

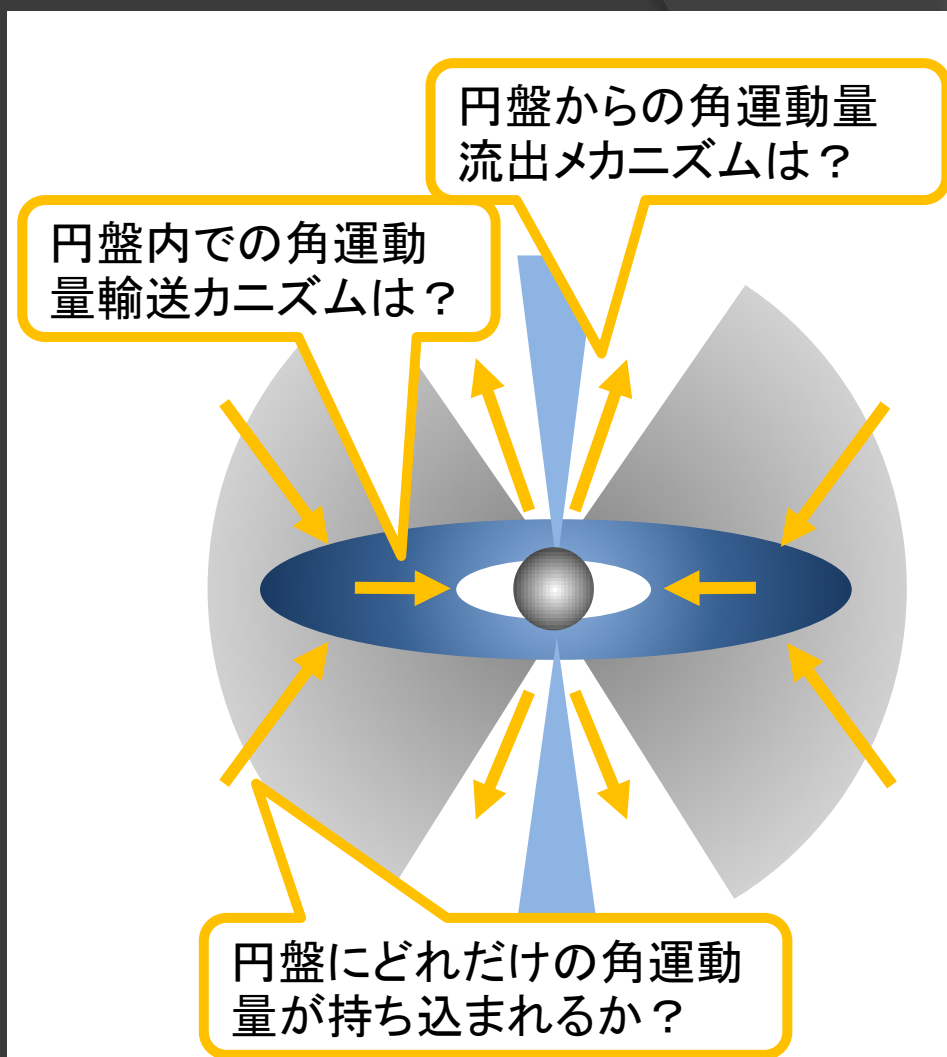
# 原始惑星系円盤の 形成と初期進化

塚本裕介  
鹿児島大学

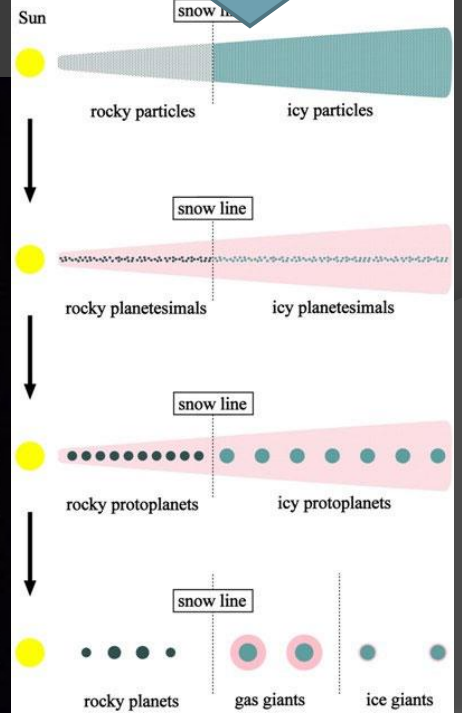
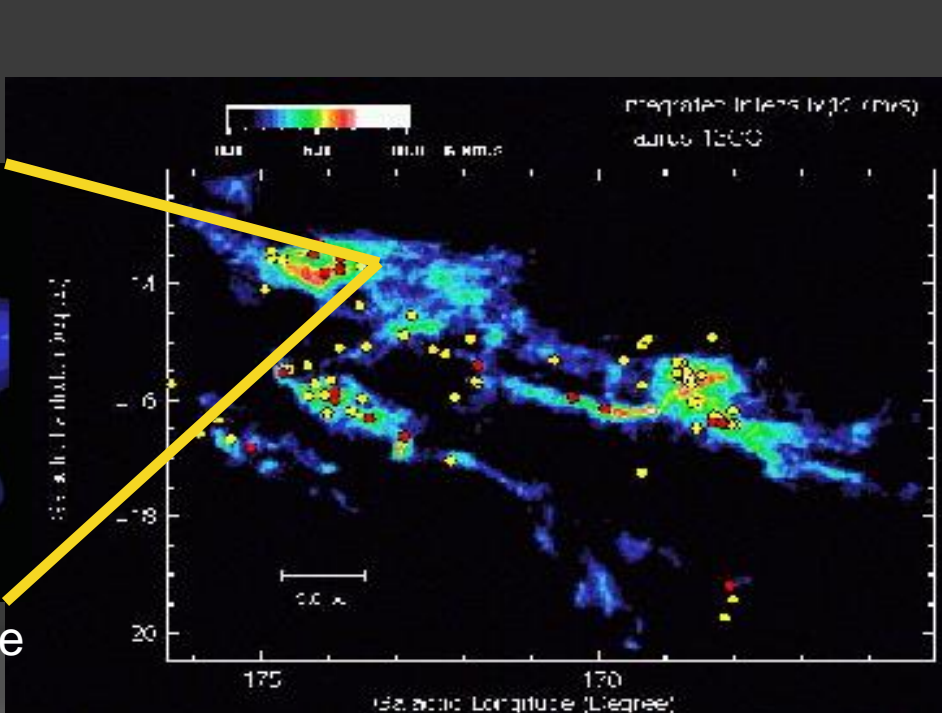
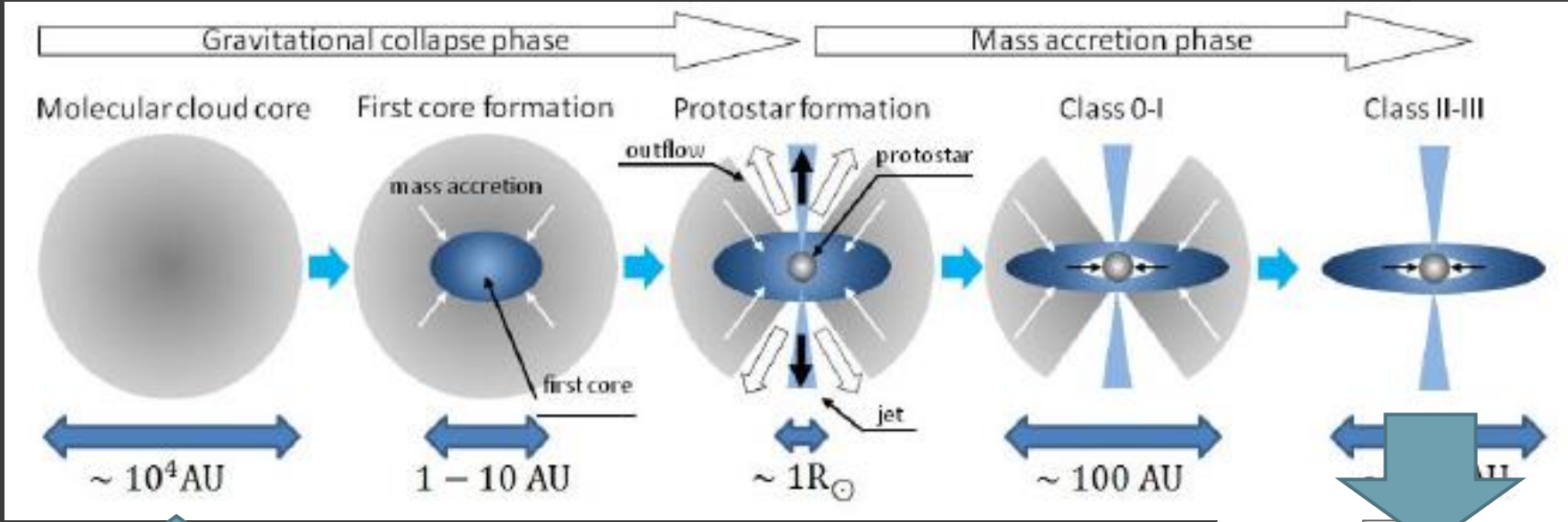


# 原始惑星系円盤研究の意義

- ◎ 惑星形成の初期条件を知りたい
    - 僕が学生の頃から、惑星形成の研究は初期条件の不定性が大きい
- 結局、円盤の形成進化を考察せざるを得ないと初回の研究会に出て強く感じた
- ◎ 原始惑星系円盤の(初期)進化がわかるとは
    1. 円盤への降着流の角運動量 進化の解明
      - 磁気ブレーキング
    2. 円盤内角運動量輸送メカニズムの決定
      - 磁気回転不安定性、自己重力不安定性、vertical shear instability など
    3. 円盤から外への角運動量輸送
      - アウトフロー、磁気ブレーキング、円盤風



# 原始星、原始惑星系円盤の形成進化過程



# 円盤形成/初期進化における磁気ブレーキの重要性

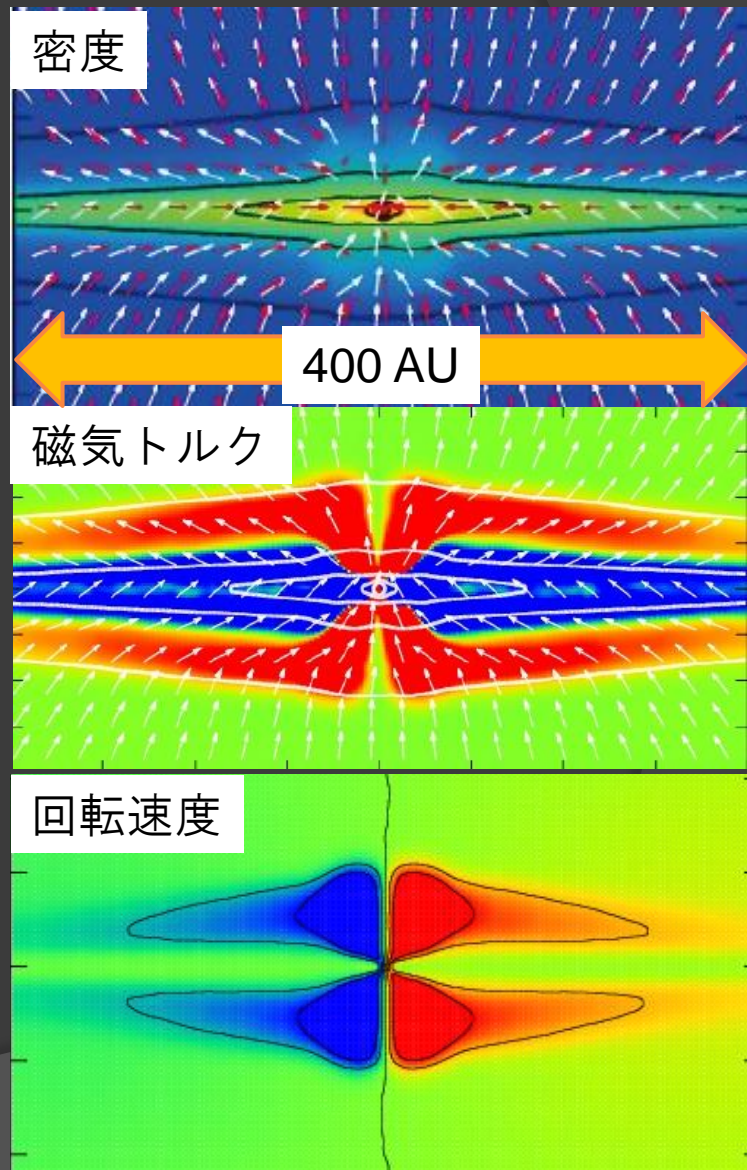
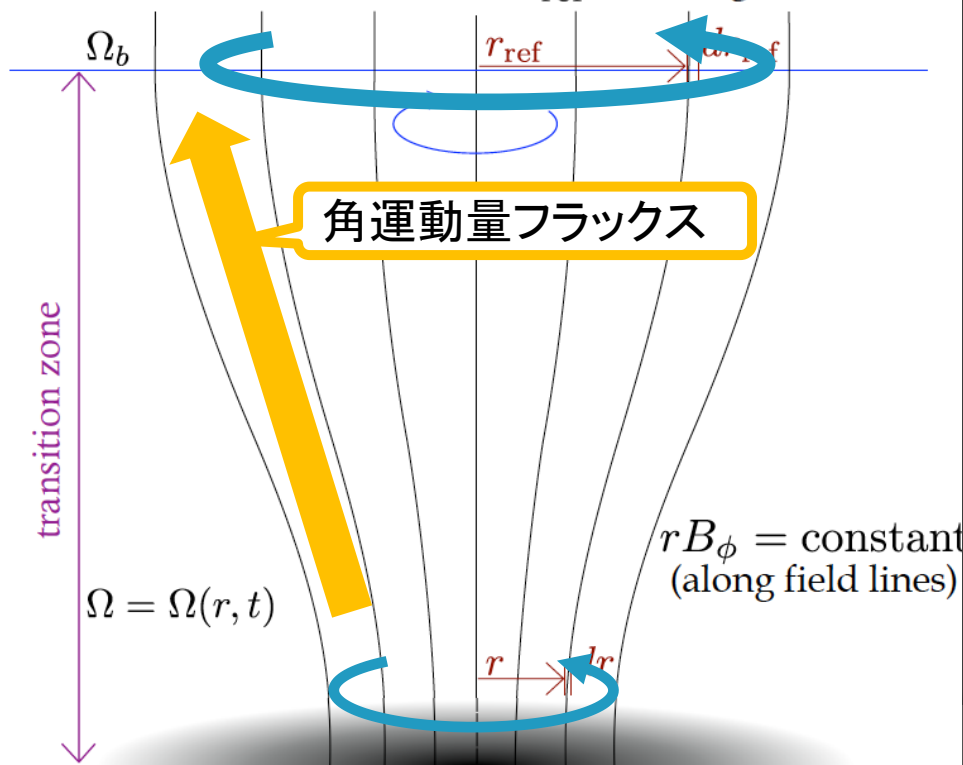
- 磁気ブレーキ:

磁気張力によって角運動量を上空に輸送するメカニズム

- 磁気ブレーキの時間スケール(Mouschovias+85)

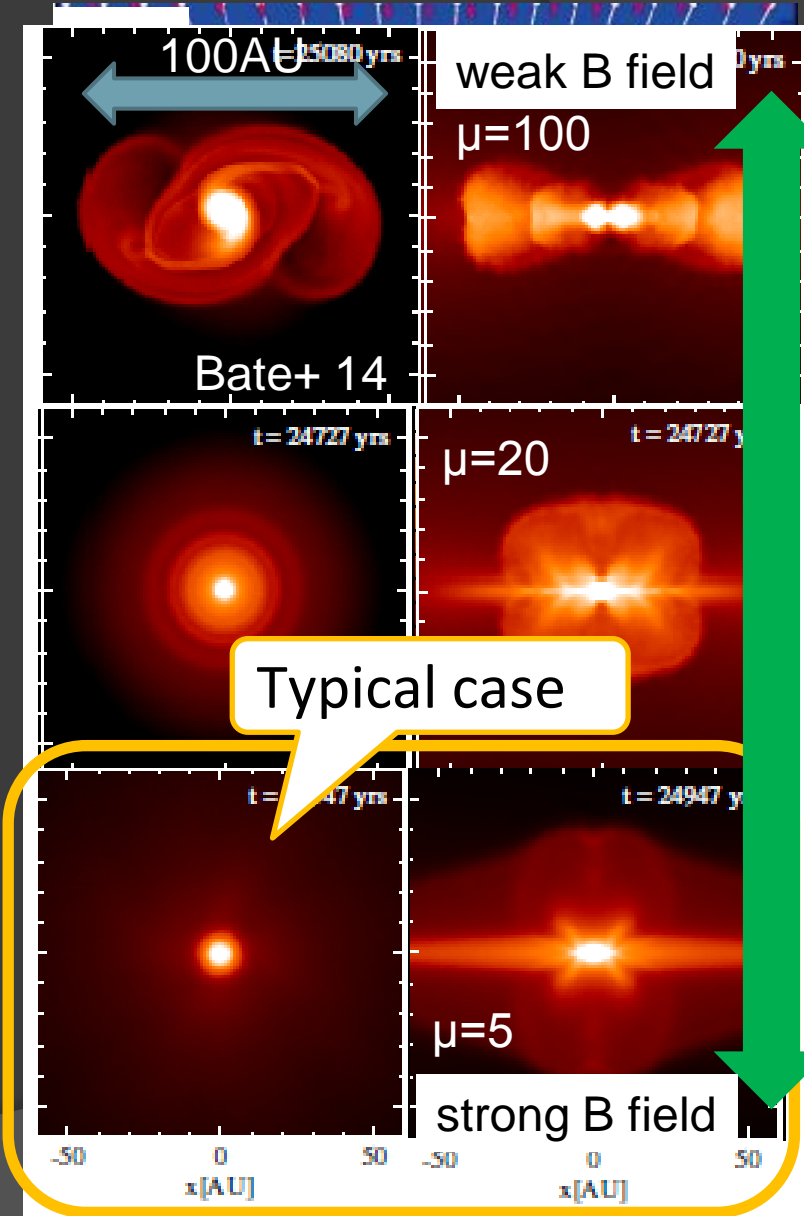
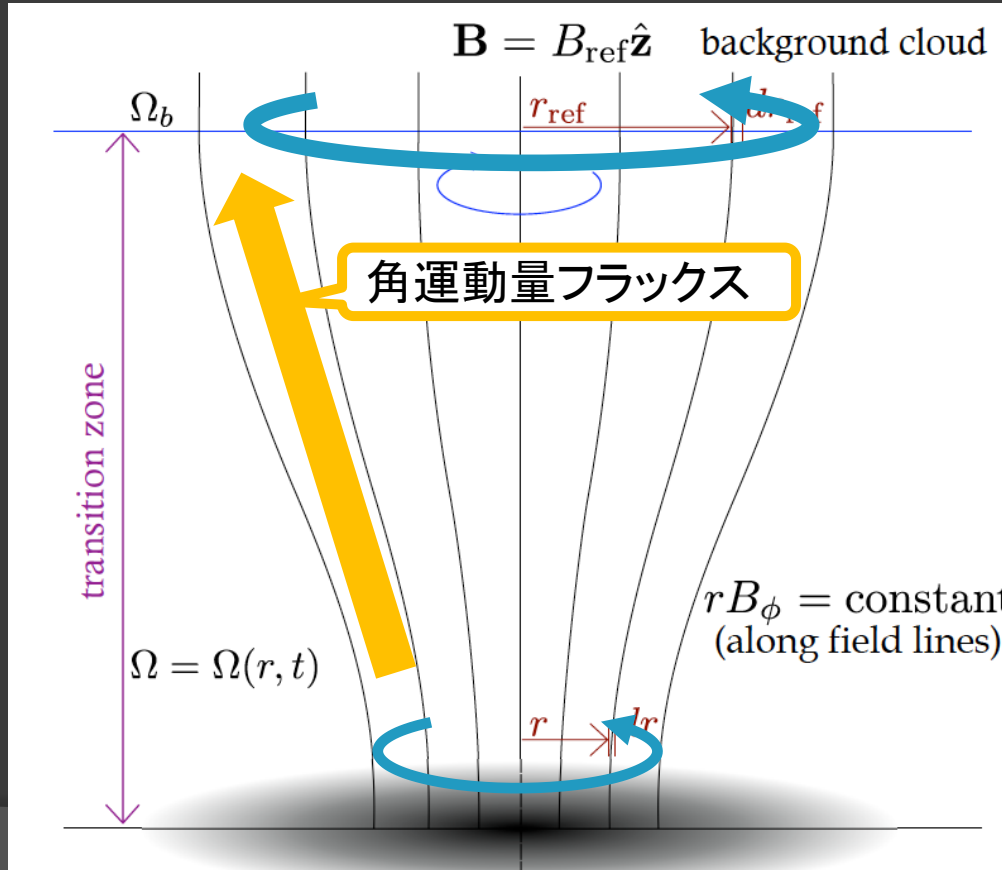
$$t_b = \left( \frac{\pi}{\rho_{\text{ext}}} \right)^{1/2} \left( \frac{M}{\Phi} \right) \left( \frac{R_c}{R_{\text{ext}}} \right)^2$$

$\mathbf{B} = B_{\text{ref}} \hat{\mathbf{z}}$  background cloud



# 円盤形成/初期進化における磁気ブレーキの重要性

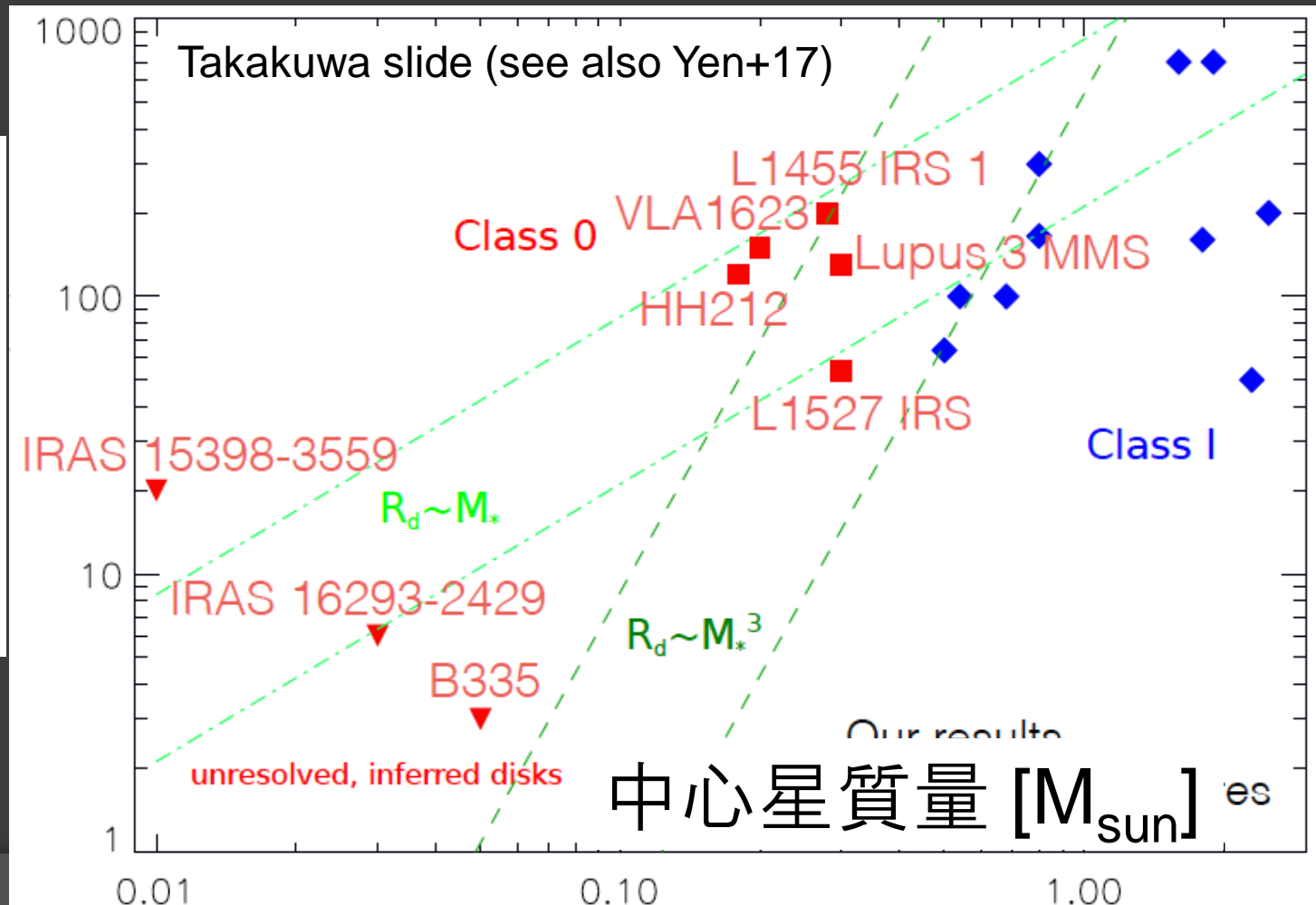
- 磁気ブレーキによって円盤の形成が抑制される
- magnetic braking catastrophe (MBC)



# Class 0/I YSOs中の原始惑星系円盤

- 00年代ではMBCによって円盤は(少なくともClass 0では)形成しないと考えられていた (e.g., Mellon+08、Li+11)
  - 10年代にALMAによってClass 0中に半径100AU程度の円盤を発見
- 理論研究になんらかの不備があった

円盤半径 [AU]

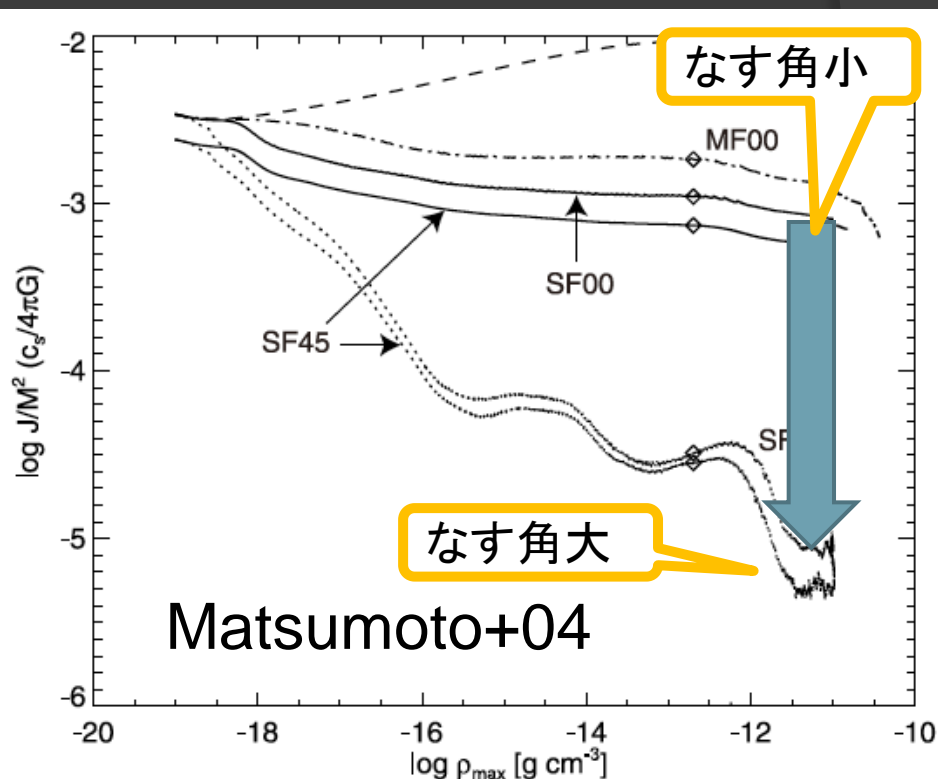
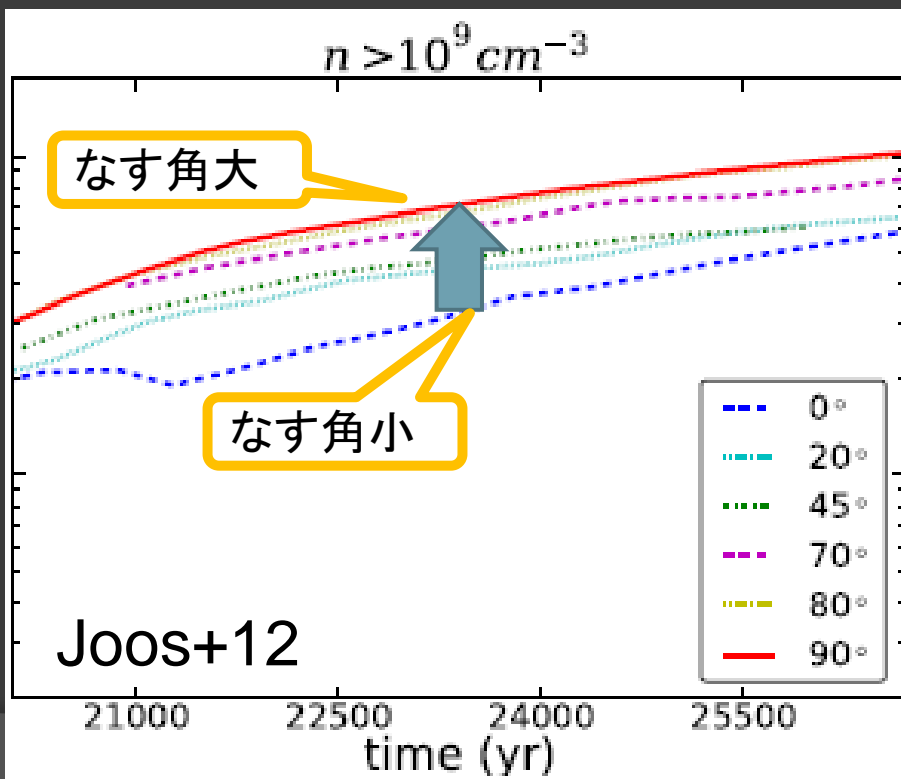
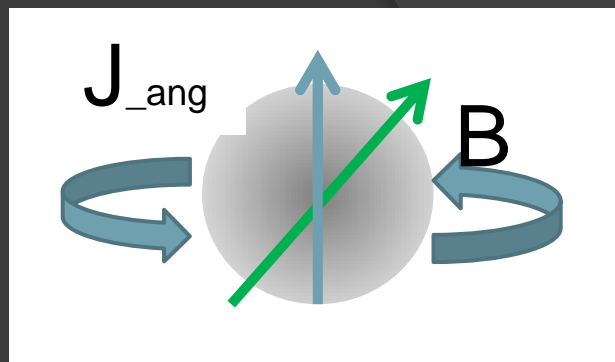


# MBCを解決するメカニズム

- ◎ 提案されてきたメカニズム
    1. 分子雲コアの磁場と角運動量のmisalignment
    2. 非理想MHD効果
    3. (分子雲コア内乱流)
  - ◎ 日本では2によって円盤がClass0からできるというのがコンセンサス
  - ◎ 世界的には1 (と3)が信じられている
- しかし、1のメカニズムは先行研究間でinconsistent

# 磁場と角運動量のmisalignmentの先行研究

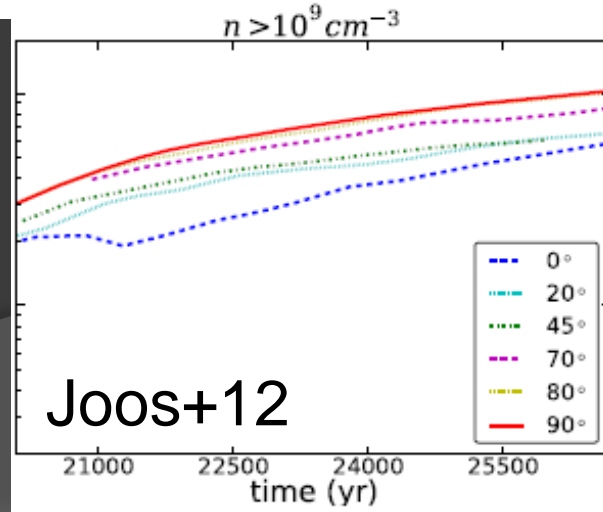
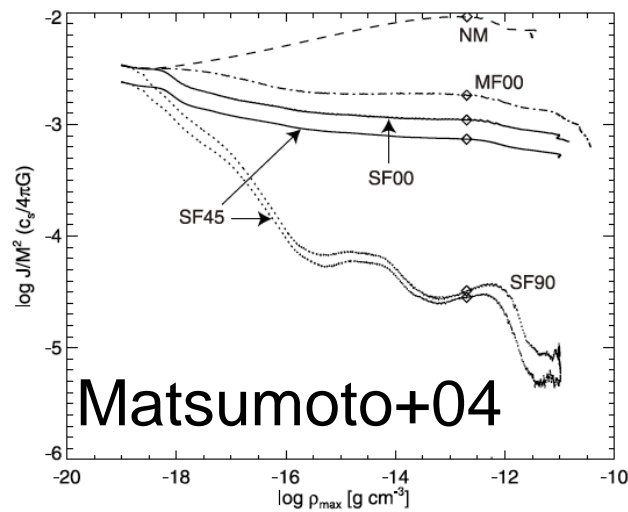
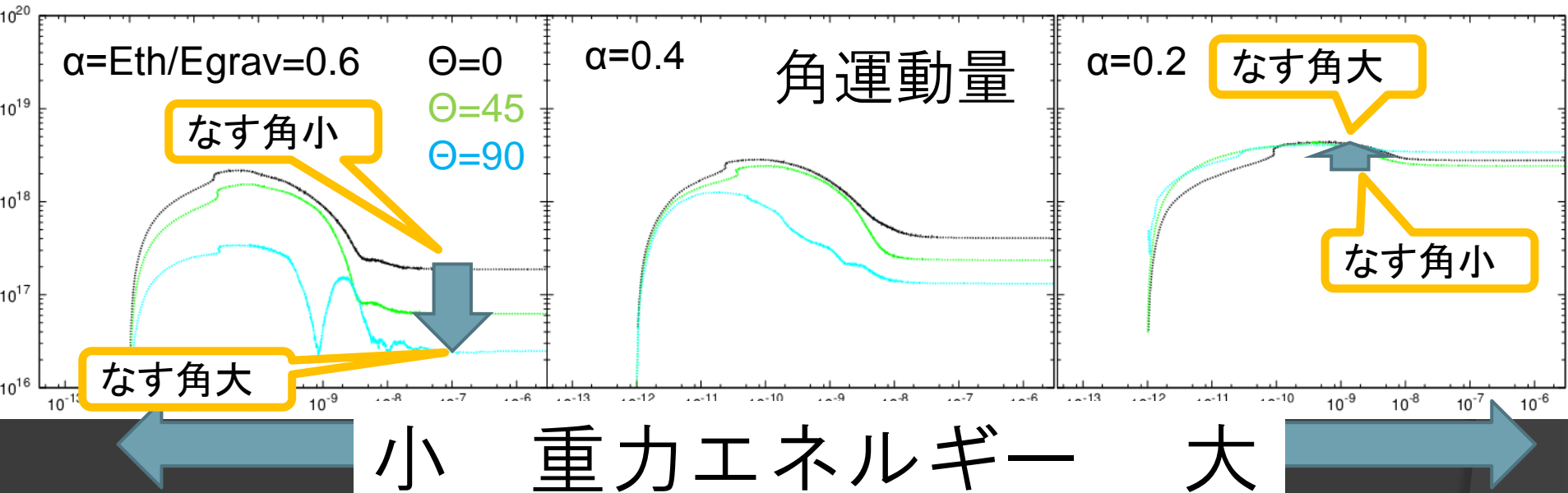
- 磁場と角運動量のなす角が**大きくなると磁気ブレーキの効率が下がる**  
(Hennebell+09, Joos+12)
- 磁場と角運動量のなす角が**大きくなると磁気ブレーキの効率が上がる**  
(Moschouvious+85, Matsumoto+04)





# 先行研究のincosistencyの原因

- 先行研究のincosistencyは初期分子雲コアの重力エネルギーの違いに起因？(Tsukamoto+ in prep)



# MBCを解決するメカニズム

## ◎ 提案されてきたメカニズム

1. 分子雲コアの磁場と角運動量のmisalignment
2. 非理想MHD効果
3. (分子雲コア内乱流)

## ◎ 日本では2によって円盤形成がClass0からできるというのがコンセンサス

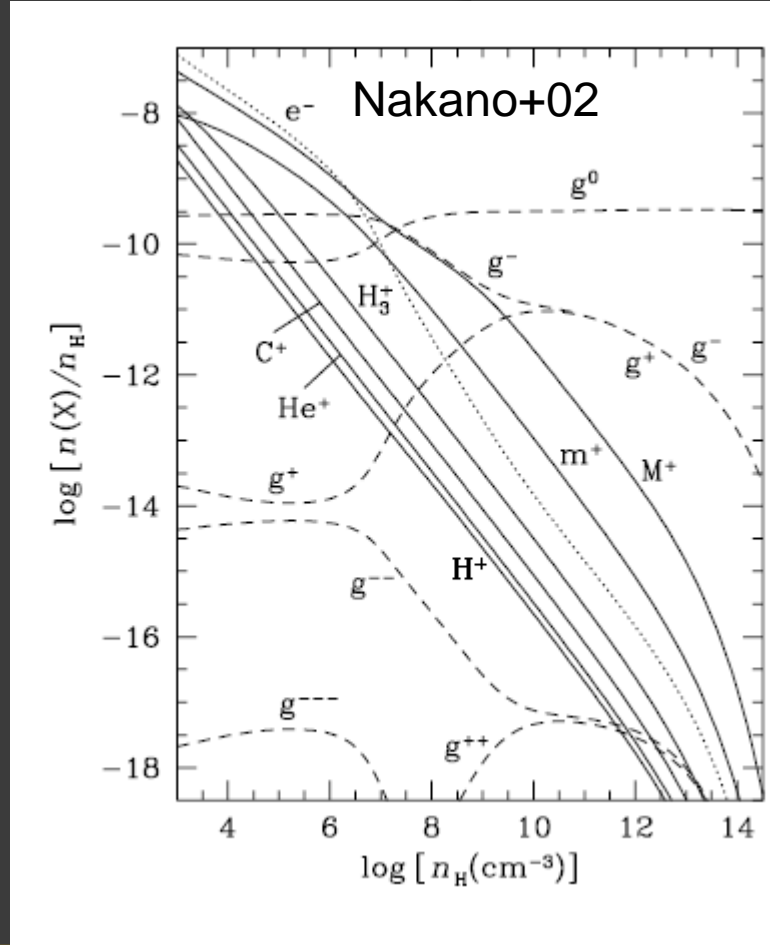
## ◎ 世界的には1 (と3)が信じられている

- ALMAのプロポーザルは1を検証するというものがたくさんある(らしい)

→しかし1のメカニズムは先行研究間でinconsistent

# 非理想MHD効果の重要性

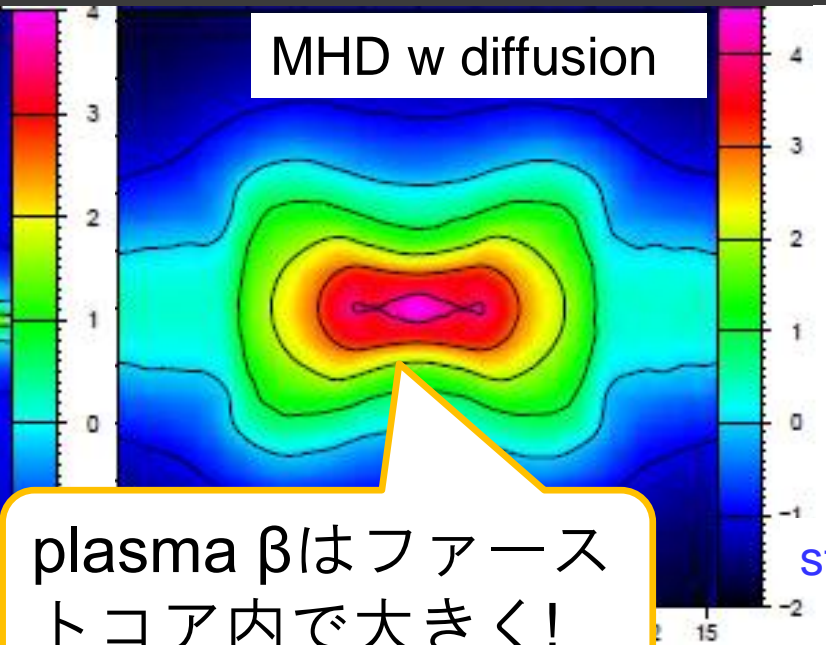
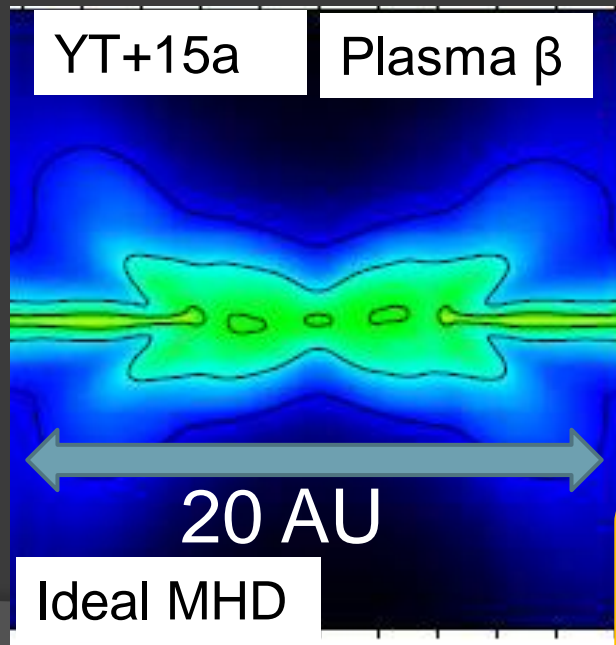
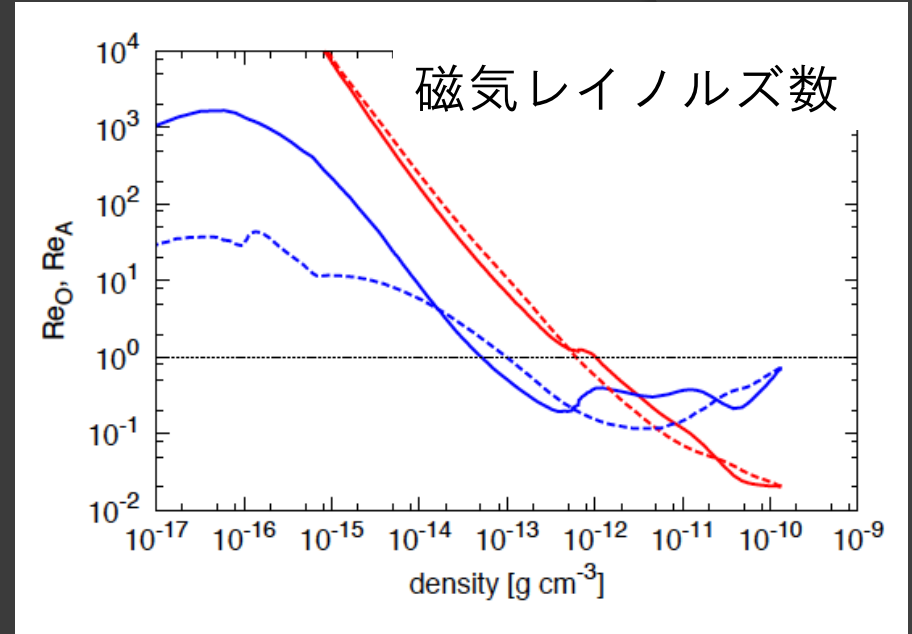
- ◎ 分子雲コア内のガスの電離度は非常に低い
- 理想MHD近似(抵抗値=0)は正しくなく、有限の電気抵抗を持つ (e.g., Nakano+02).
- ◎ 有限の抵抗の効果=非理想効果
- ◎ 非理想効果
  - オーム散逸 & 両極性散逸
    - 磁場とガスをdecouple
  - ホール効果:
    - ガスに回転を誘導する



$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = & \boxed{\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})} \quad \text{理想MHD項} \\
 & - \nabla \times \left\{ \boxed{\eta_O (\nabla \times \mathbf{B})} + \eta_H (\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}} - \boxed{\eta_A (\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}} \times \hat{\mathbf{B}}} \right\} \quad \text{オーム散逸} \quad \text{両極性散逸}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

# 中心領域における磁気散逸の効果

- ◎ 中心領域の密度が  $10^{-13} \text{g cm}^{-3}$  (ファーストコアの密度領域) に達すると磁場とガスがdecouple
  - ◎ 磁束が抜け磁場強度が下がる
- 磁気ブレーキによる角運動量輸送が利かなくなる



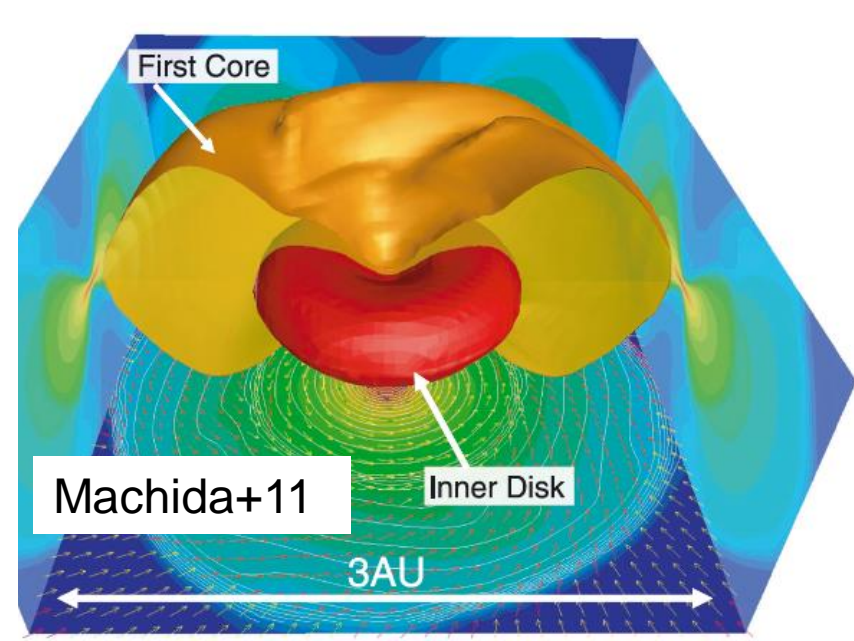
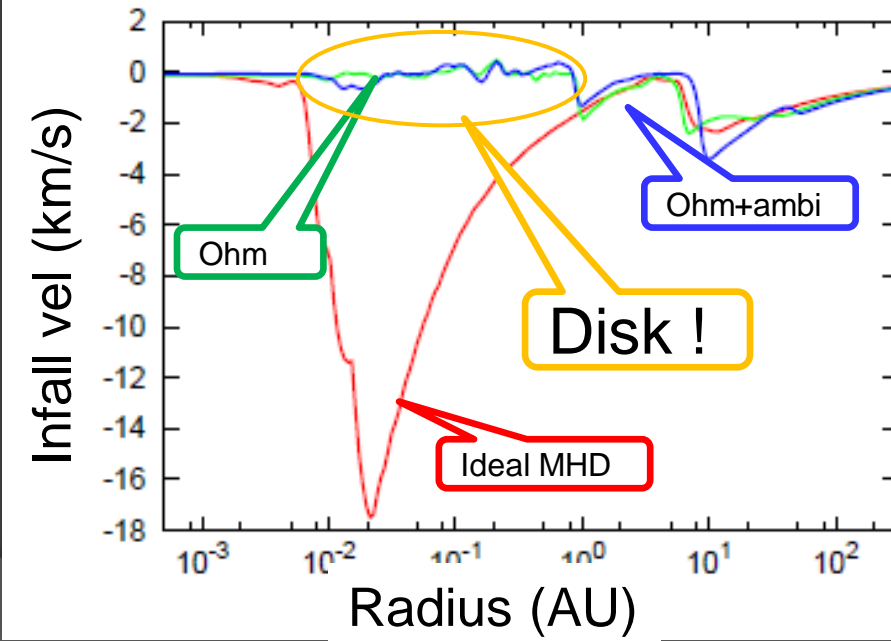
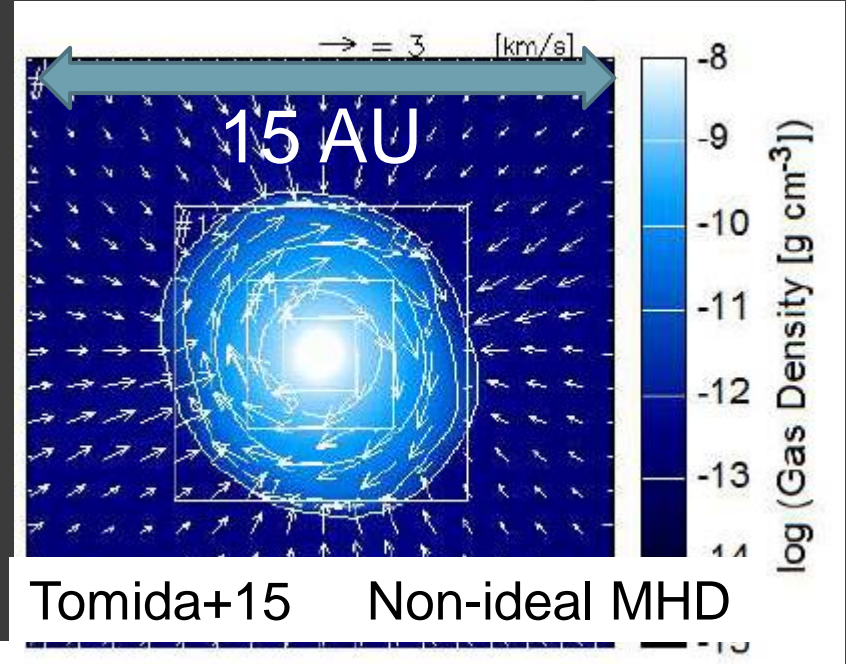
weak B field

$$\beta = \frac{P_{gas}}{P_{mag}}$$

strong B field

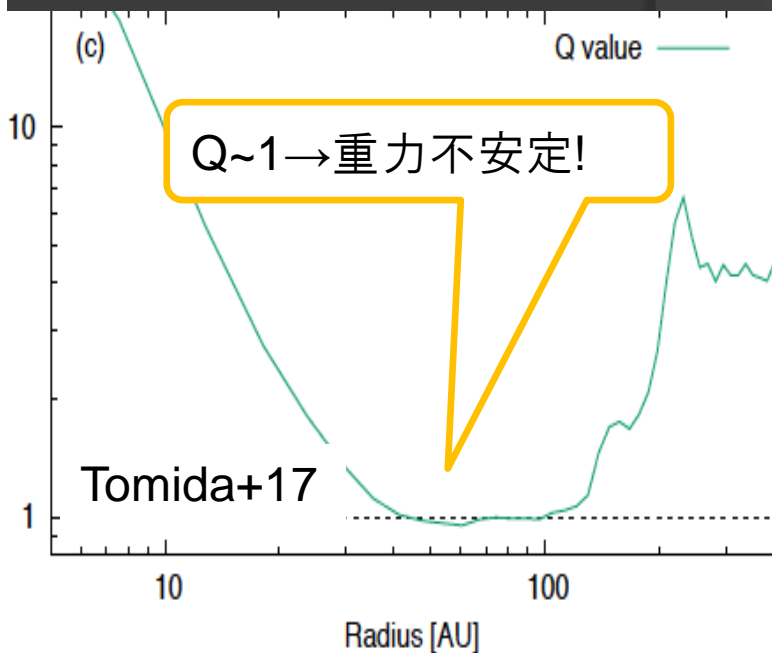
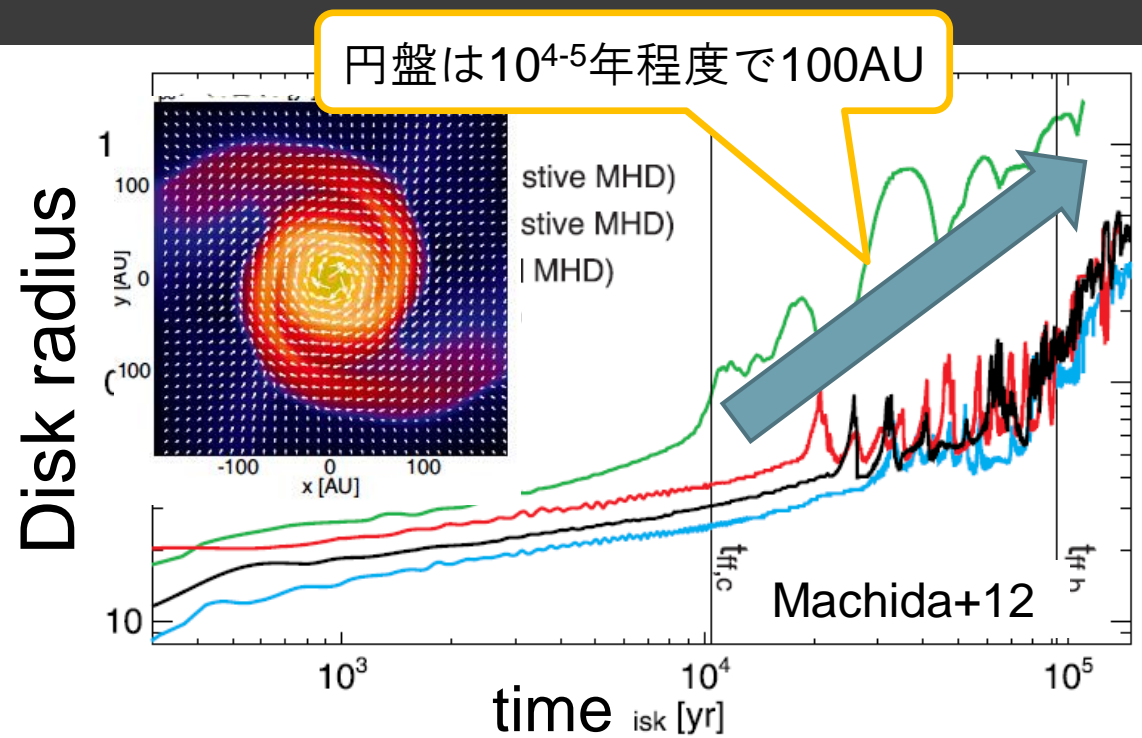
# ファーストコア内での円盤の形成

- ◎ 円盤は原始星形成直後にファーストコア内で形成
  - ファーストコア内は磁場が弱く、ガスと磁場が decouple
    - 円盤形成の安全地帯
- ◎ 形成直後の円盤サイズは1-10AU程度



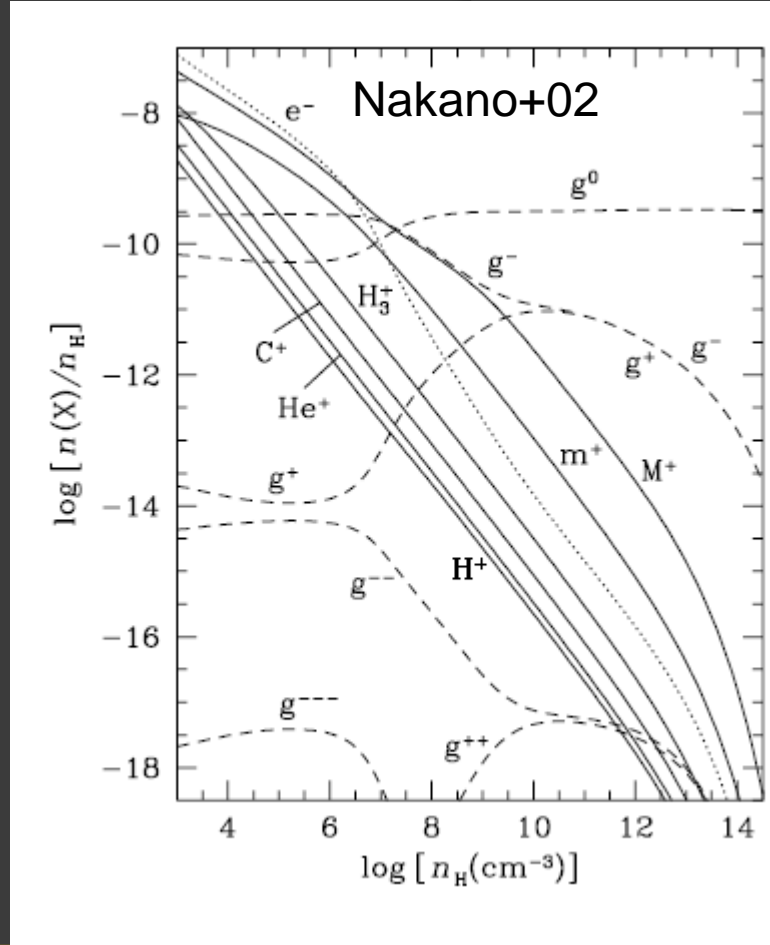
# 原始星形成後の円盤進化

- ◎ 円盤は $10^4$ - $10^5$ 年程度で100AU程度まで成長
  - 磁気ブレーキは円盤から上空への角運動量輸送
  - 上空のガス密度が下がるにしたがって磁気ブレーキが利かなくなる
- ◎ 円盤は重く自己重力不安定が角運動量輸送を担う



# 非理想MHD効果の重要性

- ◎ 分子雲コア内のガスの電離度は非常に低い
- 理想MHD近似(抵抗値=0)は正しくなく、有限の電気抵抗を持つ (e.g., Nakano+02).
- ◎ 有限の抵抗の効果=非理想効果
- ◎ 非理想効果
  - オーム散逸 & 両極性散逸
    - 磁場とガスをdecoupleさせ
  - ホール効果:
    - ガスに回転を誘導する

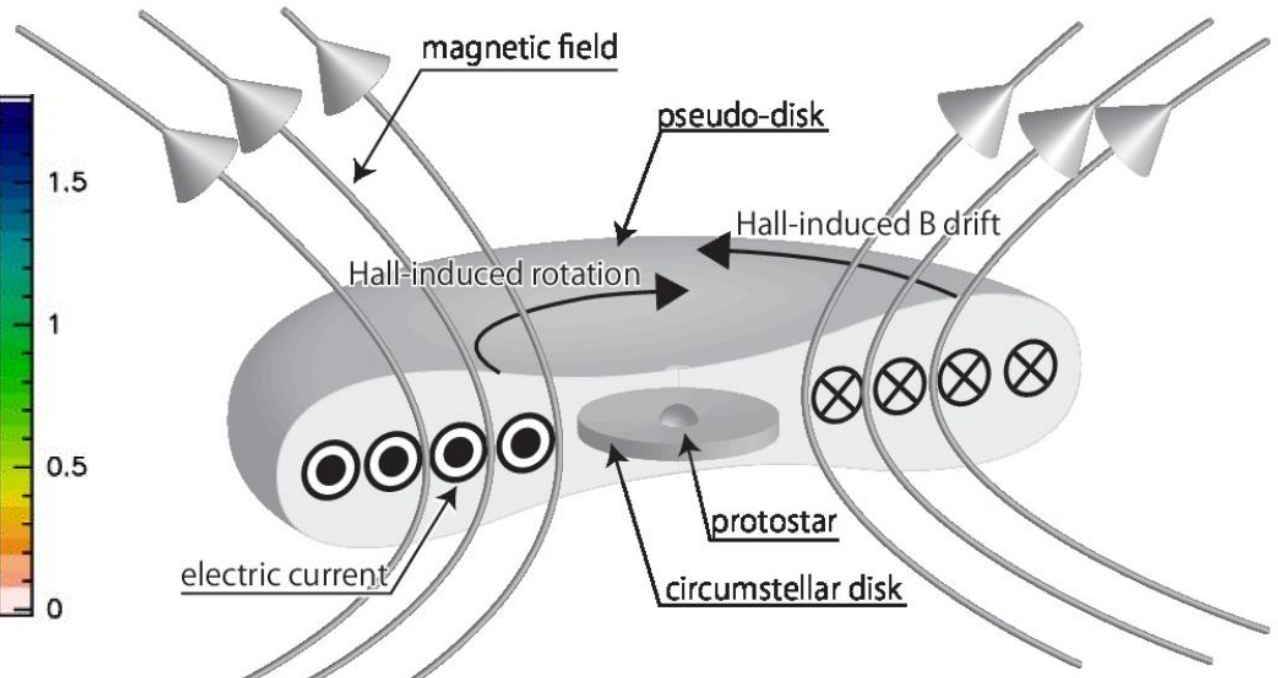
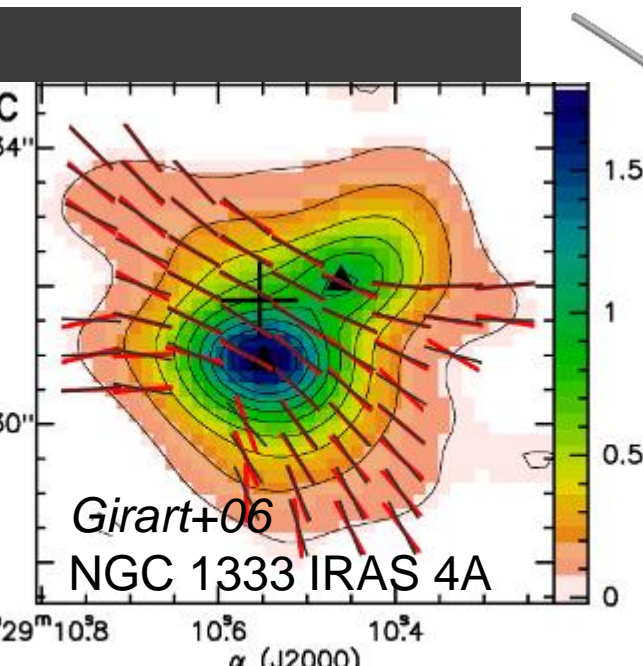


$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = & \boxed{\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})} \quad \text{理想MHD項} \\
 & - \nabla \times \left\{ \eta_O (\nabla \times \mathbf{B}) + \boxed{\eta_H (\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}}} \quad \text{ホール効果} - \eta_A (\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}} \times \hat{\mathbf{B}} \right\}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

# ホール効果による回転の誘起

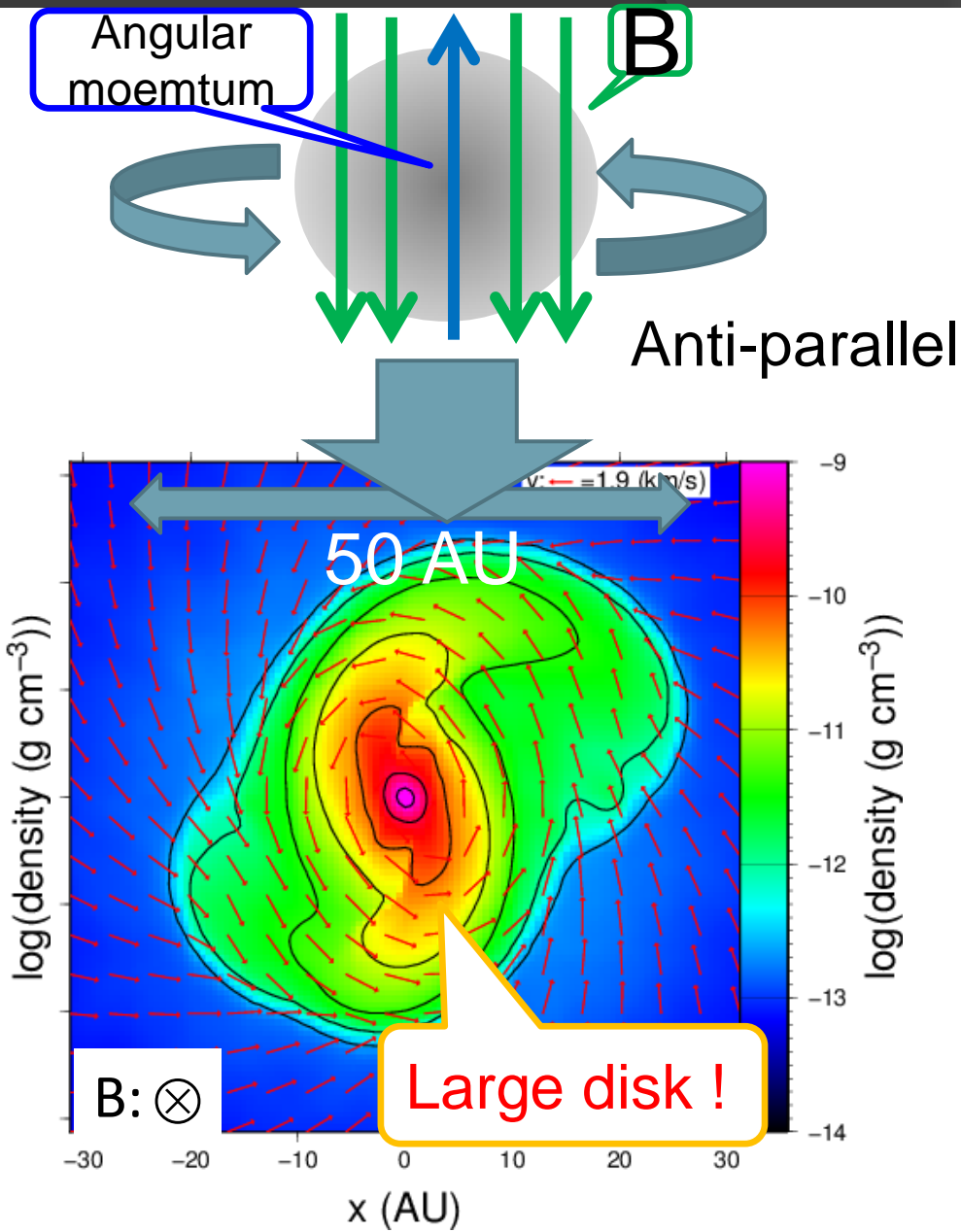
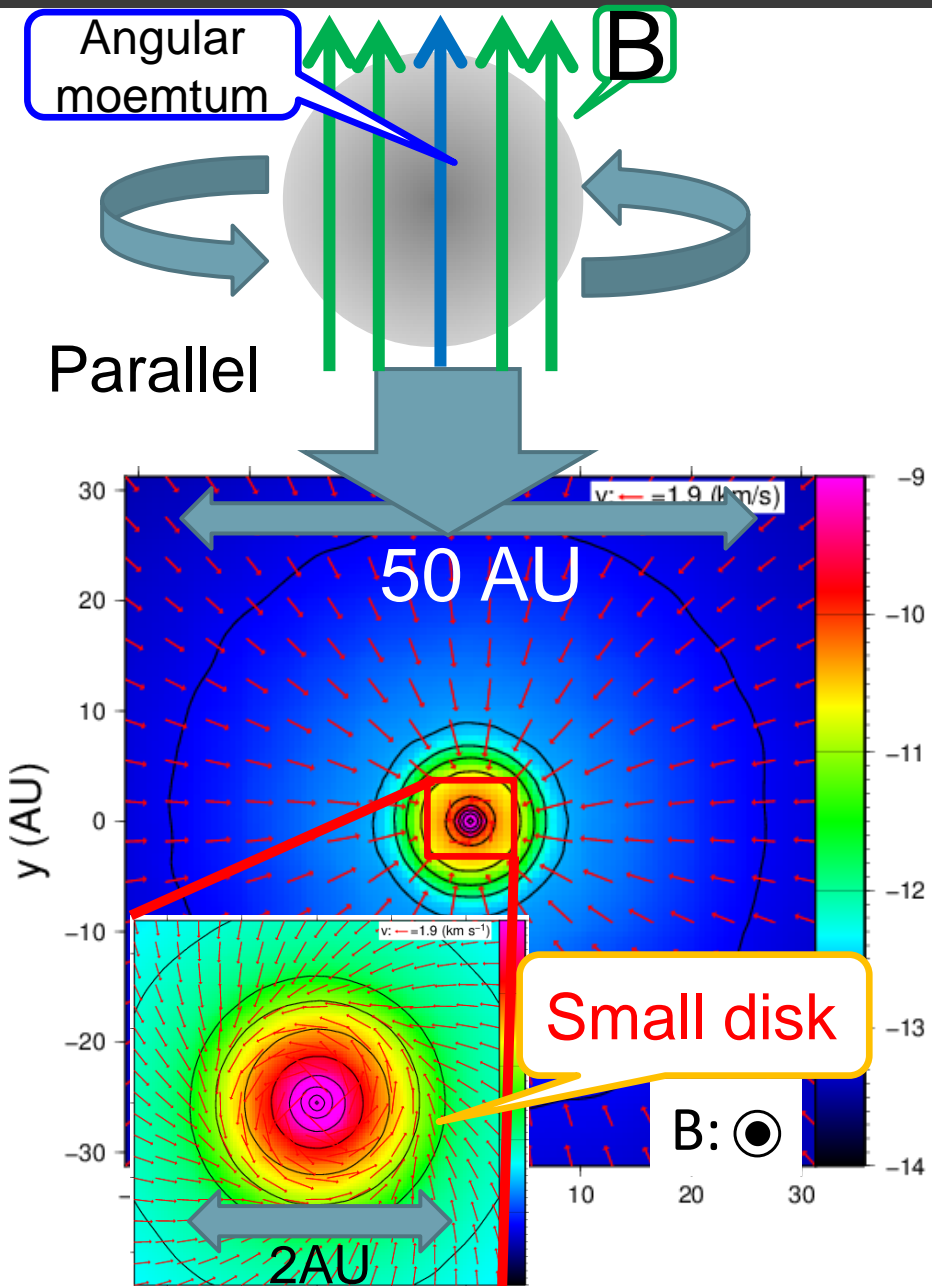
$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ &- \nabla \times \left( \eta_H (\nabla \times \mathbf{B}) \times \hat{\mathbf{B}} \right) \\ &= \nabla \times \{ (\mathbf{v} + \mathbf{v}_{\text{Hall}}) \times \mathbf{B} \} \\ \mathbf{v}_{\text{Hall}} &= -\eta_H \frac{(\nabla \times \mathbf{B})}{|\mathbf{B}|} = -\eta_H \frac{c\mathbf{J}}{4\pi|\mathbf{B}|} \end{aligned}$$

ホール効果によって電流の方向に磁場が引きずられる  
 →磁場に対して左ねじの方向に回転を誘起



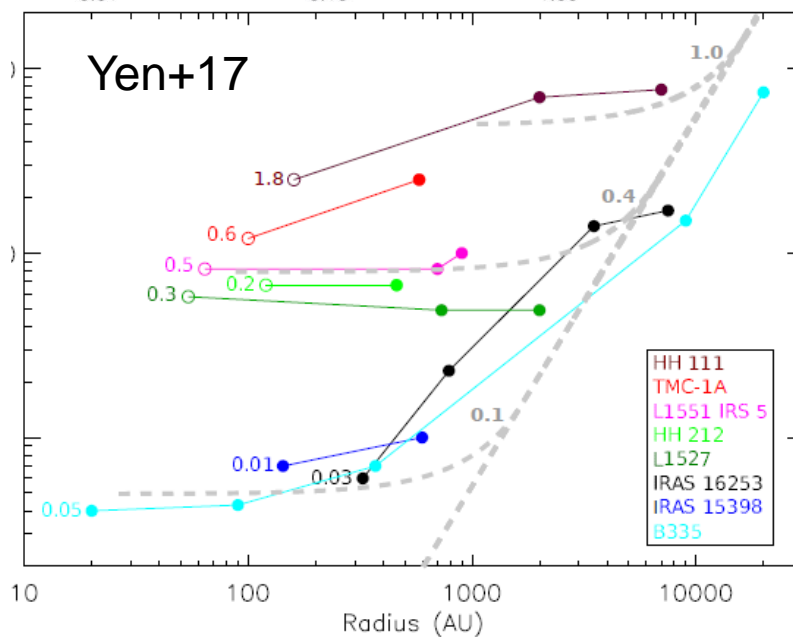
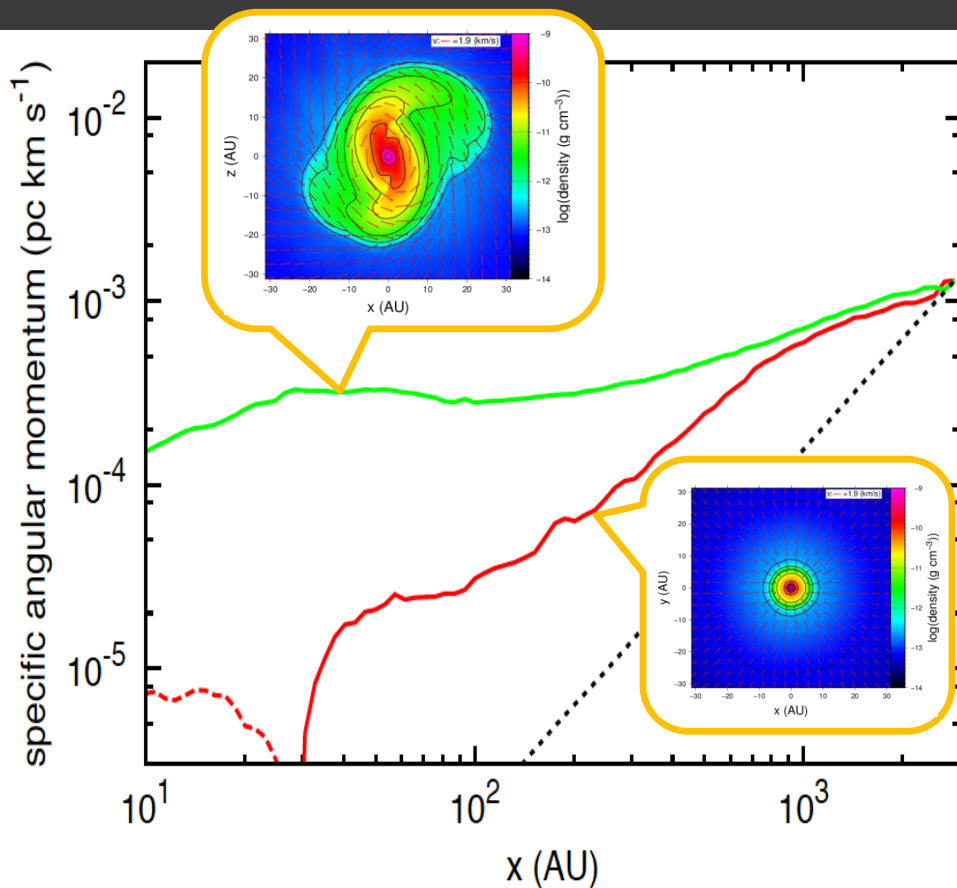
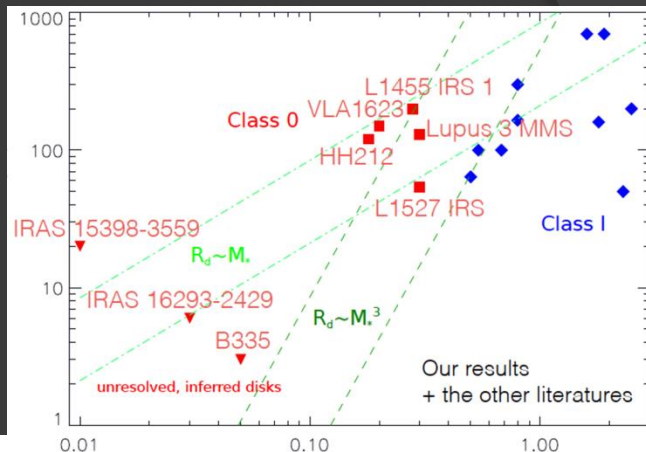


# ホール効果が誘起する円盤サイズの違い



# 平行/反平行コア内角運動量分布の違いと観測との比較

- 平行/反平行で数100AUスケールで比角運動量分布に有意な違い(~10倍)
- Class 0YSOsの半径、エンベロープの比角運動量と整合的

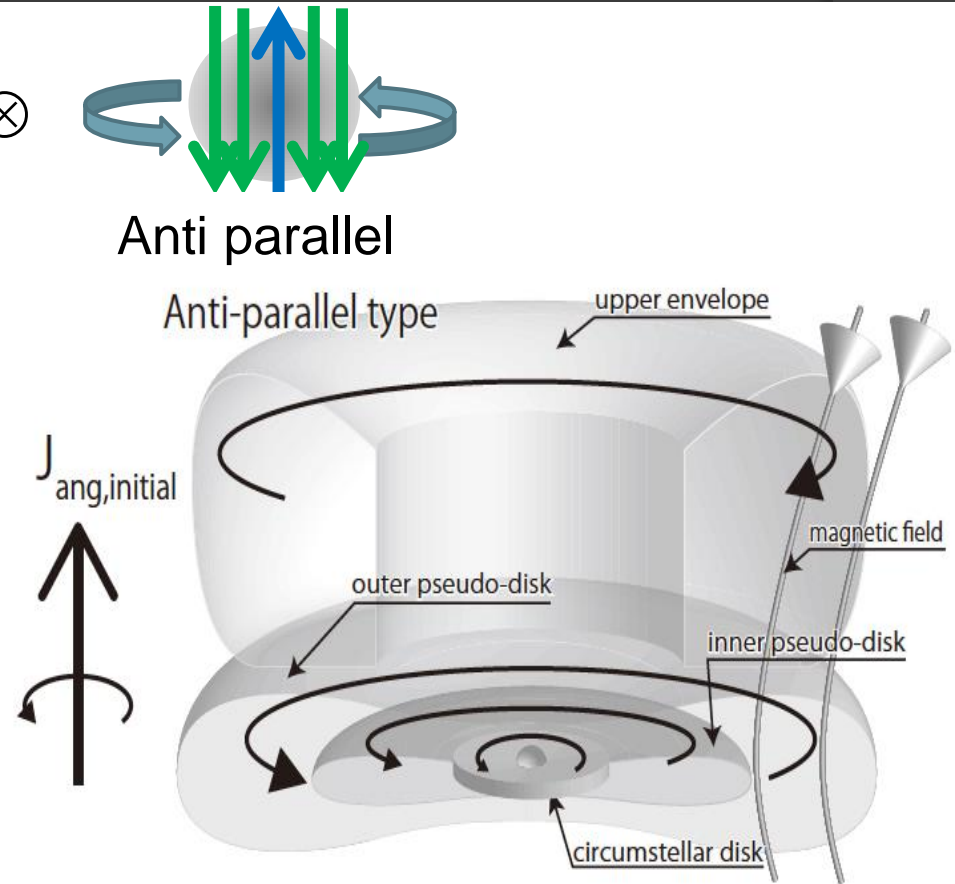
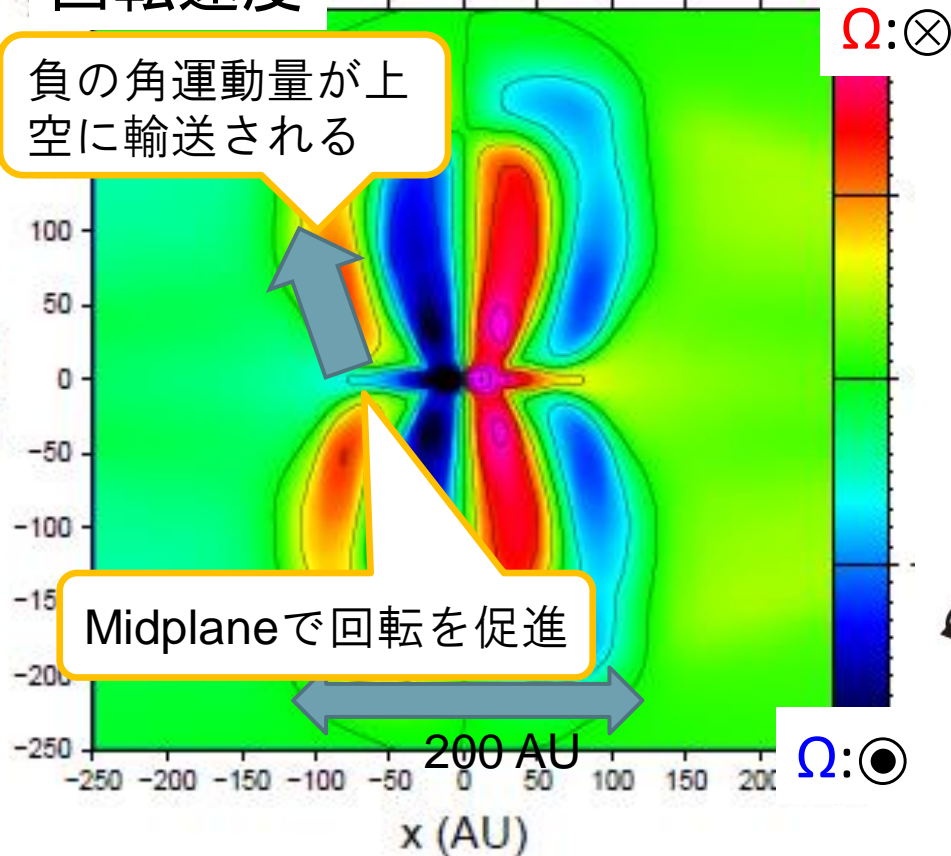


比角運動量プロファイル

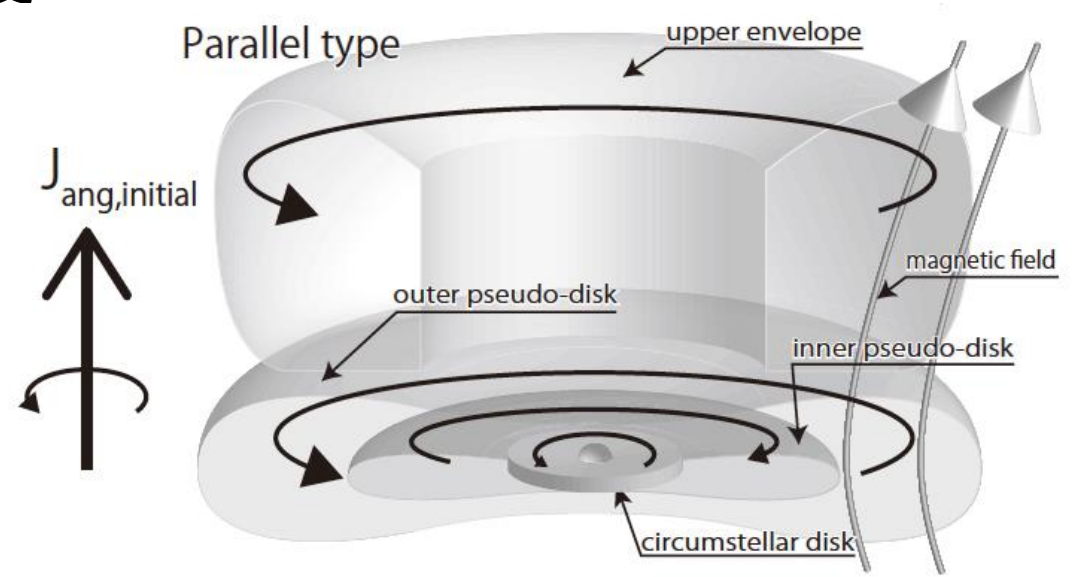
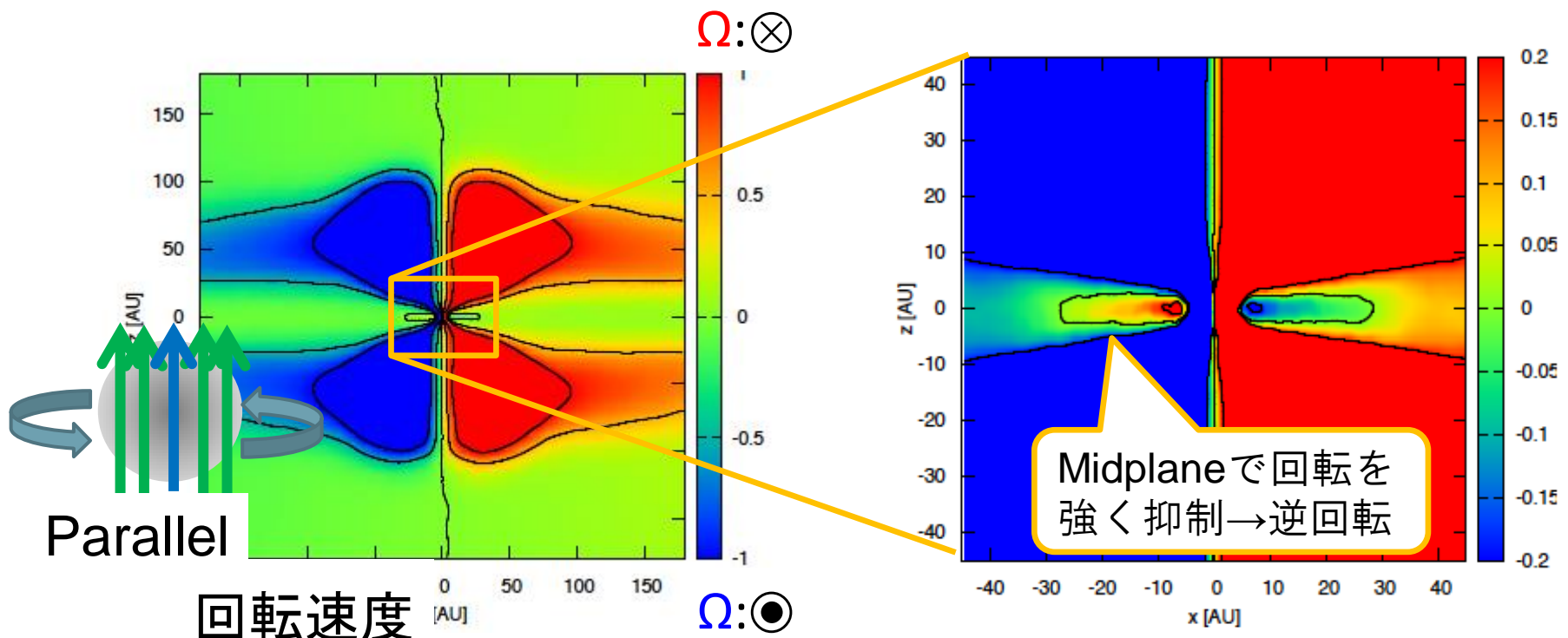
# 逆回転エンベロープの形成

- 角運動量の保存からmidplaneで回転が促進された分の逆向きの角運動量が磁力線を伝わって上空へ輸送される  
→上空のガスが逆回転を始める
- 数100AUスケール→観測可能と思われる(高桑さんのトーク)

## 回転速度



# 逆回転エンベロープの形成(2)



# 原始惑星系円盤研究の意義

## ◎ 惑星形成の初期条件を知りたい

- 僕が学生の頃から、惑星形成の理論研究は初期条件の不定性が大きい

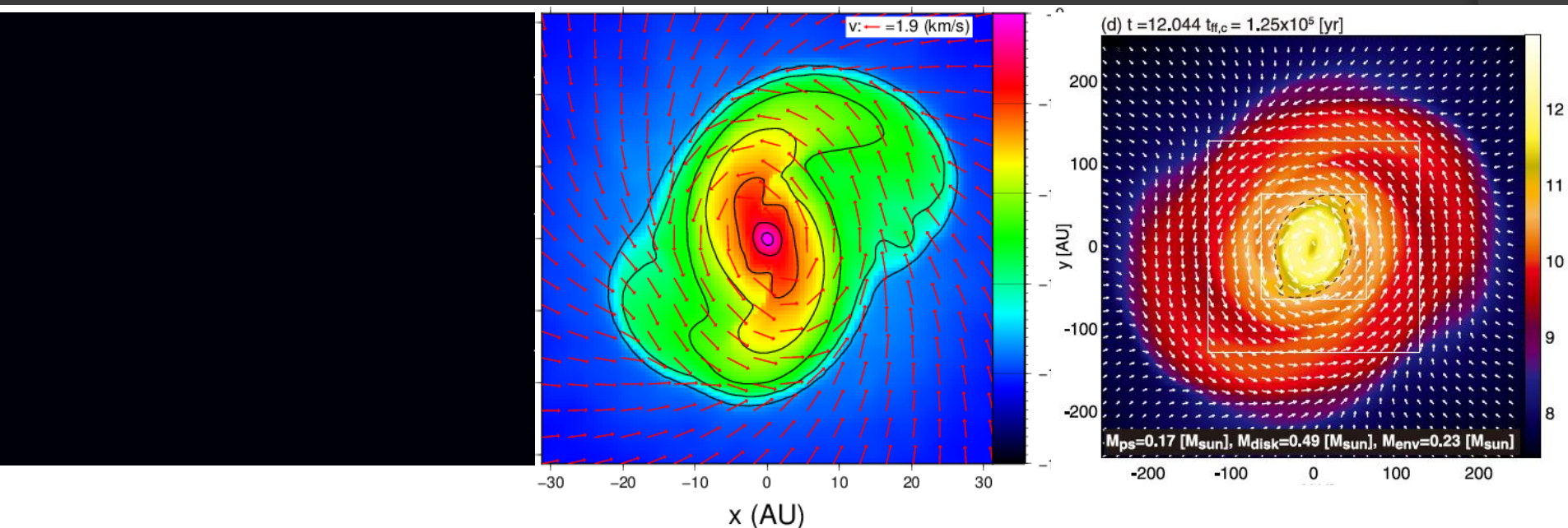
→結局、円盤の形成進化から考察せざるを得ないと初回のこの研究会に出て強く感じた

## ◎ 原始惑星系円盤の(初期)進化がわかるとは

- 円盤への降着ガスの角運動量進化の解明
  - 磁気ブレーキング
- 円盤内角運動量輸送メカニズムの決定
  - 磁気回転不安定性、自己重力不安定性、vertical shear instabilityなど
- 円盤から外への角運動量輸送
  - 円盤風、磁気ブレーキング

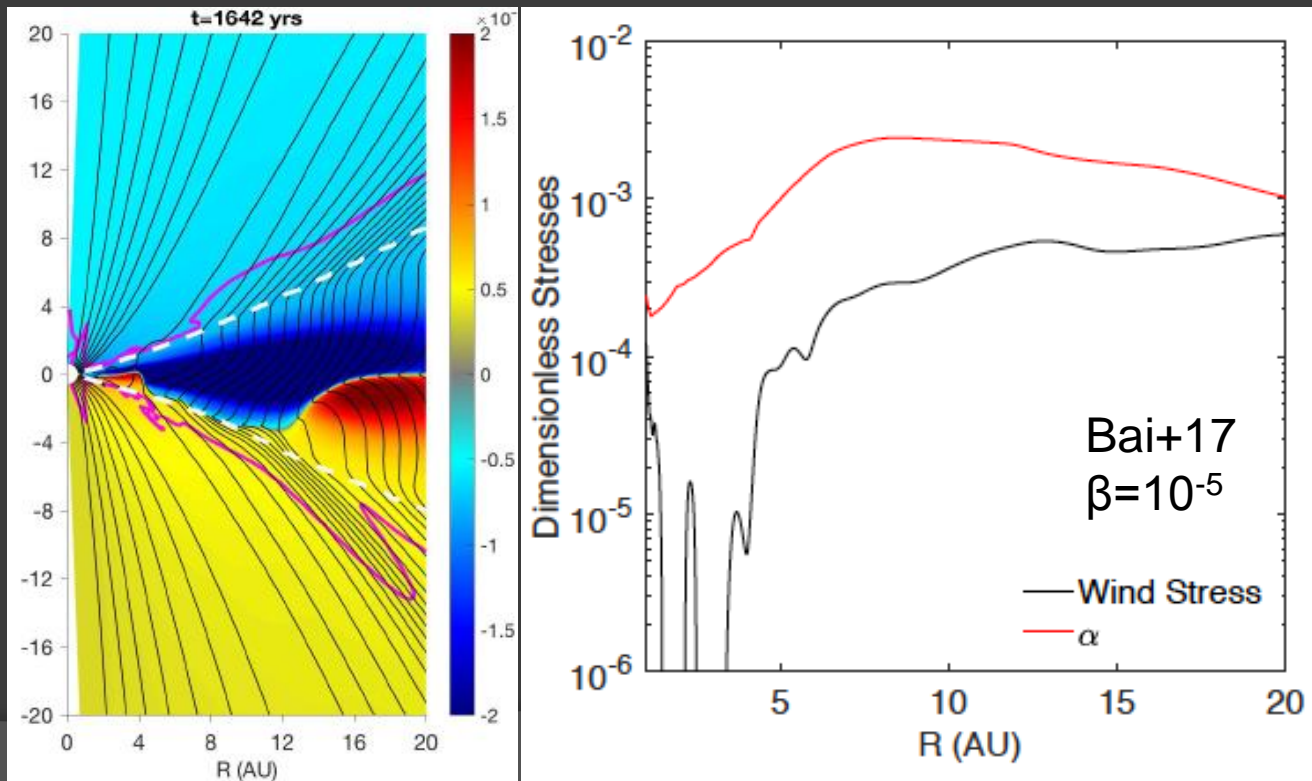
# Class 0/I YSOs円盤内での角運動量輸送メカニズム

- ◎ 円盤が形成したシミュレーションでは、ほぼすべての場合、円盤が自己重力不安定になる
  - 円盤の電離度や磁場強度といった不定パラメータを含まず円盤構造を $Q=1$ の条件から**決定可能**
- ◎ MRIなどの影響は？
  - 分子雲コアスケールから円盤まで解くようなシミュレーションはMRIを分解する数値解像度が足りない→MRIやMRI駆動の円盤風による角運動量輸送を無視
- ◎ 観測から示唆される円盤質量とも矛盾するように見える



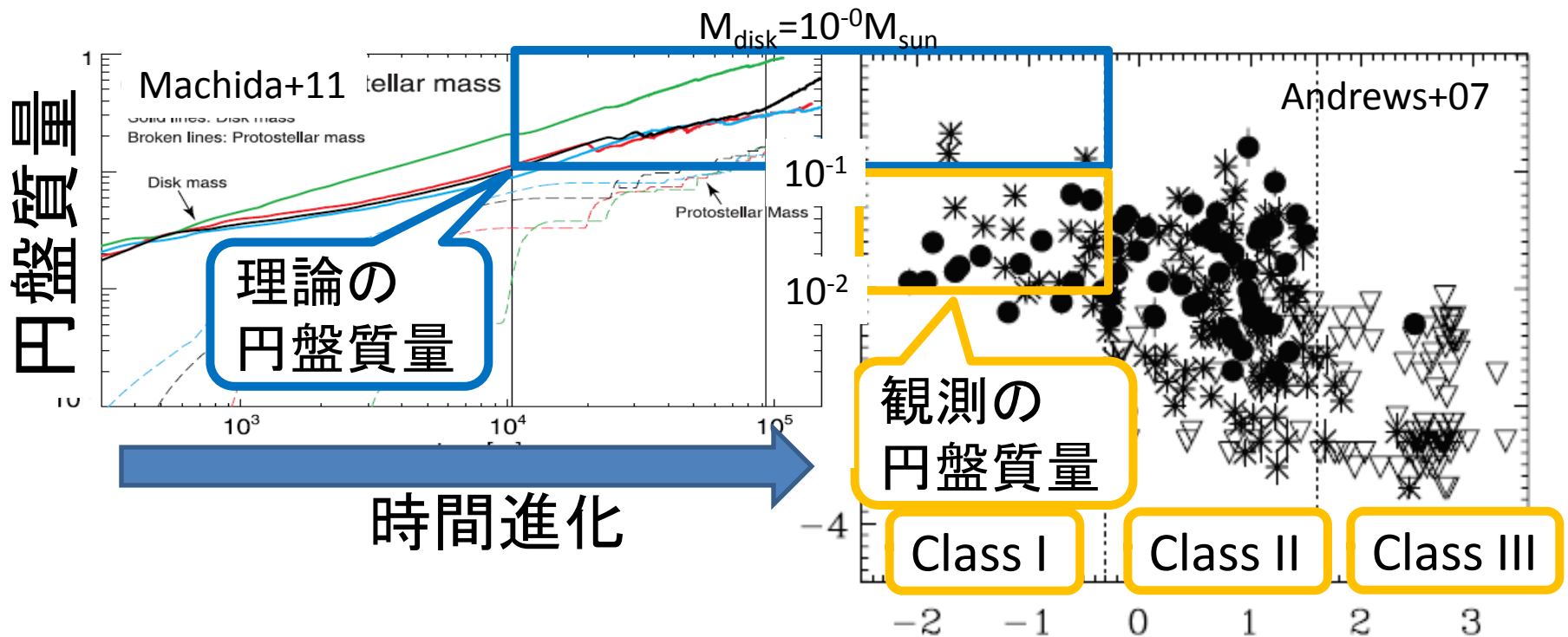
# Class 0/I YSOs円盤内での角運動量輸送メカニズム

- ◎ 円盤が形成したシミュレーションでは、ほぼすべての場合、円盤が自己重力不安定になる
  - 円盤の電離度や磁場強度といった不定パラメータを含まず円盤構造を $Q=1$ の条件から**決定可能**
- ◎ **MRIなどの影響は？**
  - 分子雲コアスケールから円盤まで解くようなシミュレーションはMRIを分解する数値解像度が足りない→MRIやMRI駆動の円盤風による角運動量輸送を無視
- ◎ 観測から示唆される円盤質量とも矛盾するように見える



# Class 0/I YSOs円盤内での角運動量輸送メカニズム

- 円盤が形成したシミュレーションでは、ほぼすべての場合、円盤が自己重力不安定になる
  - 円盤の電離度や磁場強度といった不定パラメータを含まず円盤構造をQ=1の条件から**決定可能**
- MRIなどの影響は？
  - 分子雲コアスケールから円盤まで解くようなシミュレーションはMRIを分解する数値解像度が足りない→MRIやMRI駆動の円盤風による角運動量輸送を無視
- **観測から示唆される円盤質量とも矛盾するよう見える**





# Class 0/I 円盤は本当に重力不安定か？

- Class 0/I円盤の観測パラメータ
  - 半径100AU
  - 質量:0.01 Msun ( $Q \sim 10$ )
  - 円盤への質量降着率: $10^{-6} M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$   
 $\sim c_s^3/G @ 10 \text{ K}$

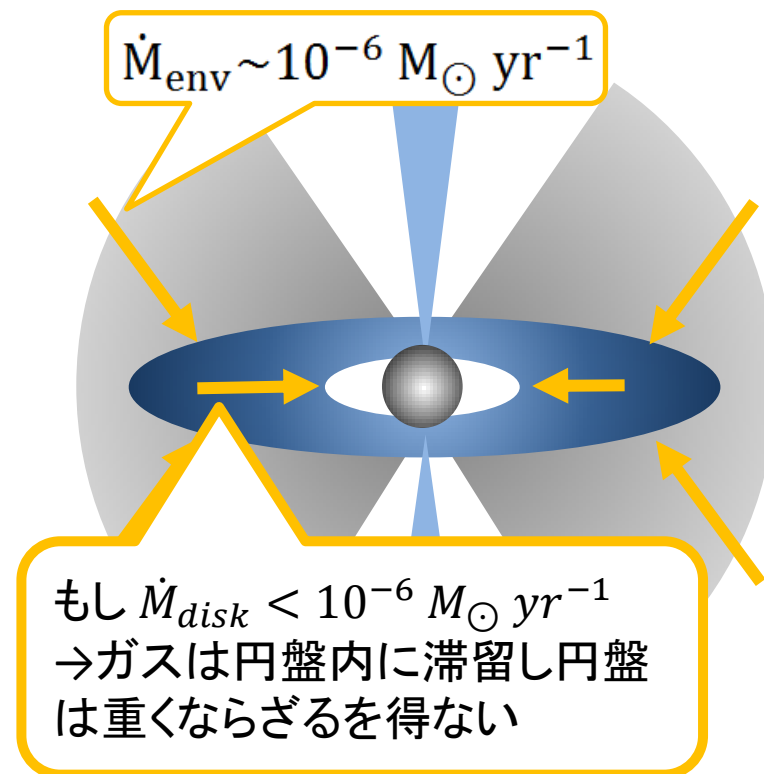
- 観測結果を説明するのに必要な $\alpha$ 値( $r=100 \text{ AU}$ とする)

$$\alpha = \frac{\dot{M}_{\text{disk}}}{3\pi (c_s^2/\Omega) \Sigma} = \frac{\dot{M}_{\text{disk}}}{3c_s^3/G} Q$$
$$= 0.74 \left( \frac{\dot{M}_{\text{disk}}}{10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right) \left( \frac{T}{20 \text{ K}} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{Q}{10} \right)$$

- 0(1)の $\alpha$ 値を実現する物理メカニズムは知られていない
  - MRI: $\alpha < \sim 10^{-2}$  (Bai+ 11)
  - VSI: $\alpha < \sim 10^{-4}$  (Nelson+13)

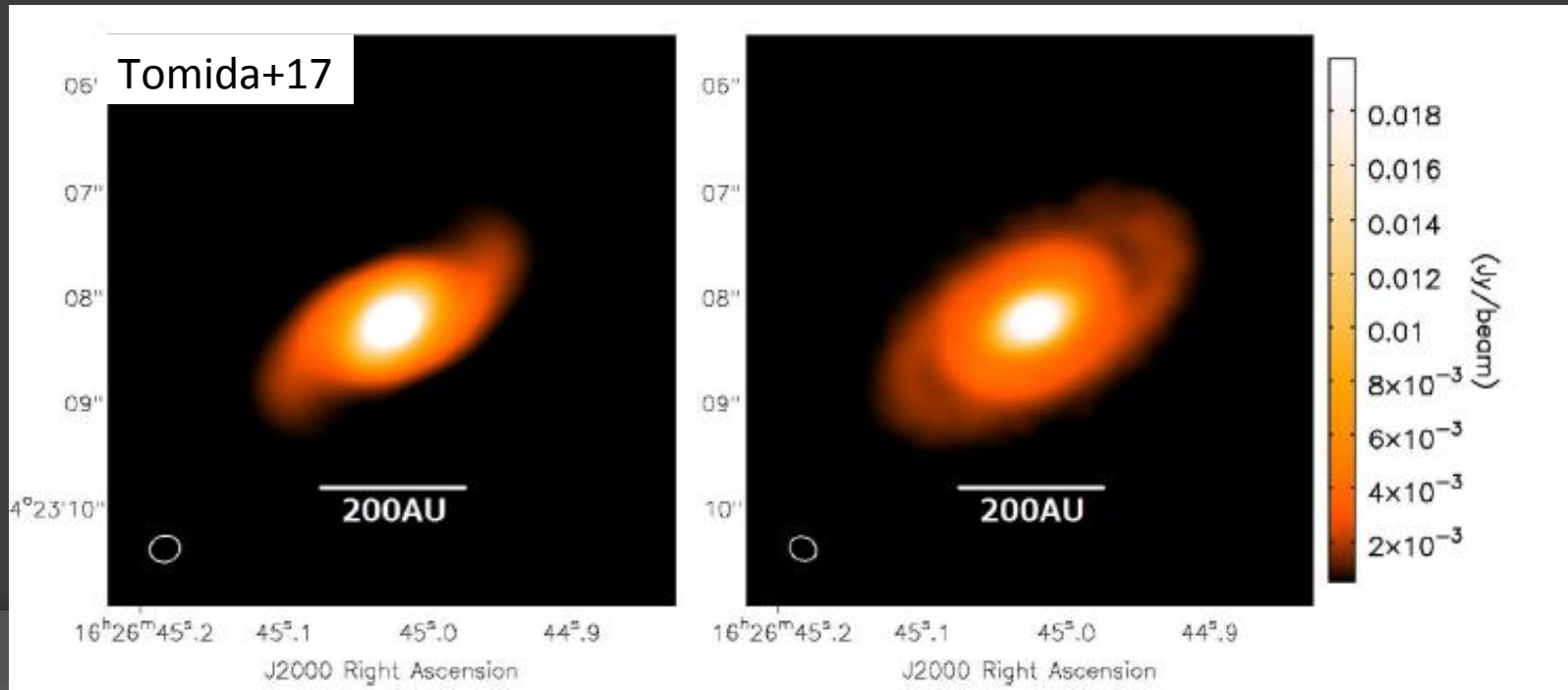
→観測パラメータには矛盾があるように思える

**理論的には円盤は重くならないといけない**



# 観測的検証に向けて

- ◎ 自己重力円盤の大きな特徴は渦状腕
  - 原始惑星系円盤内では大局的な( $m=1,2$ )の渦状腕が発達
  - ただし、降着が弱くなるとGIは間欠的( $Q\sim 1$ でも渦状腕が無いこともある)
- ◎ Elias 2-27の観測は自己重力円盤の存在を示唆 (Peretz+16, Tomida+17)

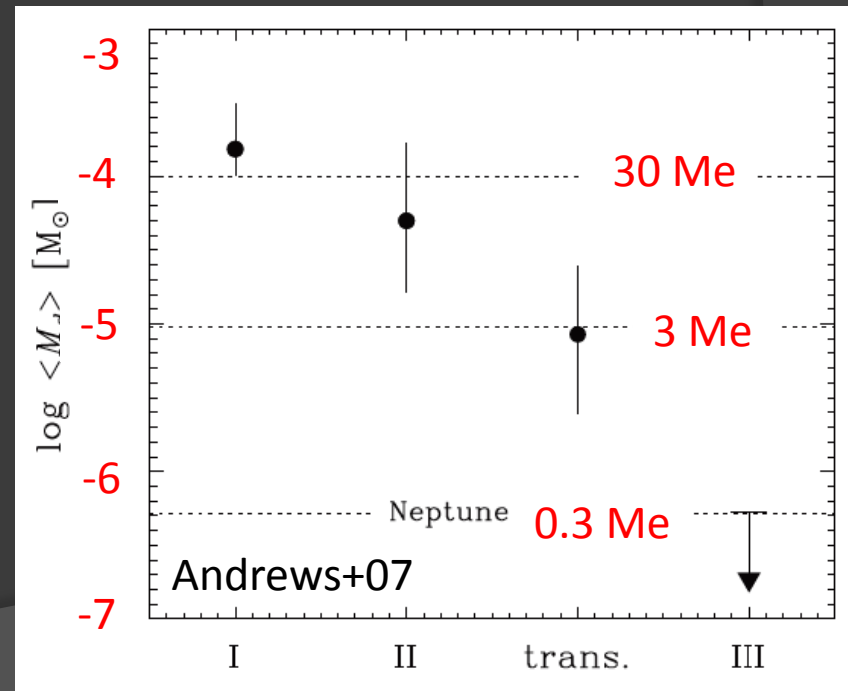
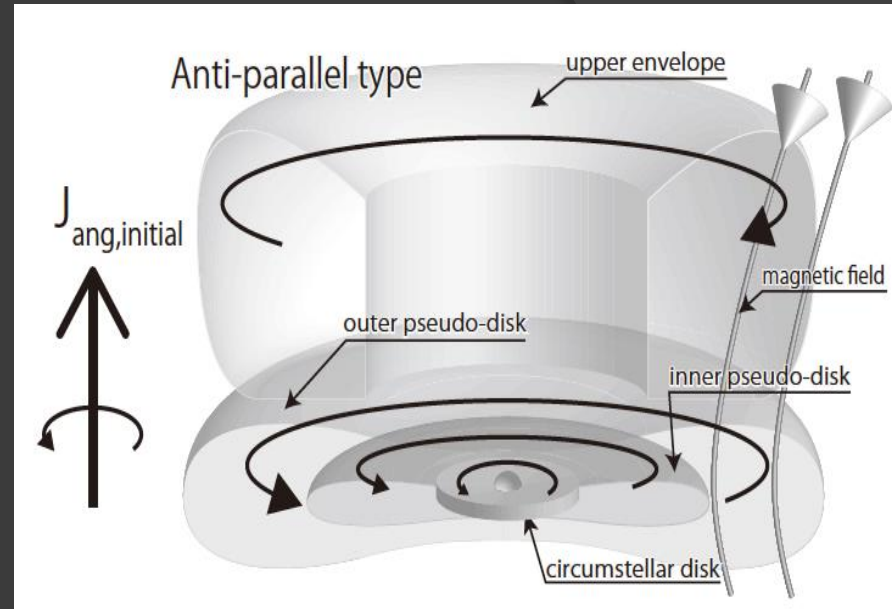


# まとめ

- ◎ 原始惑星系円盤の(初期)進化が解明されてきた
- ◎ ガスの角運動量進化では非理想MHD効果が本質的な役割を果たす
  - 特にホール効果は特徴的な速度構造をつくりうる
- ◎ 形成初期の原始惑星系円盤の質量は重く自己重力不安定性が発達
  - 磁場が比較的強い場合でも、非理想MHD効果によって円盤形成し、自己重力不安定性によって角運動量輸送
  - 質量降着が $10^{-6}M_{\text{sun}}\text{yr}^{-1}$ 程度ある場合、解析的な見積もりからも重い円盤が必要

# 今後の課題

- ◎ Class 0/I YSOsにおける非理想MHD効果の観測的検証
  - 逆回転エンベロープ(高桑さんのトーク)
  - 円盤サイズ分布の二峰性
- ◎ Class 0/I 自己重力不安定円盤での惑星形成論
  - $\alpha$ 値を含む円盤構造が少数のパラメータで決定される
  - 現実的な円盤での惑星形成論
  - HL tauのギャップが惑星起源なら早い惑星形成シナリオが必要
  - Class 0/I phaseでは大量のダストが円盤内を通過
  - ⇔ Class IIでは円盤へのダスト供給はなく、円盤内ダスト量は  $\sim 10M_{\text{earth}}$

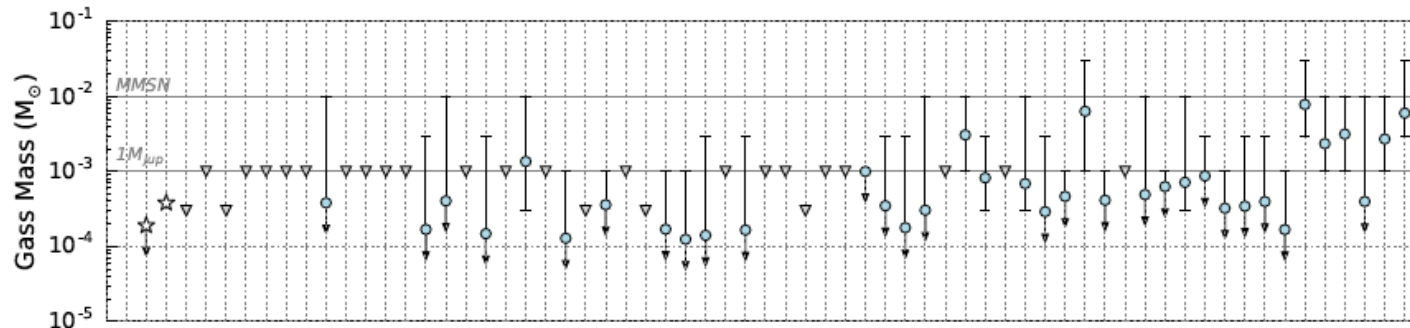
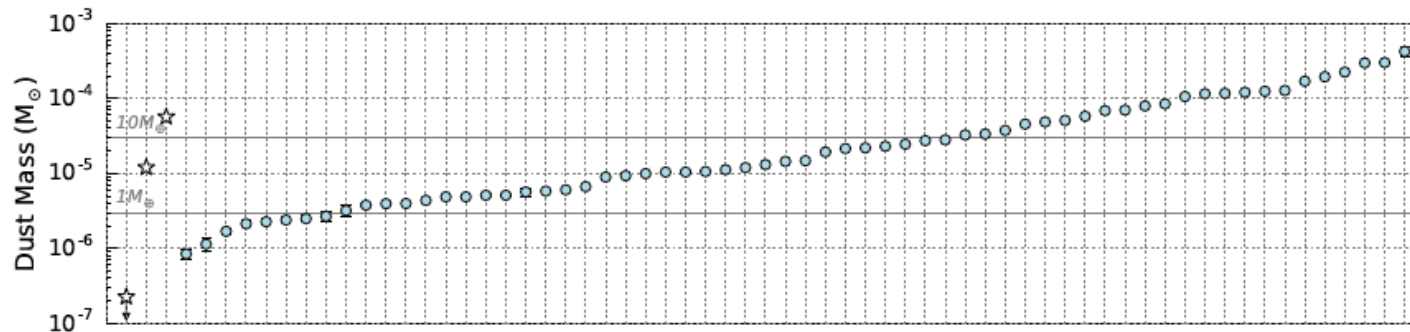


# ガス円盤が重い?そんな馬鹿な

- ALMAの最近の観測(Ansdell+16)と矛盾する?

→ **NO!**

- ALMAの観測はClass II円盤 $\leftrightarrow$ Class I円盤
- COでH<sub>2</sub>ガスが定量出来ているか?
- 中心星への質量降着と矛盾しないか? ( $< \sim 10^{-9} M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$ が必要)
- CO depletionの可能性のほうが高いかもしれない(Miotello+16)。少なくとも排除できない



# ガス円盤が重い?そんな馬鹿な

- ALMAの最近の観測(Ansdell+16)と矛盾する?

→NO!

- ALMAの観測はClass II円盤⇔Class I円盤
- COでH<sub>2</sub>ガスが定量出来ているか?
- 中心星への質量降着と矛盾しないか? (<~10<sup>-9</sup>M<sub>sun</sub> yr<sup>-1</sup>が必要)
- CO depletionの可能性のほうが高いかもしれない(Miotello+16)。少なくとも排除できない

## ABSTRACT

*Context.* An era has started in which gas and dust can be observed independently in protoplanetary disks, thanks to the recent surveys with the Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array (ALMA). The first near-complete high-resolution disk survey in both dust and gas in a single star-forming region has been carried out in Lupus, finding surprisingly low gas-to-dust ratios (Ansdell et al. 2016).

*Aims.* The goal of this work is to fully exploit CO isotopologues observations in Lupus, comparing them with physical-chemical model results, in order to obtain gas masses for a large number of disks and compare gas and dust properties.

*Methods.* We have employed the grid of physical-chemical models presented in Miotello et al. (2016) to analyze continuum and CO isotopologues (<sup>13</sup>CO  $J = 3 - 2$  and C<sup>18</sup>O  $J = 3 - 2$ ) observations of Lupus disks, including isotope-selective processes and freeze-out. Employing also the ALMA <sup>13</sup>CO-only detections, disk gas masses have been calculated for a total of 34 sources, expanding the sample of 10 disks studied by Ansdell et al. (2016), where also C<sup>18</sup>O was detected.

*Results.* We confirm that overall gas-masses are very low, often smaller than 1M<sub>J</sub>, if volatile carbon is not depleted. Accordingly, global gas-to-dust ratios are much lower than the expected ISM-value of 100, being predominantly between 1 and 10. Low CO-based gas masses and gas-to-dust ratios may indicate rapid loss of gas, or alternatively chemical evolution, e.g. via sequestering of carbon from CO to more complex molecules, or carbon locked up in larger bodies.

*Conclusions.* Current ALMA observations of <sup>13</sup>CO and continuum emission cannot distinguish between these two hypotheses. We have simulated both scenarios, but chemical model results do not allow us to rule out one of the two, pointing to the need to calibrate CO-based masses with other tracers. Assuming that all Lupus disks have evolved mainly due to viscous processes over the past few Myr, the observed correlation between the current mass accretion rate and dust mass found by Manara et al. (2016) implies a constant gas-to-dust ratio, which is close to 100 based on the observed  $M_{\text{disk}}/M_{\text{acc}}$  ratio. This in turn points to a scenario in which carbon depletion is responsible for the low CO isotopologue line luminosities.

# 円盤構造 from Machida+12 (Ohmic diffusion only)

