

# 原始惑星系円盤における磁場散逸効果を含めた磁気 回転不安定性

船野 光太郎 (山形大学大学院)

## 1 Introduction

Hayashi(1985) は惑星系形成の標準理論として採用されているが、円盤を形成するガスが持つ角運動量を外側へ輸送する機構に関して問題が残る。何らかの乱流粘性によって角運動量が輸送されると予想されていたが、その起源については未解明であった。

しかし、Balbus & Hawley(1991) によって弱磁場の存在によって円盤が流体不安定となり、角運動量の輸送が起こることが確認されたことでこの乱流粘性の起源についての問題は解決する。彼らの研究によると、磁場の存在する円盤ではケプラー回転円盤に対する Rayleigh 基準  $\frac{dr^2\Omega}{dr} > 0$  は成り立たず、新たに  $\frac{d\Omega^2}{dr} > 0$  が安定条件となる。これより、原始惑星系円盤は磁場が存在すれば必ず磁気回転不安定 (Magnetorotational Instability: MRI) となることが示された。

一方、円盤半径が 100AU 以内の高密度領域ではオーム散逸による磁場の散逸も考えられ、MRI が抑制されることが予想される。Sano & Miyama(1999) では、線形解析によってオーム散逸も含めた MRI の条件が求められている。本発表では、その内容を踏まえた上で、電離と再結合を考慮した場合に円盤が安定となる領域 (Dead Zone) について説明し、今後の研究方針を示す。

## 2 Unstable Criterion

Sano & Miyama(1999) により、MRI についてオーム散逸による磁気散逸効果を含めた場合の不安定条件が示された。

オーム散逸による磁場  $B$  の散逸がある場合、以下の基礎方程式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) &= 0 \\
\frac{d\mathbf{v}}{dt} + \frac{1}{\rho} \nabla \left( P + \frac{B^2}{8\pi} \right) - \frac{1}{4\pi\rho} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \nabla \Phi &= 0 \\
\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \eta \nabla \times \mathbf{B}) \\
\rho \frac{de}{dt} &= -P \nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{\eta}{4\pi} |\nabla \times \mathbf{B}|^2
\end{aligned}$$

これより線形解析を行うことで円盤における局所的な不安定条件を求めることができる。以下には、円盤平面に対して垂直な方向の構造も考慮した解析の結果から求まる不安定条件を示す。最大成長率を持つ不安定モードとなる臨界波長がスケールハイト  $H$  より小さくなる必要があるため

$$\lambda \approx \max \left( \frac{v_{Az}(z)}{\Omega}, \frac{\eta(z)}{v_{Az}(z)} \right) \leq H$$

を満たす場合に円盤は不安定となる。どちらの条件を選ぶかは磁気レイノルズ数  $R_m = 1$  を境に変わる。

### 3 Dead Zone

ダスト表面では電離されたイオンと電子が再結合する。そのため、電離度が低下し、磁場との結合が弱まって MRI が起こり辛くなる。

このイオン-電子再結合はダストの密度が大きくなるほど有効となるため、円盤内部領域での安定性に影響する。粒種  $X_i$  の反応速度式は Sano et al.(2000) より、以下のように表される。

$$\frac{dn(X_i)}{dt} = \sum_i \gamma_{ij} + \sum_{i,j} \beta_{ijk} n(X_j) n(X_k)$$

また、宇宙線と放射線核種による電離を考えれば電離度は次のように書ける。

$$\zeta(r, z) \approx \frac{\zeta_{CR}}{2} \left\{ \exp \left[ -\frac{\chi(r, z)}{\chi_{CR}} \right] + \exp \left[ -\frac{\Sigma(r) - \chi(r, z)}{\chi_{CR}} \right] \right\} + \zeta_R$$

ここで、

$$\begin{aligned}
\chi(r, z) &= \int_z^\infty \rho(r, z) dz \\
\chi_{CR} &\approx 1.0 \times 10^{17} s^{-1}, \quad \chi_R \approx 6.9 \times 10^{23} f_g s^{-1}
\end{aligned}$$

である。 $f_g$  はダストの減少を表すファクターであり、ここでは標準モデルに対応した  $f_g = 1$  を用いる。

以上を用いて、水素に対する電荷  $\pm 1, \pm 2, \pm 3$  を持つダスト、電子、及び金属イオンの相対存在度、さらに円盤の電離度を示す。図 1, 図 2 は、それぞれ円盤の半径方向と鉛直方向を横軸に取っている。図 1 は円盤中央平面 ( $z=0$ )、図 2 は  $r=1\text{AU}$  での値を示している。

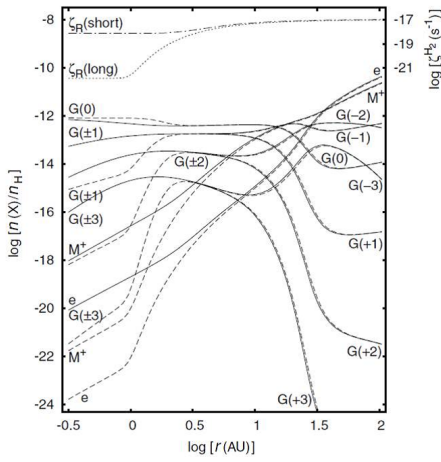


図 1

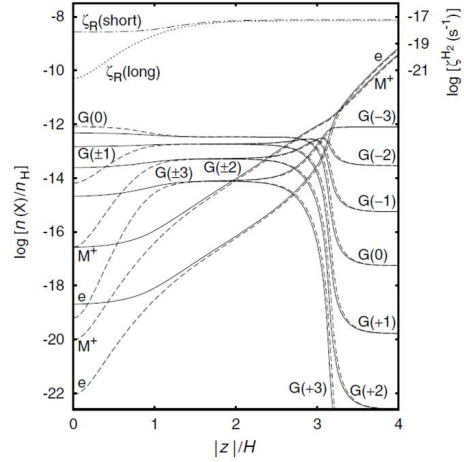


図 2

図のように、 $r \geq r_{dec} \approx 15\text{AU}$ ,  $|z| \geq 3.0H$  の領域では電子とイオンが荷電粒子の中で支配的となっていることがわかる。すなわち、磁場との結合は強く、不安定が起こりやすい。一方、 $r \leq r_{dec}$ ,  $|z| \leq 3.0H$  の領域は密度が高いため、ダスト表面でのイオン-電子再結合が有効となる。そのためダストが支配的な粒子となり、電離度が低下する。その結果 MRI は抑制され、円盤内部領域は安定となる。この領域を Dead Zone と呼ぶ。以上から、標準モデルの円盤の場合、半径 15AU 以上の領域で MRI によって中心星に向かう降着が起こり、それらの降着物質が 15AU 付近に蓄積すると思われる。

Dead Zone はダストのサイズや密度によって範囲が変化することもわかっている。したがって、ダストに関する物理量は円盤進化の各ステージに応じて適切な値を採用する必要がある。

また Umebayashi & Nakano(2009) で示されるように放射性核種として  $^{16}\text{Al}$  などの短寿命核種も含めると、図のように内部領域でも電離度が下がらない点にも注意しなければならない。このことから、短寿命放射性核種を含む場合の MRI については理論を再考する必要があると言える。

## 4 Summary

Sano & Miyama(1999) では、オーム散逸を含む磁気回転不安定性について調べられている。磁気散逸が有効となるのは磁気レイノルズ数  $R_m < 1$  の (磁気拡散率  $\eta$  が大きい) 場合で、このとき最大成長率となる波長は理想 MHD の場合と異なり、 $\lambda \approx \frac{\eta(z)}{v_{Az}(z)}$  となる。さらに成長率を比較すれば磁気拡散率が大きくなるほど、磁気散逸の効果が強くなり、MRI が安定化されることがわかる。

Sano et al.(2000) では、宇宙線・放射性核種による電離とイオン-電子再結合を考慮し、荷電粒子の存在度が示された。標準モデルの円盤を仮定すると  $r \geq r_{dec} \approx 15AU, |z| \geq 3.0H$  の領域では電子とイオンが支配的となり、MRI が起こりやすくなる。一方、 $r \leq r_{dec}, |z| \leq 3.0H$  の領域ではダストが支配的となり、電離度が低下する。そのため円盤構成物と磁場の結合が弱まり、MRI が抑制され Dead Zone となる。これより半径 15AU 以上から落下した降着物質が Dead Zone の境界に蓄積することが予測される。

## 5 Future

今回、磁場散逸の原因としてはオーム散逸のみを考えている。しかしより現実的な状況を考えれば、両極性拡散やホール効果といった効果も含めなければならない。さらに円盤表面付近では、電離源として x 線や紫外線を考える必要があるし、円盤内部でも短寿命放射性核種による電離も考える必要がある。これらの効果やダストのサイズ・存在度は、円盤の進化ステージによって変わるためタイムスケールも含めた理論が必要となる。今後の研究では、以上のような効果を含めることで惑星形成理論をより現実的なものに再構築しなければならない。

## 6 Reference

- Balbus,S.A., & Hawley,J.F. 1991,ApJ,376,214  
Sano,T., & Miyama,S.M. 1999,ApJ,515,776  
Sano,T., Miyama,S.M., Umebayashi,T., & Nakano,T. 2000,ApJ,543,486  
Umebayashi,T. & Nakano,T. 2009,ApJ,690,69