある (Schneider et al. 2003; Omukai et al.

2005)。

だが、今考えている初期宇宙において、金属がどれだけダストに凝縮しているかは自明ではない (De Cia et al. 2013)。従って、ダストがどれだけガス雲の冷却に寄与するかを調べるためには、初期宇宙でのダスト量をより正確に見積もる必要がある。初期宇宙において、ダストは主に超新星によって供給されるが (Dwek et al. 2007; Todini & Ferrara 2001; Nozawa et al. 2003; Schneider et al. 2003)、超新星ではダストを破壊する作用も働く (Bianchi & Schneider 2007; Nozawa et al. 2007)。超新星によるダスト破壊の影響を大きく受け、ダスト量が小さくなったガス雲中では、ガスの冷却が低質量の原始星形成には不十分である可能性がある。Schneider et al. (2012) では、SDSS J102915+172927 の金属量 (太陽金属量の 4.5×10^{-5} 倍以下) に対して、ダスト量が小さいモデルではガスが十分冷却されないことが示唆されていた。しかし彼女らは、ガス雲の重力収縮中でダスト量が一定であると仮定していた。それに対して、Nozawa et al. (2012) は、ガスの重力収縮に伴って密度が上昇すると、ダストがガス中の金属原子を取り込むこと (ダスト成長) で、ダスト量が上昇する可能性があることを示唆した。

最終的な目標は、小質量の星が形成される最小の金属量が、ダスト成長によってどのように変わるかを調べることである。本研究では、その前哨戦として、今問題となっている低金属量星 SDSS J102915+172927 の金属量において、ダスト成長がどれだけ効果的かを調べた。ダスト成長によるガスのダスト冷却率への影響を調べるため、ダスト成長とガス雲の温度進化を同時に計算した。

表 1: Grain Species Considered in the Calculations

| Grains | Key Species | Chemical Reactions | $a_{i,0}$ (Å) |
|--------------------------------------|----------------------|---|---------------|
| Mg ₂ SiO ₄ (s) | Mg(g) | 2Mg(g) + SiO(g) + 3H ₂ O(g) → Mg ₂ SiO ₄ (s) + 3H ₂ (g) | 2.055 |
| | SiO(g) | 2Mg(g) + SiO(g) + 3H ₂ O(g) → Mg ₂ SiO ₄ (s) + 3H ₂ (g) | 2.589 |
| MgSiO ₃ (s) | Mg(g), SiO(g) | Mg(g) + SiO(g) + 2H ₂ O(g) → MgSiO ₃ (s) + 2H ₂ (g) | 2.319 |
| Fe ₃ O ₄ (s) | Fe(g) | 3Fe(g) + 4H ₂ O(g) → Fe ₃ O ₄ (s) + 4H ₂ (g) | 1.805 |
| C(s) | C(g) | C(g) → C(s) | 1.281 |
| SiO ₂ (s) | SiO ₂ (g) | SiO ₂ (g) → SiO ₂ (s) | 2.080 |
| Al ₂ O ₃ (s) | Al(g) | 2Al(g) + 3H ₂ O(g) → Al ₂ O ₃ (s) + 3H ₂ (g) | 1.718 |

2 Model

2.1 Collapse model

小質量の星が形成される条件として、ここではガス雲の重力収縮中のダスト冷却に着目する。ガス雲で急激な放射冷却が起こると、ガスはジーンズ質量程度のガス片に分裂し、それらが星の種となる。ジーンズ質量はガスの温度 T と密度 ρ に対し、 $M_{\text{Jeans}} \propto T^{3/2} \rho^{-1/2}$ の依存性を持つことから、密度が高く、かつ温度が低いほどジーンズ質量は小さくなる。ちょうど、ダスト冷却は一般的にガスの密度が高くなると効果的になることから、ダスト冷却によって高密度、低温の環境が実現されることとなる。そこで本研究では、小質量の星が形成される必要条件として、ダスト冷却が十分に効くかどうかを判定することとする。

その判定をするために、本研究では、重力収縮でガス雲の中心の 1 点の密度が上昇していく過程で、温度がどのように進化するかを追う、「ワンゾーン計算」を行った (詳細は Chiaki et al. 2013a, を参照)。重力収縮中に、ガスの温度は加熱や冷却で変化する。ガスの加熱は主に、収縮による断熱加熱と水素分子が形成されるときに加熱がある。また、冷却は、ダスト冷却を始め、H₂、HD、それから OH 分子による冷却が支配的となる。それらの冷却率を正しく見積もるために、本研究では H⁺、e⁻、H、H₂、D⁺、D、HD、C⁺、C、CO、CO₂、O、OH、H₂O、O₂、Si、SiO、そして SiO₂。という 18 種の元素について非平衡の化学反応を計算し、それらの組成を求めている。また、ダストについては、表 1 に示した 6 種類についてダスト成長とダスト冷却率を計算する。

2.2 Grain growth

ダスト成長については、Nozawa et al. (2012) のモデルを用いる。ダストは、金属原子や分子が衝突し、吸着することによって成長すると考えられる。複数の金属が吸着するような場合 (例えば、Mg₂SiO₄ は SiO と Mg が吸着する)、より衝突頻度が低い方が成長率を決めるとする。このように、成長率を決める元素を “key species” と呼ぶ。すると、ダスト種 i のサイズ r の増加は、

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)_i = \alpha_i \left(\frac{4\pi}{3} a_{i,0}^3\right) \left(\frac{kT}{2\pi m_{i1}}\right)^{1/2} n_{i1}(t) \quad (1)$$

で与えられるとする。 $a_{i,0}$ は、key species 1 個を含むモノマーの半径、 m_{i1} と n_{i1} はそれぞれ key species の分子質量と数密度を表す。従って、key species の密度や熱速度 (温度) が高いほど衝突確率が大きくなり、ダストがより早く成長するというを表している。 α_i は key species の付着確率を表すが、本研究では 1 とした。

2.3 Initial conditions

本研究では、ガス雲は以前に起こった超新星によって金属・ダスト汚染を受けているとする。初期宇宙においては、ダストは主に超新星によって供給される。超新星の噴出物は非常に高密度であるため、金属原子どうしが頻りに衝突し、ダスト形成が起こる。これは、爆発後数百日で起こる (Todini & Ferrara 2001; Nozawa et al. 2003; Schneider et al. 2003)。さらに、高密度の超新星噴出物が周りのガスと相互作用すると、reverse shock と呼ばれる内向きの衝撃波が走る。

それがダストが形成されている噴出物中に浸透すると、ダストが破壊され始める。これは、爆発後一万年で起こるとされている (Bianchi & Schneider 2007; Nozawa et al. 2007)。ダスト破壊により、ダストを構成していた金属原子は再びガス中に戻る。このようにして、超新星モデルから、ダストと金属の質量比が求まる。Reverse shock の効果は超新星の周りのガスの密度が高いほど大きく、よりダストが破壊され、ダスト-金属比は小さくなる。

ここでは、超新星モデルとして、Schneider et al. (2012) のモデルを用いる。このモデルは、SDSS J102915+172927 の重元素組成を再現している。彼女らは親星の質量が $M_{\text{pr}} = 20, 35 M_{\odot}$ の超新星に対してダスト形成過程を計算した。また、それぞれの親星質量に対して、4つの reverse shock モデルを与えている。それぞれ、ダスト-金属比が大きい順番に、norev, rev1, rev2, rev3 と呼ばれている。従って、計 8つのモデルに対して考えることとなる。

また、ダストの絶対量は、ガス雲の金属量を仮定することによって定めることができる。本研究では、金属量としては SDSS J102915+172927 の $4.5 \times 10^{-5} Z_{\odot}$ について調べる。

3 Results

図 1 は、計算の結果得られたガス雲の温度進化を示している。横軸はガス雲の中心密度であり、左から右へ密度が上昇していく様子を表している。従って、時系列と考えてよい。また、縦軸は温度を表している。冷却によってガスが不安定となり、重力不安定となったときに、小質量のガス片に分裂するような条件を満たした場合は、三角の点を付けている。

右図はダスト成長を考慮する場合 (赤線) としない場合 (青線) の比較であり、本研究の主要な結果を端的に表している。特に初期のダスト量の小さい rev3 (実線) の結果を見れば分かる通り、ダスト成長を考慮しない場合は、密度が 10^{12} – 10^{14} cm^{-3} において、ダスト冷却がほとんど効果を示していない。一方、ダスト成長を考慮すると、密度が 10^{12} – 10^{14} cm^{-3} においてダスト冷却が増加したため、ガスの温度が減少していることが分かる。更に、ガスの温度が低下し

たことで、rev3 のモデルでもガスが不安定となり、小質量のガス片が形成される条件を満たすようになることが分かる。

4 Conclusion

Schneider et al. (2012) では、近年発見された低質量星 SDSS J102915+172927 の金属量に対して、超新星によるダスト破壊の大きい (ダスト量の小さい) モデルでは、ガス雲中のダスト冷却が十分ではなく、小質量のフラグメントが形成されないという結果が得られていた。しかし、ガス雲中での密度上昇に伴うダスト成長を考慮することにより、初期ダスト量の小さいモデルでも、最終的にダスト冷却が効果的となり、フラグメントの条件を満たすようになることが分かった。

また、特筆すべき点は、ダスト成長を考慮しない場合は、初期のダスト量によって小質量のフラグメントが生じるかどうかに不定性があったが、ダスト成長を考慮することによって、最終的にどのモデルでもその条件を満たすようになったという点である。従って、ダスト破壊のモデルの不定性を消すことができるということが重要な点である。

今回は、SDSS J102915+172927 の金属量と重元素組成で、低質量星が形成される必要条件を求めた。今後は、更に一般的な状況に対して同様の研究を行う。つまり、様々な重元素組成を与える超新星モデルに対し、様々な金属量に対して条件を求めることで、低質量星が形成されるための臨界の金属量や、重元素組成の条件を求めて行くことが必要である。

Acknowledgement

共同研究者として、助言をくださっている野沢貴也さん、吉田直紀先生、大向一行先生、それから Raffaella Schneider さんに感謝を致します。

Reference

Abel, T., Bryan, G. L., & Norman, M. L. 2002, *Science*, 295, 93

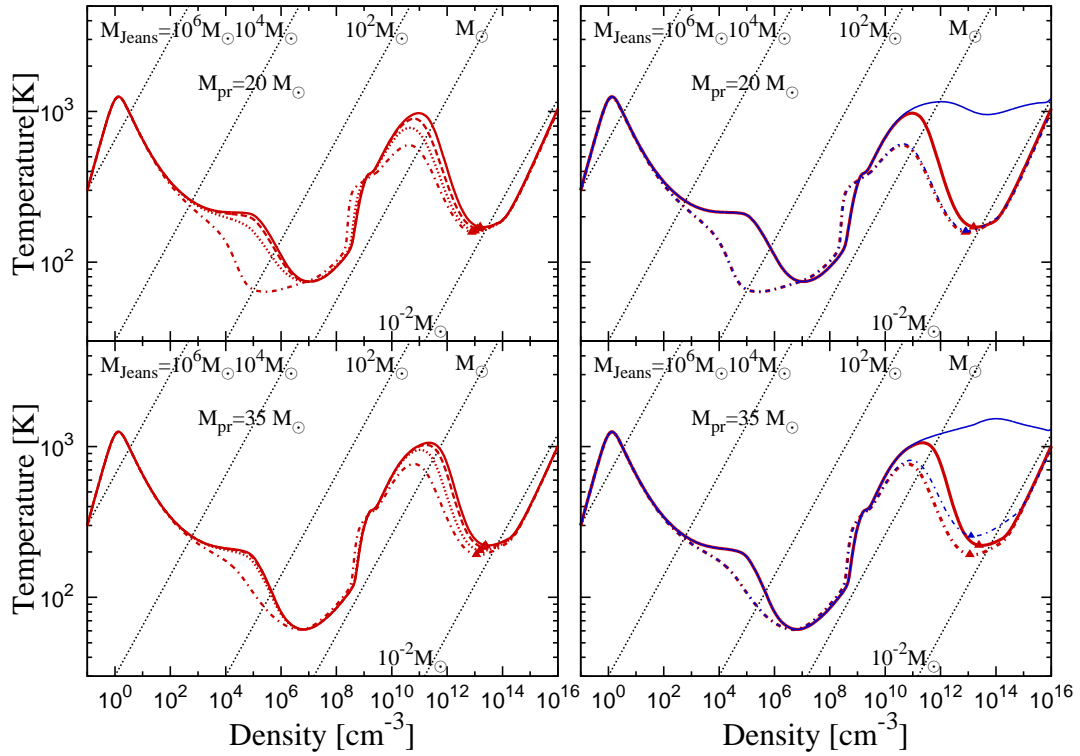


図 1: 密度に対する温度進化の図。左図はダスト成長を考えた場合に、超新星の親星の質量 $M_{pr} = 20 M_{\odot}$ (上段) と $35 M_{\odot}$ (下段) それぞれに対し、reverse shock の効果の異なる norev (一点鎖線), rev1 (点線), rev2 (破線), rev3 (実線) モデルを初期条件としてプロットしたものである。また、右図は、特に norev, rev3 モデルに対して、ダスト成長を考慮しない場合の結果との比較である。青線がダスト成長を考慮しない場合の計算結果で、赤線が考慮した場合のものである。また、三角の点は、ダスト冷却が十分効果的で、重力不安定によって小質量のガス片が形成される状態を表している。

Bianchi, S., & Schneider, R. 2007, MNRAS, 378, 973
 Bromm, V., Ferrara, A., Coppi, P. S., & Larson, R. B. 2001, MNRAS, 328, 969
 Caffau, E., Bonifacio, P., François, P., et al. 2011, Natur, 477, 67
 Chiaki, G., Yoshida, N., & Kitayama, T. 2013, ApJ, 762, 50
 De Cia, A., Ledoux, C., Savaglio, S., Schady, P., & Vreeswijk, P. M. 2013, arXiv:1305.1153
 Dwek, E., Galliano, F., & Jones, A. P. 2007, ApJ, 662, 927
 Frebel, A., Aoki, W., Christlieb, N., et al. 2005, Natur, 434, 871
 Nozawa, T., Kozasa, T., Umeda, H., Maeda, K., & Nomoto, K. 2003, ApJ, 598, 785
 Nozawa, T., Kozasa, T., Habe, A., et al. 2007, ApJ, 666, 955
 Nozawa, T., Kozasa, T., & Nomoto, K. 2012, ApJL, 756, L35
 Omukai, K., Tsuribe, T., Schneider, R., & Ferrara, A. 2005, ApJ, 626, 627
 Schneider, R., Ferrara, A., Salvaterra, R., Omukai, K., & Bromm, V. 2003, Natur, 422, 869
 Schneider, R., Omukai, K., Bianchi, S., & Valiante, R. 2012, MNRAS, 419, 1566
 Schneider, R., Omukai, K., Bianchi, S., & Valiante, R. 2012, MNRAS, 423, L60
 Todini, P., & Ferrara, A. 2001, MNRAS, 325, 726