

原始星形成過程の降着円盤について

新潟大学 宇宙物理学研究室 M1

鈴木 匠

発表内容

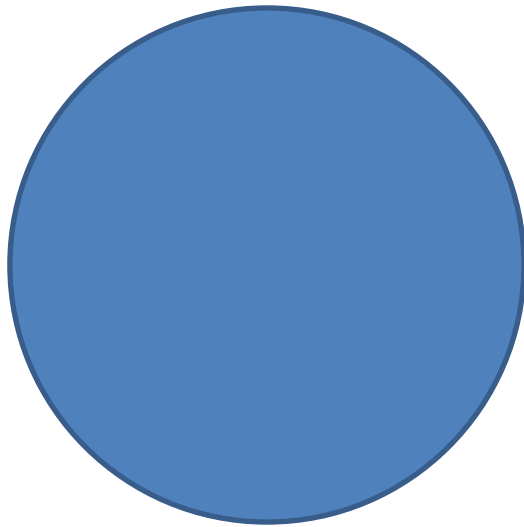
Radiation magnetohydrodynamics simulation of protostellar collapse : Protostellar core formation

Tomida et al, 2013, ApJ 763,6

世界初の磁場、輻射の効果を含めた原始星形成の
3次元のシミュレーション

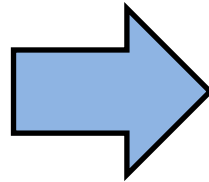
星形成初期段階

分子雲コア

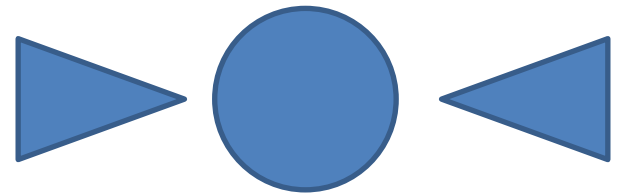


10^4 AU

自己重力による収縮



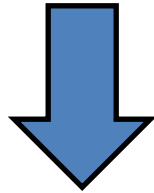
原始星



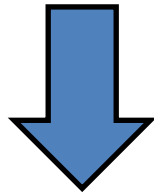
10 AU

角運動量

角運動量が保存されたまま、分子雲コアが原始星に進化
するということは、遠心力の影響で、収縮不可能



星形成過程で何らかの角運動量輸送機構が必要



磁場による角運動量輸送

理想磁気流体の磁場による効果

理想磁気流体を考えると、角運動量の輸送が効率よく行われていることが分かったが、効率が良すぎて、星形成初期に回転で支えられた星周円盤が形成されないという問題が生じた (Mellow.R.R 2008)

この研究では...

この論文では、オーム抵抗による磁場散逸の効果が重要なため、オーム抵抗を含めたMHDの場合と、そうでない場合のシミュレーションを行い、比較した。

輻射の効果については、ここでは、低質量星かつ進化の初期段階を考えており、この進化に対しての影響は非常に小さい。ガスの温度分布を出すために必要。

基本方程式

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

ファラデーの法則

$$\mathbf{j} = \sigma \left(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \frac{\mathbf{B}}{c} \right)$$

オームの法則

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$$

アンペールの法則

c : 光速 \mathbf{B} : 磁場 t : 時刻

\mathbf{E} : 電場 \mathbf{v} : 流体速度 \mathbf{j} : 電流

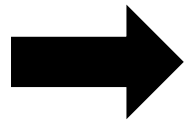
σ : 電気伝導度

基本方程式

この3式より以下の式を得る。

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}) \dots \textcircled{1}$$

$$\eta \equiv \frac{c^2}{4\pi\sigma} \quad \text{オーム抵抗}$$



オーム抵抗の効果を含む誘導方程式

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \dots \textcircled{2}$$

磁気流体力学

①の式(誘導方程式)について $\sigma \rightarrow \infty$ を考えると
($\eta \rightarrow 0$)

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \text{理想磁気流体の近似}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}) \dots \textcircled{1}$$

オーム抵抗の効果を含んだ誘導方程式

基本方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \dots \textcircled{3} \quad \text{連続の式}$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \rho v_i v_j - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2 \right) - \frac{\partial \phi}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} B_i B_j + \frac{\sigma_R}{c} F_{ri}$$

・・・④ 運動方程式

ρ : ガス密度 p : ガスの圧力

ϕ : 重力ポテンシャル $\sigma_{R(p)}$: ロスランド(プランク)平均不透明度

\mathbf{F}_r : 輻射のエネルギーフラックス

基本方程式

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

$$= -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi - c \sigma_p \left(a_r T_g^4 - E_r \right) + \frac{\sigma_R}{c} \mathbf{F}_r \cdot \mathbf{v} \dots \textcircled{5}$$

エネルギーの式

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho \dots \textcircled{6} \quad \text{ポワソン方程式}$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \nabla \cdot [v_i E_r] + \frac{\partial \mathbf{F}_r}{\partial x_i} + \sum_i \sum_j P_{rij} (\nabla \mathbf{v})_{ji} = c \sigma_p \left(a_r T_g^4 - E_r \right) \dots \textcircled{7}$$

T_g : ガスの温度 $a_r T_g^4$: 黒体輻射のエネルギー放射率

E_r : 輻射のエネルギー密度 \mathbf{P}_r : 輻射圧テンソル

Flux Limited Diffusion Approximation

この方程式を閉じるために、FLD近似を用い、エディントンファクター‘f’を導出した。

$$\mathbf{P}_r = fE_r$$

輻射圧と輻射エネルギーを結び付ける式

磁気レイノルズ数

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}) \dots \textcircled{1}$$

第一項と第二項の比較のため以下のようにし、比をとる

$$\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \approx \frac{V_0 B_0}{l_0} \quad \eta \nabla^2 \mathbf{B} \approx \frac{\eta B_0}{l_0^2}$$

V_0, l_0 : 典型的な速度、長さ

$$R_m \equiv \frac{l_0 V_0}{\eta} \quad \text{磁気レイノルズ数}$$

磁気レイノルズ数

$$R_m \equiv \frac{l_0 V_0}{\eta} \quad \text{磁気レイノルズ数}$$

$R_m \geq 1$ 第一項が大きい \rightarrow オーム抵抗無視

$R_m \leq 1$ 第二項が大きい \rightarrow オーム抵抗あり

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}) \dots \textcircled{1}$$

オーム抵抗

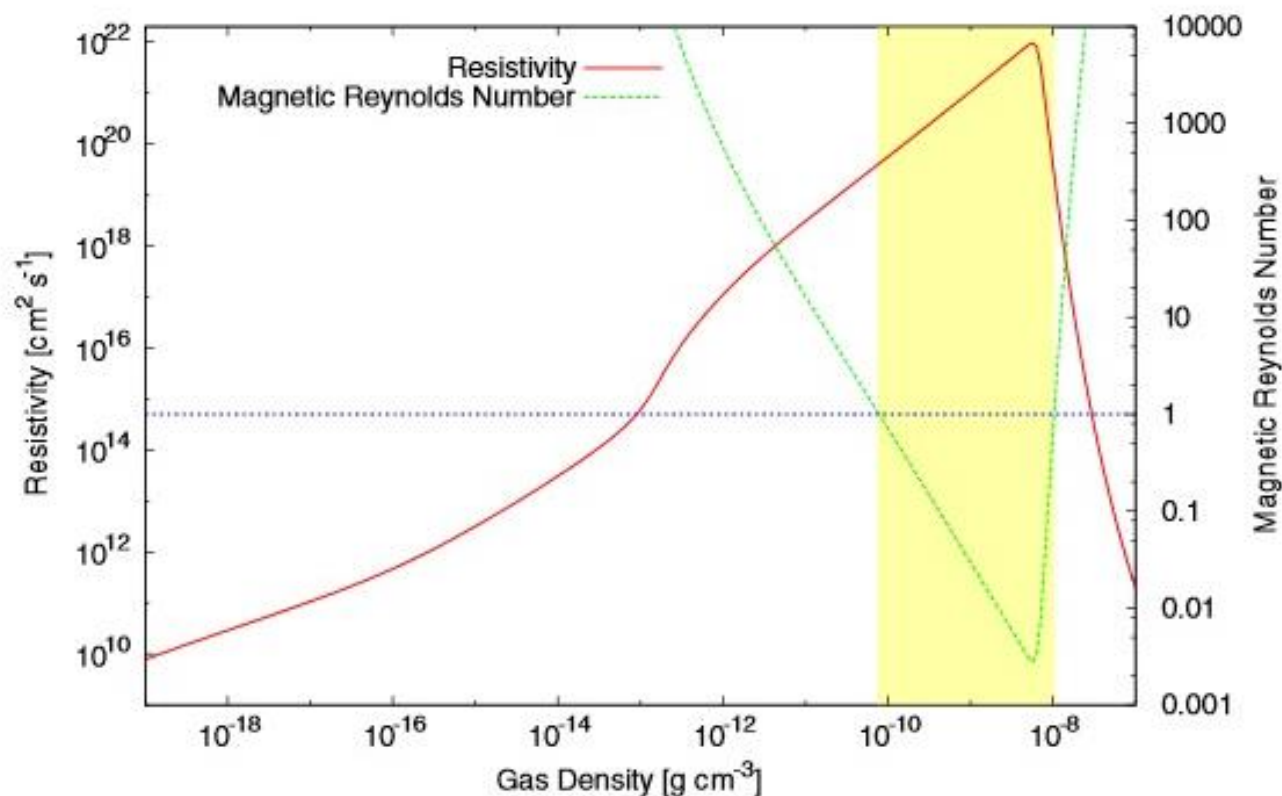
$$\eta^{-1} = \eta_T^{-1} + \eta_{NT}^{-1}$$

η_T :ガスの温度上昇による電離効果による抵抗

η_{NT} :宇宙線粒子の密度上昇による抵抗

ガスの温度、密度、電離度の関数で与えられる

磁気レイノルズ数とオーム抵抗の関係



$R_m \geq 1$ オーム抵抗は無視

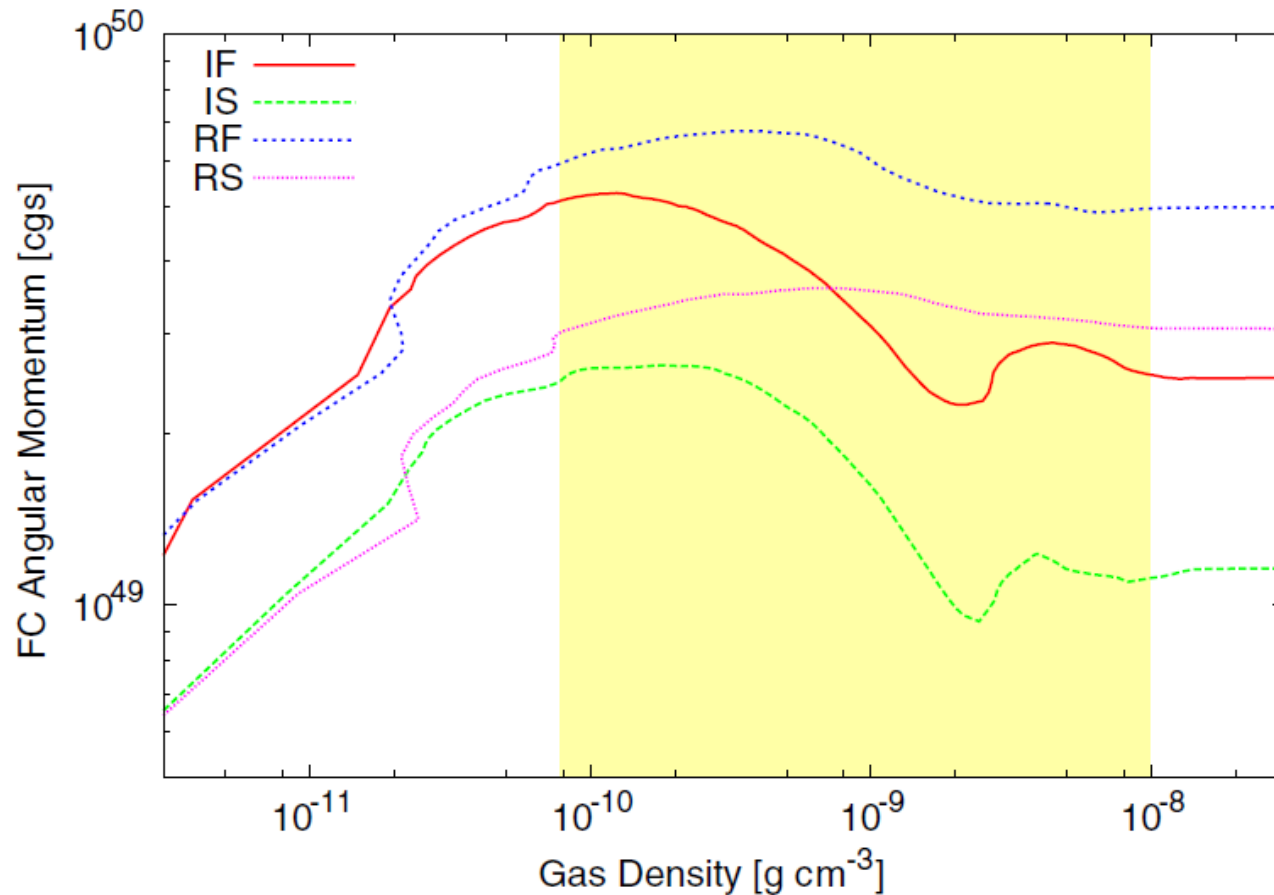
$R_m \leq 1$ オーム抵抗が無視できない

仮定・初期条件

- 孤立した太陽質量程度の分子雲コアの収縮を考える
- 初期温度 10K
- 初期中心密度 $10^{-18} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- 初期半径 8800AU
- 重力と磁気圧の比 3.8
- 自由落下速度と回転速度の比 0.023, 0.046
- 前のページのオーム抵抗

これらの条件で、オーム抵抗の効果がある場合とない場合で基本方程式を計算する

結果 First Coreの角運動量



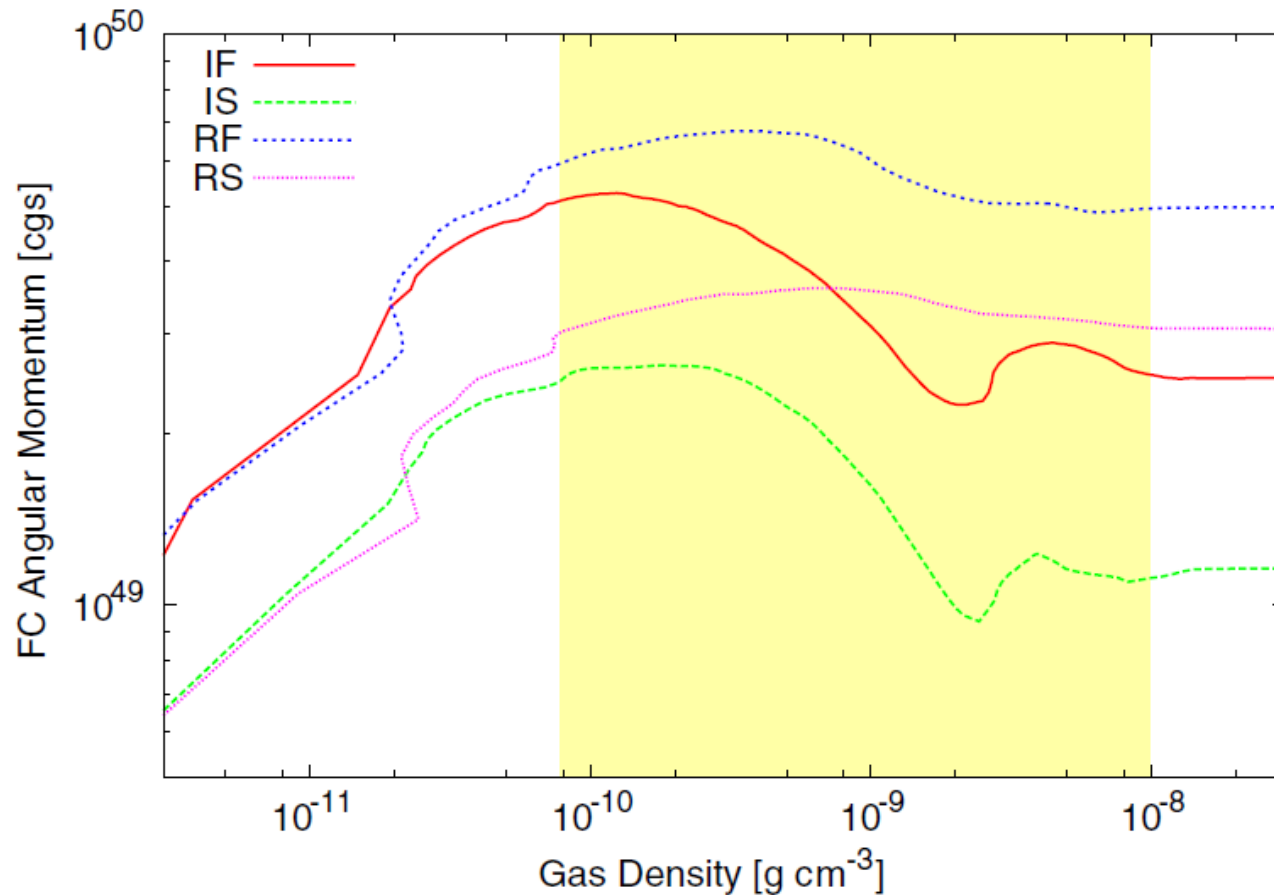
First Core : 中心密度 $10^{-12} \text{ g cm}^{-3}$ 以上

仮定・初期条件

- 孤立した太陽質量程度の分子雲コアの収縮を考える
- 初期温度 10K
- 初期中心密度 $10^{-18} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- 初期半径 8800AU
- 重力と磁気圧の比 3.8
- 自由落下速度と回転速度の比 0.023, 0.046
- 前のページのオーム抵抗

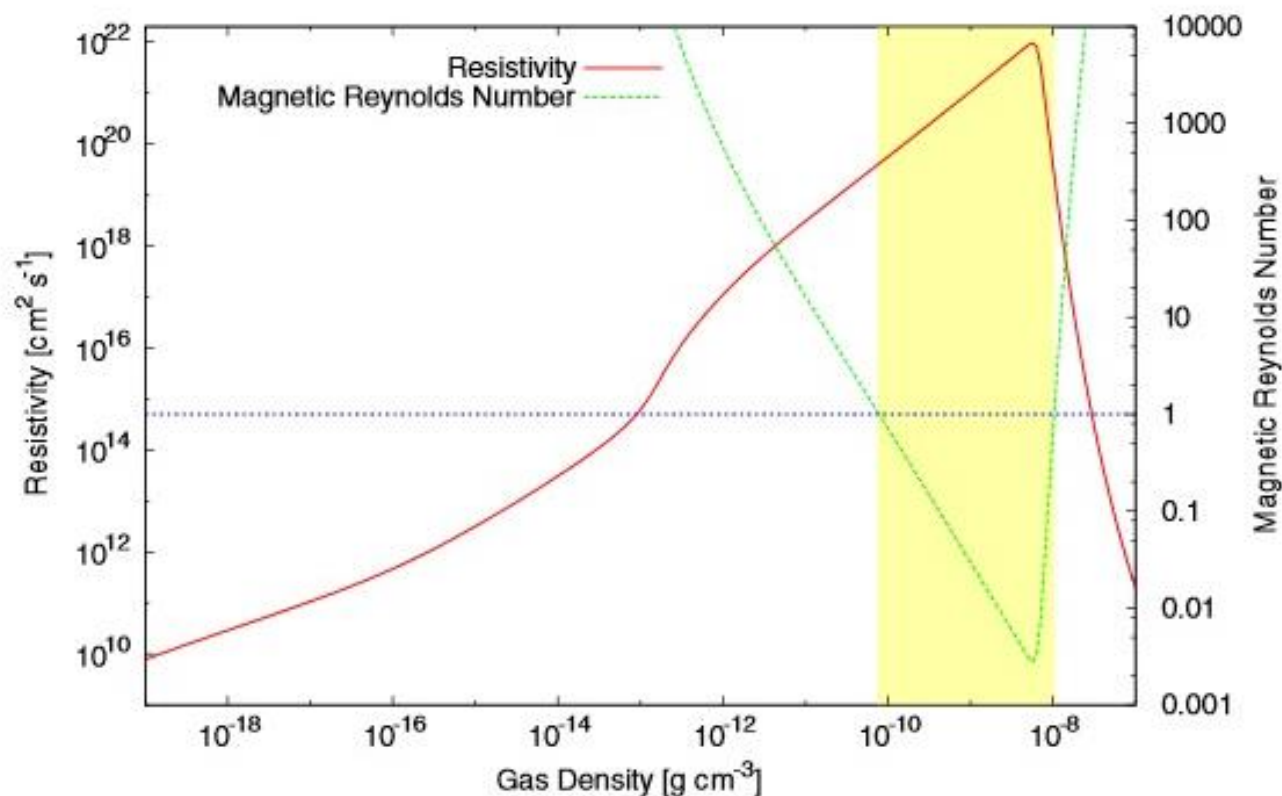
これらの条件で、オーム抵抗の効果がある場合とない場合で基本方程式を計算する

結果 First Coreの角運動量



First Core : 中心密度 $10^{-12} \text{ g cm}^{-3}$ 以上

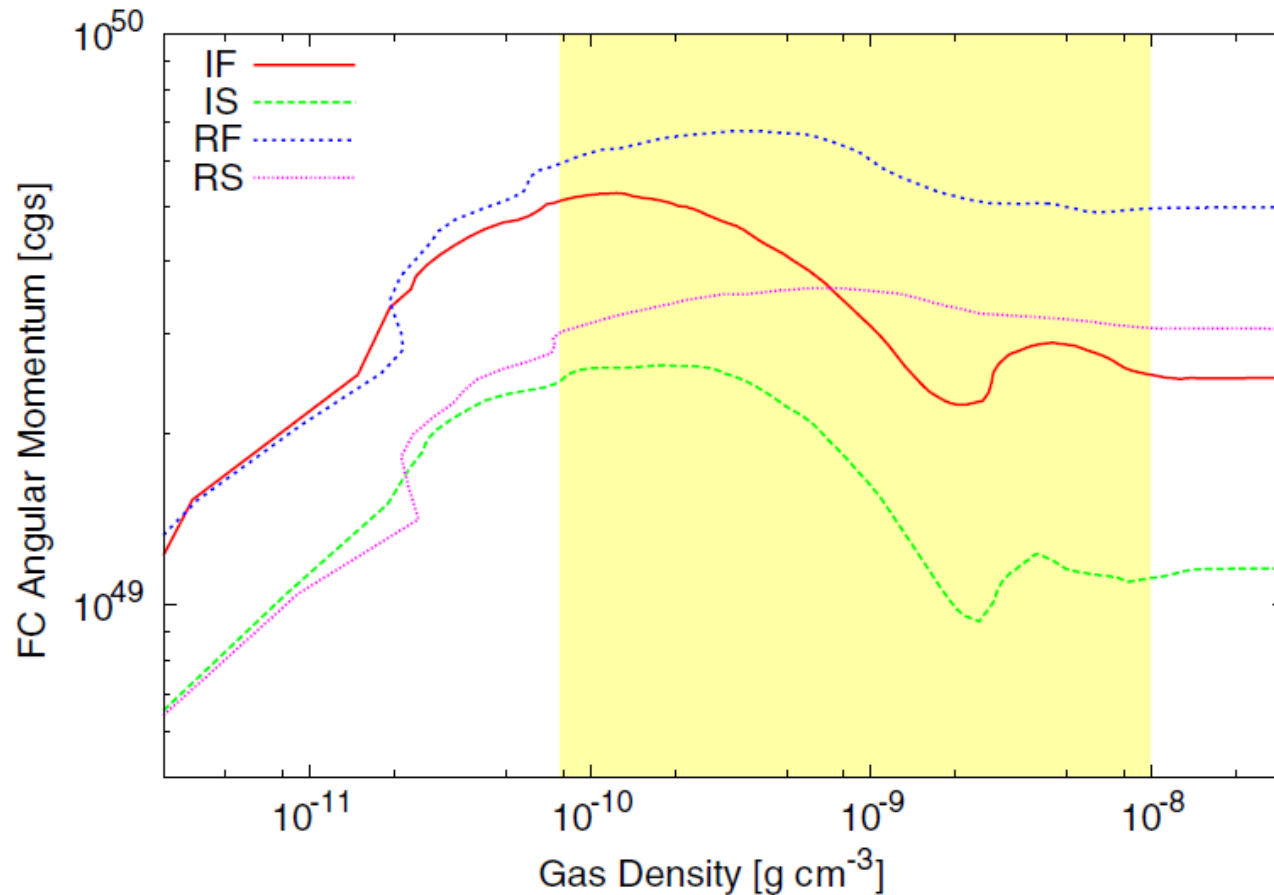
磁気レイノルズ数とオーム抵抗の関係



$R_m \geq 1$ オーム抵抗は無視

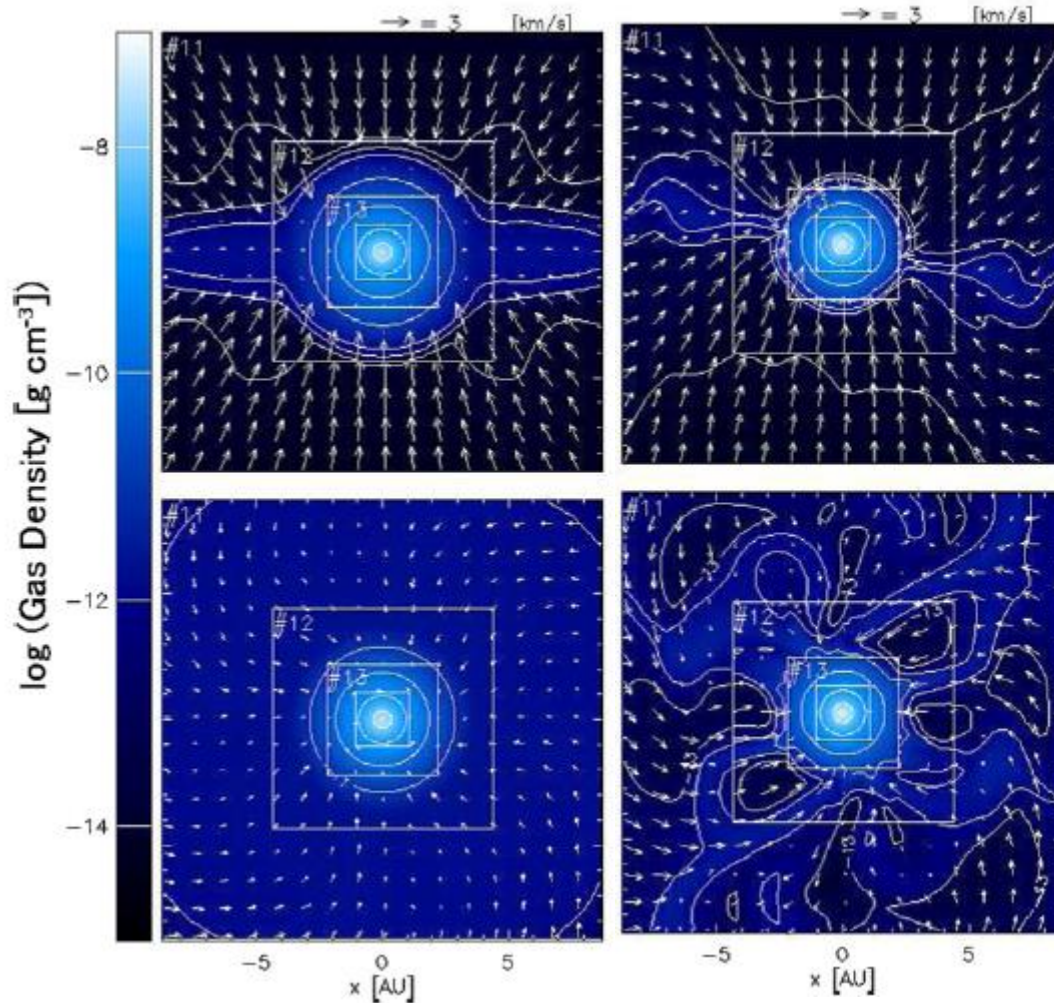
$R_m \leq 1$ オーム抵抗が無視できない

結果 First Coreの角運動量



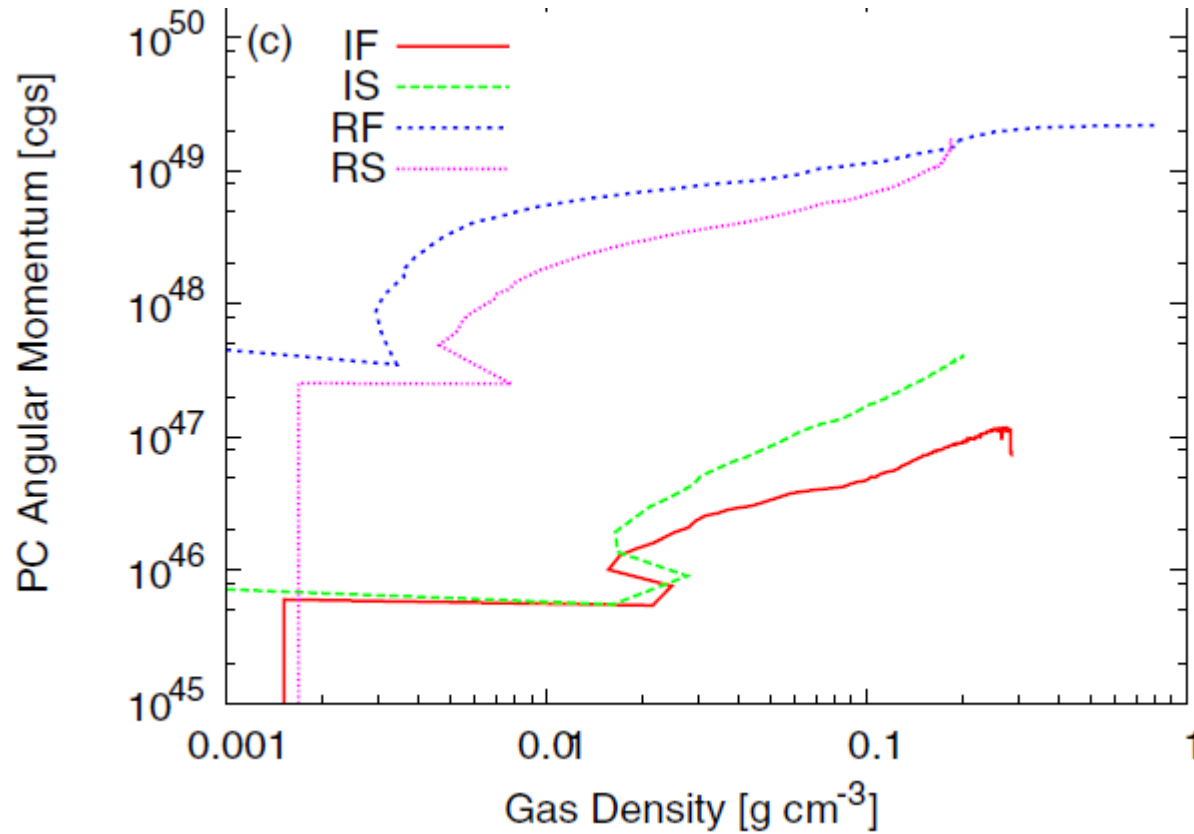
First Core : 中心密度 $10^{-12} \text{ g cm}^{-3}$ 以上

First Coreの収縮が終わった段階

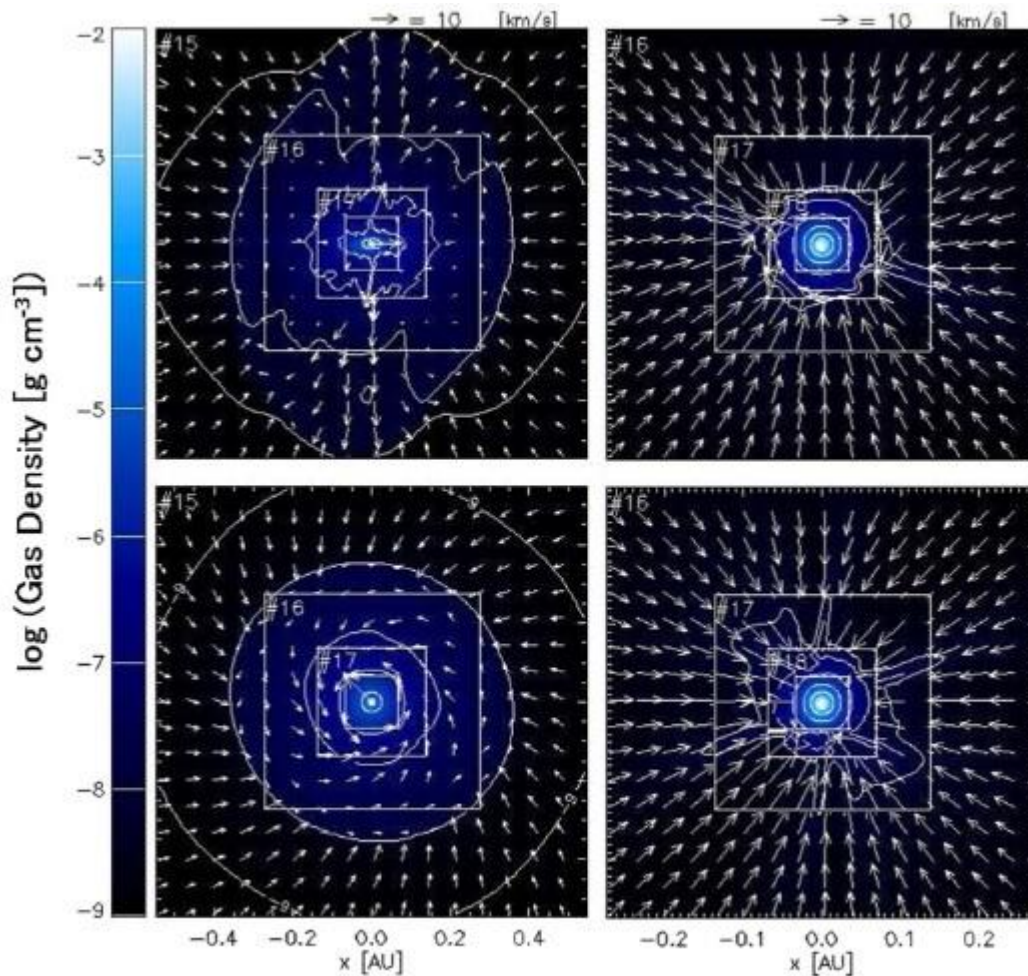


左側は、オーム抵抗の効果を含む結果。右側は、オーム抵抗の効果を含まない結果。右左それぞれ、上段は、回転軸を含む面、下段は、回転軸に垂直な面の密度断面図を示している。

Protostellar Coreの角運動量



Protostellar Core形成段階



左側がオーム抵抗含む結果。

右側がオーム抵抗含まない結果。

左右、それぞれ上段は、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。

まとめ

- オーム抵抗を含めない磁気流体力学効果を考慮すると、角運動量輸送の効率が良すぎて原始星形成時に星周円盤が形成されない
- オーム抵抗の効果を含めて考慮すると、角運動量輸送が抑制され、原始星の周りに円盤が形成される
- アウトフローも見られる