

# 低金属量のガス雲からの磁場の散逸

甲南大学 D1 土井 健太郎

## Abstract

磁場は星形成において重要な役割を担っているが、ガスとのカップリングに関しては、初期宇宙と現在の星形成領域では大きく異なっている。現在の星形成領域においては、ダストが電荷のキャリアとなり収縮の過程でオーム損失により磁場は大きく散逸すると考えられているが、最初期の宇宙での星形成領域ではダストが存在しないため磁場はガスに凍結したままになる。しかし初代星形成から現在の星形成の間の、どの程度の重元素・ダストが存在すると、磁場が散逸するのかはまだ分かっていない。我々は、低金属量のガス雲での化学組成の進化、およびダストの電荷進化を計算することにより、ガス雲と磁場の結合の様子を調べ、初代星以降の磁場の散逸を評価した。その結果、重元素量  $Z > 10^{-6}Z_{\odot}$  で、磁場はガスから散逸することがわかった。

## 1 Introduction

星形成において磁場は重要な影響を及ぼすが、その時重要となるのが、磁場とガスのカップリングの様子である。現在の星形成領域には  $\mu\text{G}$  程度の磁場が存在し、もし磁場がガスに凍結したままであると、ガスの収縮とともに磁場は増幅され、星の磁場強度は  $10^6 - 10^7\text{G}$  にもなる。しかし、これは観測されている星の、典型的な磁場強度よりも3桁以上大きくなってしまう。そのため、ガス雲の収縮の過程で磁場とガスは分離してしまうと考えられている (e.g., Nakano et al. 2002)。ガスから磁場が分離すると、ガスの収縮過程で磁場を増幅することができずに散逸してしまう。また、磁場が散逸した領域ではアウトフローを駆動することができず、角運動量が輸送されにくくなる (e.g., Machida et al. 2007)。このように現在の星形成においては磁場の散逸が重要となる。一方、初代星形成期における磁場の散逸についても調べられており、その結果、初代星形成においては磁場は散逸しないことが分かっている (Maki & Susa 2004)。

しかし、初代星から現在の星形成にいたる間の、低金属量のガス雲のから出来る星形成での磁場の散逸の様子は分かっていなかった。本研究では、低金属量の星での磁場の散逸を調べるため、低金属量のガス雲での化学組成の進化、およびダストの電荷進化を計算をおこなった。

## 2 モデル

### 2.1 基礎方程式

ここでは、平均金属量  $Z$  をもった球対称なガス雲を考える。まずは収縮のダイナミクスについて述べる。中心密度の進化は、

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho}{t_{\text{col}}} \quad (2.1)$$

によって表せるとする。ここで  $t_{\text{col}}$  は収縮のタイムスケール。

### 2.2 化学反応

化学反応は、水素 H、重水素 D、ヘリウム He、リチウム Li、炭素 C、酸素 O などの 63 種類の非平衡化学反応式を解く。ここで、ダスト粒子は、 $0, \pm e, \pm 2e$  の 5 種類の電荷をもつ粒子を計算した。ダスト粒子の電荷に関する反応に関しては、Nakano & Umebayashi(1980,1986) のモデルを参考にした。ダスト粒子はほぼ球形だとみなし、また電荷をもったダストがつくる電位も球対称であるとする。そうすると、半径  $a$ 、電荷  $le$  のダスト粒子と、質量  $m$ 、電荷  $q$  のイオンや電子との平均の衝突断面積は、

$$\langle \sigma v \rangle = \begin{cases} \pi a^2 \left( \frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{lqe}{akT} \right) & \text{for } lq \leq 0 \\ \pi a^2 \left( \frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2} \exp \left( -\frac{lqe}{akT} \right) & \text{for } lq \geq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

のいずれかとなる。ここで、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  はガスの温度。

また、現在の星形成領域においてダストのサイズ分布を考慮して磁場の散逸を見積もった、Nishi et al.(1991) によると、ダストのサイズ分布は磁場の散逸にはあまり影響しないことがわかる。よって、ここではダストのサイズ  $a$  は  $1.0 \times 10^{-5} \text{cm}$  とし、また密度  $\rho_g$  は  $3 \text{ g cm}^{-3}$  とした。また、ダストの質量比は  $0.939 \times 10^{-2} (Z/Z_{\odot})$  とした。

### 2.3 宇宙線と放射性元素による電離

電離率には、宇宙線による電離と放射性元素による電離が大きく寄与していると考えられる。そのため、初期宇宙での宇宙線による電離と放射性元素による電離を考える。

初代星形成期の初期宇宙では、宇宙線の強度は現在と比べ非常に弱かったと考えられる。Stacy & Bromm(2007) によると、宇宙初期での宇宙線による電離率は、

$$\zeta_{\text{CR}} \approx 10^{-19} \text{s}^{-1} \left( \frac{U_{\text{CR}}}{2 \times 10^{-15} \text{erg cm}^{-3}} \right) \left( \frac{\epsilon_{\text{min}}}{10^7 \text{eV}} \right)^{-1.3} \quad (2.3)$$

となる。ここで、 $U_{\text{CR}}$  は宇宙線のエネルギー密度、 $\epsilon_{\text{min}}$  はガス雲に作用する宇宙線の最低エネルギー。これは、星間空間の宇宙線による電離率のおよそ  $10^{-2}$  倍になっている。

Nakano & Umebayashi(2009)によると、放射性元素による電離率は短寿命の放射性元素と長寿命の放射性元素では4桁程度異なっている。今回の計算では、長寿命の放射性元素による電離率( $1.4 \times 10^{-22} \text{s}^{-1}$ )を用いる。

### 3 結果

今回の計算では、金属量  $Z = 0, 10^{-8}Z_{\odot}, 10^{-7}Z_{\odot}, 10^{-6}Z_{\odot}, 10^{-5}Z_{\odot}, 10^{-4}Z_{\odot}, 10^{-3}Z_{\odot}, 10^{-2}Z_{\odot}, 1Z_{\odot}$  のガス雲について計算を行った。初期の密度  $n_{\text{H,ini}}$  と温度  $T_{\text{ini}}$  は、 $n_{\text{H,ini}} = 10^{-1} \text{cm}^{-3}$ 、 $T_{\text{ini}} = 300\text{K}$  とした。

磁場の散逸は、散逸時間  $t_{\text{D}}$  と自由落下時間  $t_{\text{ff}}$  の比、

$$\frac{t_{\text{D}}}{t_{\text{ff}}} = \frac{R_{\text{J}}/v_{\text{Bx}}}{t_{\text{ff}}} \quad (3.1)$$

を用いて見積もった。つまり、 $t_{\text{D}}/t_{\text{ff}} > 1$  のときは散逸時間よりも収縮のタイムスケールの方が速いため、磁場はガスに凍結しているが、 $t_{\text{D}}/t_{\text{ff}} < 1$  になると、散逸時間が収縮のタイムスケールより速くなり、磁場はガスから散逸すると言える。

図1は、 $Z = 10^{-3}Z_{\odot}, 10^{-4}Z_{\odot}$  のガス雲中での化学種の進化の計算結果、図2は、 $Z = 10^{-3}Z_{\odot}, 10^{-4}Z_{\odot}, 10^{-6}Z_{\odot}, 10^{-8}Z_{\odot}$  の磁場の散逸時間の計算結果である。 $Z = 10^{-8}Z_{\odot}$  のガス雲では、磁場はガスに凍結したままであるが、 $Z = 10^{-6}Z_{\odot}$  のガス雲では、 $n_{\text{H}} \sim 10^{15} \text{cm}^{-3}$  でダストが電荷のキャリアとなりオーム損失で散逸していることがわかる。つまり、金属量  $Z$  が  $10^{-8}Z_{\odot} - 10^{-6}Z_{\odot}$  で磁場が散逸し始める、臨界金属量が存在することが分かった。

### 4 まとめ

本研究では、低金属量のガス雲からの磁場の散逸の様子を調べるため、非平衡化学反応とエネルギー方程式を含めた1zoneの計算を行った。その結果、ガス雲から磁場が散逸し始める、臨界重元素量は  $10^{-6}Z_{\odot} > Z > 10^{-8}Z_{\odot}$  であることがわかった。

### 参考文献

- [1] Machida, M. N., Inutsuka, S.-i., & Matsumoto, T. 2007, ApJ, 670, 1198
- [2] Maki, H., & Susa, H. 2004, ApJ, 609, 467
- [3] Omukai, K., Tsuribe, T., Schneider, R., & Ferrara, A. 2005, ApJ, 626, 627
- [4] Nakano, T., & Umebayashi, T. 1980, PASJ, 32, 613
- [5] Nakano, T., & Umebayashi, T. 1986, MNRAS, 218, 663
- [6] Nakano, T., Nishi, R., & Umebayashi, T. 2002, ApJ, 573, 199
- [7] Nishi, R., Nakano, T., & Umebayashi, T. 1991, ApJ, 368, 181
- [8] Stacy, A., & Bromm, V. 2007, MNRAS, 382, 229

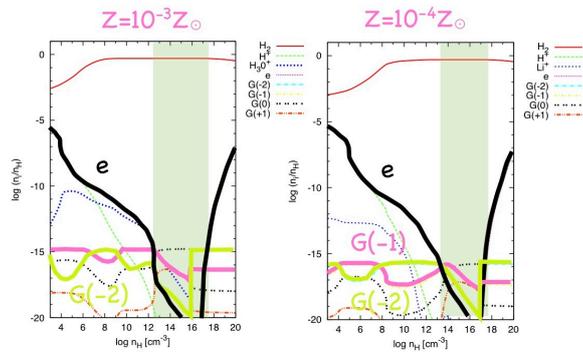


図1 化学種の進化の計算結果

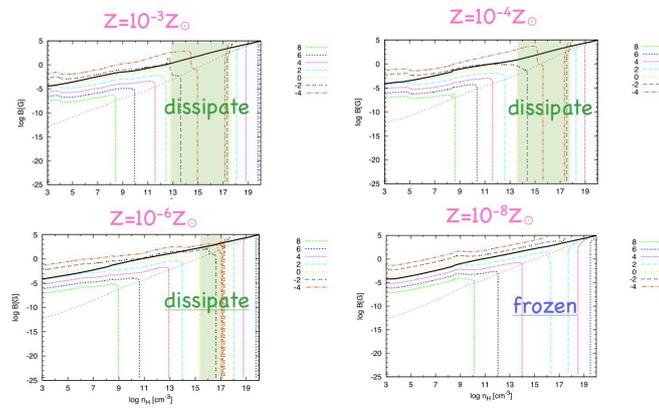


図2 磁場の散逸時間