

さまざまな金属量における分子雲の熱進化

井手 良輔 (九州大学大学院 理学研究科)

Abstract

分子雲の熱的、化学的進化を異なる金属量 Z で調べた。金属量 Z が非常に低い場合には分子雲は主として H しか含まれていない。そのため H_2 や HD の回転と振動による冷却がよく効く。しかし、低温ではこれらの冷却が効率的でないため、金属量 Z が低い分子雲は十分に冷えることが出来ない。金属量 Z が高いときは、様々な元素が存在する。そのため、酸素や炭素による冷却によって分子雲は低温まで冷えることが出来る。また、このときダストも多く含まれるためダストによる放射冷却やダスト表面での H_2 の合成も冷却を促進する。結果として、金属量 Z が多い場合は分子雲は低温まで冷却される。

1 Introduction

初期に宇宙に存在する元素は水素が支配的である。初期宇宙で形成した分子雲も主に水素からなり、金属量 Z は低い。 $Z \leq 10^{-6} Z_{\odot}$ の分子雲では、断熱的に収縮して温度が上昇していく。ガスの温度が 1000K になると水素分子が形成され始め、水素分子輝線による放射冷却がよく効くようになり温度が低下し始める。しかし、水素による冷却はあまり効率がよくないために数百 K 以下になることなく収縮し、星が誕生する。温度が高い状態では分子雲は分裂しないため、周りに大量のガスをまとっている。そのため、原始星は、ガス降着によって $1000 M_{\odot}$ ほどの大質量星になると考えられている。

最初の星が形成されると星内部で核融合反応が起こり水素よりも重い元素が生成される。また、星がその一生を終えるときに起こす超新星爆発によっても重元素が作られる。これらの効果によって時代とともにガスに含まれる金属量 Z は多くなっていく。そのため、分子雲の収縮に伴う冷却は水素以外のものが重要になってくる。

$Z \geq 10^{-5} Z_{\odot}$ では O や C を含む分子が多くなる。これらは冷却効率が高いため分子雲がよく冷える。 Z の上昇とともに分子雲はよく冷え、温度が下がると分子雲は分裂を起こしやすくなる。結果として、金属量が多い場合は、初期宇宙に誕生する星よりも軽い星が誕生すると考えられる。

2 Methods

各々の金属量 Z における温度進化を計算する。分子雲の時間進化は次のエネルギー方程式を解くことにより得られる (Omukai 2000; Omukai et al. 2005)。

$$\frac{de}{dt} = -P \frac{d}{dt} \frac{1}{\rho} - \Lambda_{\text{net}}, \quad (1)$$

$$e = \frac{1}{\gamma_{\text{ad}} - 1} \frac{kT}{\mu m_{\text{H}}}, \quad (2)$$

ここで e は熱エネルギー、 γ_{ad} は比熱比、 μ は換算質量、 m_{H} は水素の質量、 k はボルツマン定数である。また、圧力 p は

$$p = \frac{\rho kT}{\mu m_{\text{H}}}, \quad (3)$$

で表される。(1) 式の右辺第一項は圧縮熱で第二項の Λ_{net} は放射や化学反応による冷却を表している。密度 ρ の時間変化は

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{\rho}{t_{\text{col}}} \quad (4)$$

で表され t_{col} は衝突タイムスケールで圧力勾配力がなければ

$$t_{\text{col},0} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}} \quad (5)$$

で落下する。圧力勾配力があるときは圧力勾配力と重力の比 f から

$$t_{\text{col}} = \frac{1}{\sqrt{1-f}} t_{\text{col},0} \quad (6)$$

で表される。 f は比熱比 γ によって異なる。 $f \geq 1$ のとき圧力勾配力 \geq 重力でガスは落下しなくなる。こ

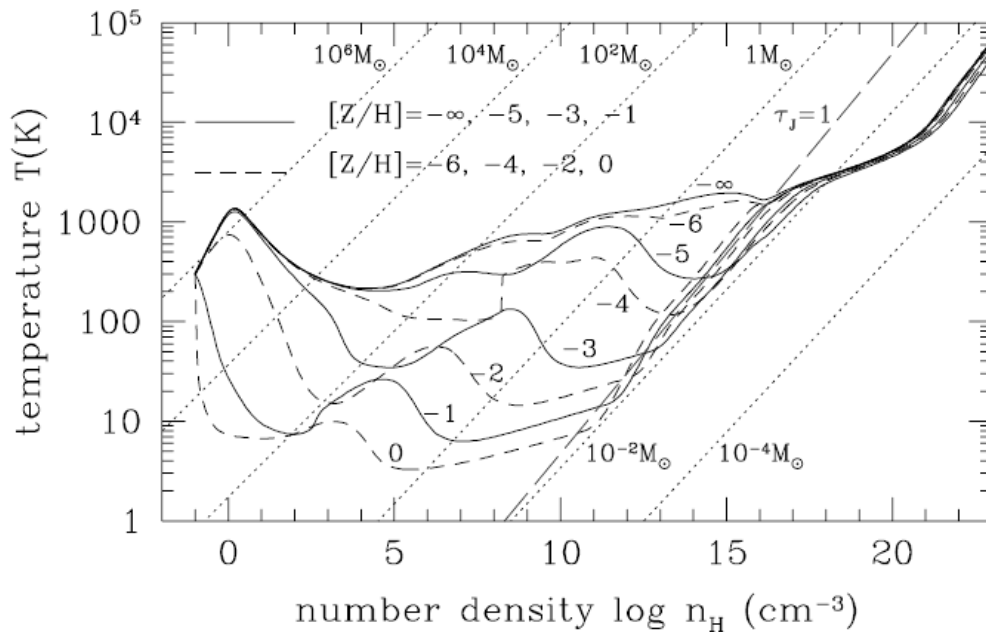


図 1: 異なる金属量を持つガスの熱進化

ここでは、 $f \leq 0.95$ として計算する。これらを用いて分子雲の中心部の温度進化を計算する。金属量 Z が変化すると冷却率 Λ_{net} が変わるため温度進化も変化する。

3 Results

$[Z/H] = -\infty, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0$ のそれぞれの温度進化のグラフは図 1 のように表される。 $[Z/H] = -\infty, -6$ では H_2 による冷却効果が主となる。 $[Z/H] = -5, -4, -3$ になると酸素原子 O を含む分子による冷却が支配的となり、冷えやすくなる。

$[Z/H] = -2, -1, 0$ になるとさらに炭素原子 C による冷却効果が表れるためより温度が下がる。結果として、金属量 Z が大きければ大きいほど温度の最小値は小さくなる。図中の $\tau = 1$ は光学的厚さが 1 となり、不透明な状態になる時期を示している。光学的に厚くなると分子雲コアは断熱的に収縮する。その進化は金属量 Z によらず、どの Z でも同じ進化トラックに沿って収縮しているのが分かる。

4 Discussion

異なる金属量で収集するガスの熱進化を計算した結果、それぞれの金属量 Z における温度進化が定性的によく説明できた。この温度進化を用いて今後分子雲の分裂がどう起こっていくかを理解することが出来る。

今後、この Omukai et al. (2005) に沿って同様の熱進化を計算し、初期宇宙での星形成、特に磁場の増幅と散逸を考慮した星形成過程を調べる。また、磁場の散逸に重要と思われる元素を計算に取り込む。

5 Conclusion

金属量 Z が増えると重元素の割合が増え、分子雲は冷えやすくなる。その後、光学的厚さが 1 になると断熱収縮し、金属量によらず一定の割合で収縮し温度が上がっていく。

収縮する途中での温度が下がるプロセスは分子雲の分裂に重要で $[Z/H] = -\infty$ の原始星は分裂が起きずに $1000M_{\odot}$ ほどの大質量星へと進化し、 $[Z/H]=0$ の現在の星は太陽程度の質量に落ち着く。

2013 年度 第 43 回 天文・天体物理若手夏の学校

Reference

Omukai, K. 2000, ApJ, 534, 809

Omukai, K., Tsuribe, T., Schneider, R., & Ferrara, A.
2005, ApJ, 626, 627