

## 原始惑星型円盤と磁気制動

鈴木 匠 (新潟大学大学院 自然科学研究科)

### Abstract

星形成は、分子雲コアが重力収縮により原始星へと進化し、その後、主系列星に進化していくと考えられている。その星形成過程の初期段階に、回転で支えられた星周円盤が原始星の周りに形成されているという多数の観測結果がある。この円盤は、惑星形成の舞台であると考えられており、原始惑星系円盤と呼ばれている。星形成過程における大きな問題の1つである「角運動量問題」や、この原始惑星系円盤の観測などに対して、矛盾のない理論シミュレーションが求められている。この解決のためには、より現実的な物理現象を考えなければならず、星形成過程における自己重力、非理想 MHD 効果、輻射輸送などの物理過程を取り入れた 3 次元抵抗性輻射磁気流体の原始星形成過程のシミュレーションがなされた (Tomida et al.2013)。本発表では、Tomida et al.,2013,Apj763,6 の計算結果の一部を紹介する。

## 1 Introduction

星形成は、分子雲コアが重力不安定になり収縮し、原始星へ進化し、その副産物ともいえる原始惑星系円盤などの形成ともなう。そして、原始星は、主系列星へと進化していく。この発表は、その星形成の初期段階の分子雲コアが重力収縮し、原始星を形成していく段階にフォーカスを当てている。

星形成過程の問題の1つに「角運動量問題」と言われるものがある。この問題は、観測されている分子雲コアの角運動量は、原始星の角運動量と比べて数桁以上も大きいというものである。つまり、この事実は、分子雲が収縮して星になる過程のどこかで、ほとんどの角運動量を外へ輸送する機構が存在することを意味している。この機構がないと分子雲の自己重力が遠心力に打ち勝てずに、ガスの収縮が途中で止まってしまい、星形成がなされないのである。ここで、回転と磁場によるアウトフローや磁気制動 (Magnetic Braking) という角運動量を効率良く輸送する機構が、この角運動量問題の解決案として考えられている。しかし、磁気制動の効果を理想 MHD で計算すると、角運動量輸送の効率が良すぎるため、星周円盤が形成されないという結果になる。観測によると、星形成の初期段階において、星周円盤をとともなうケースが多くあり、これは、観測結果との不一致と言える。この問題は、「Magnetic Braking Catastrophe」(Mellon R.R.,2008,Apj 681,1356)と呼ばれている。この Magnetic

Braking Catastrophe に注目して原始星形成を考えていく。この Magnetic Braking Catastrophe においては、オーム散逸の効果が重要であるので、オーム散逸の効果に注目する。以下の基本方程式に従い、3D の非理想 MHD シミュレーションがなされている。

## 2 Methods

基本方程式

Ideal MHD part:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + [\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} + (p + \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2) \mathbf{I} - \mathbf{B} \otimes \mathbf{B}] = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot [(e + p + \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2) \mathbf{v} - \mathbf{B}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B})] = 0$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{v} E_r] = 0$$

Self-gravity part:

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} = -\rho \nabla \Phi$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi$$

Resistivity part:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}) = 0$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \nabla \cdot [\eta \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B})] = 0$$

Radiation part:

$$\frac{\partial e_g}{\partial t} = -c \sigma_p (a_r T_g^4 - E_r)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_r + \mathbf{P}_r : \nabla \mathbf{v} = c \sigma_p (a_r T_g^4 - E_r)$$

Radiation force part:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{\sigma_R}{c} \mathbf{F}_r$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\sigma_R}{c} \mathbf{F}_r \times \mathbf{v}$$

$\rho$ : ガス密度  $t$ : 時間  $\mathbf{v}$ : 流体速度  $\mathbf{B}$ : 磁気流体密度

$p$ : ガスの圧力  $T_g$ : ガスの温度  $e$ : 全ガスエネルギー

$e_g$ : ガスの内部エネルギー  $E_r$ : 輻射エネルギー密度

$\Phi$ : 重力ポテンシャル  $\mathbf{F}_r$ : 放射エネルギーフラックス

$\mathbf{P}_r$ : 放射圧テンソル  $c$ : 光速  $G$ : 重力定数

$a_r = \frac{4\sigma}{c}$   $\sigma$ : ステファンボルツマン定数

$\eta$ : 抵抗  $\sigma_R$ : ロスランド平均 opacity

$I$ : 単位行列

これらの方程式を使い、孤立した 1 太陽質量程度の分子雲コアが原始星に進化していくという仮定で、オーム散逸の効果がある場合とそうでない場合の数値計算がなされた。

### 3 Results

以下に計算結果 (図 1) を載せる。左側の図が、オーム散逸の効果を含めた結果で、右側の図がオーム散逸の効果を含めない理想 MHD のシミュレーション結果である。上段は、回転軸を含む面、下段は、回転軸に垂直な面の密度断面図を示している。この右側の 2 つの図から、理想 MHD 計算では、角運動量輸

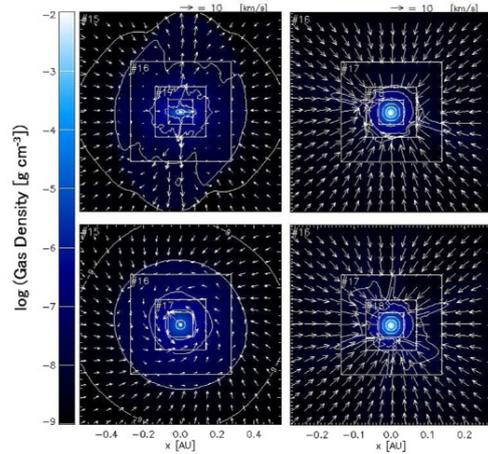


図 1: 計算結果

送が働き、図の中心部の原始星は、角運動量をほとんど持っていない。これは、原始星形成時に星周円盤が形成されないということ、つまり Magnetic Braking Catastrophe が起こるということを意味する。左側の 2 つの図、オーム散逸の効果を含めた計算結果の方は、大きい角運動量を持っていて、原始星形成時に原始惑星系円盤の形成がされることを示している。これにより、Magnetic Braking Catastrophe が解消されるのである。

### 4 Future

ALMA による高精度な観測と理論との比較が可能になりつつあり、この分野のさらなる発展が期待されている。しかし、この計算は、原始星形成後わずかな時間しか計算できておらず、星周円盤がどのように進化していくのか計算を進めることはできない。星周円盤の進化や、その円盤の中での惑星形成などの課題など重要な問いが残されている。

### Reference

Kengo Tomida et al 2013. Apj 763,6

Mellon R.R. 2008. Apj 681,1356

2014 年度 第 44 回 天文・天体物理若手夏の学校

Zhi-Yun Li et al 2014. arXiv:1401.2219