

磁気流体力学シミュレーションから探る 原始惑星系円盤の温度構造

森 昇志 (東北大学 学振PD)

内容

研究背景

- なぜ原始惑星系円盤を研究するのか
- 円盤の温度構造の重要性
- 円盤の温度構造 – 古典的描像
- 磁気流体力学に基づく原始惑星系円盤の描像

我々の研究

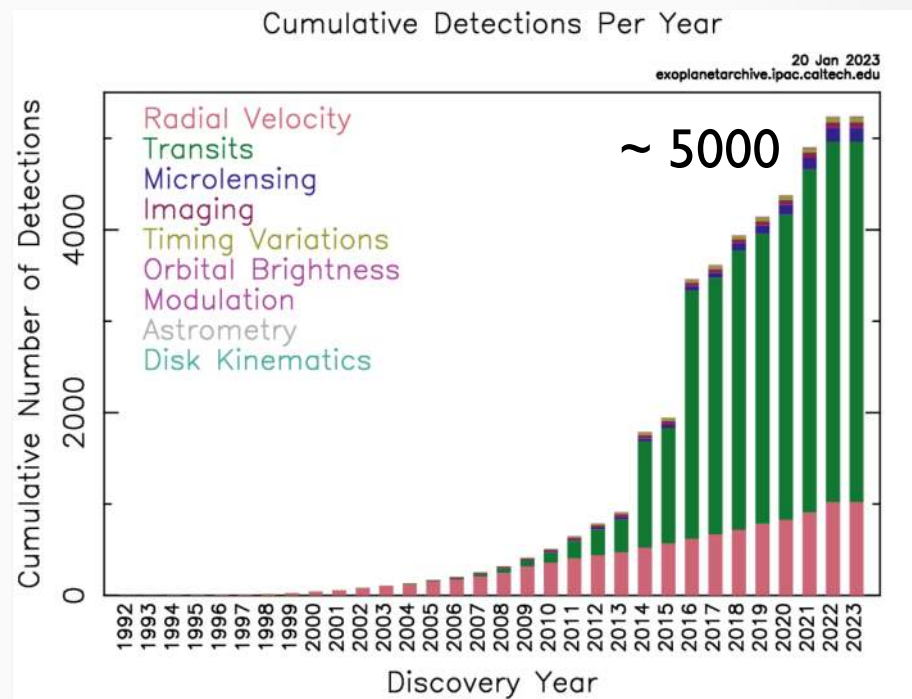
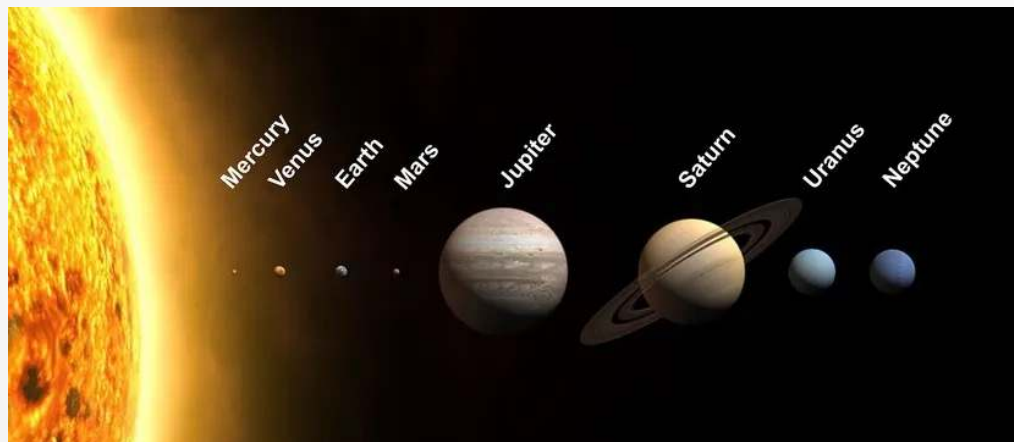
- 磁気降着層流円盤における円盤の温度構造
- 局所磁気流体力学計算
- スノーラインの移動

なぜ原始惑星系円盤を研究するのか

どうやって惑星はできるのか？

地球はどうやってできたか？ どれほど普遍的な存在か？

→ 惑星の形成過程を理解したい

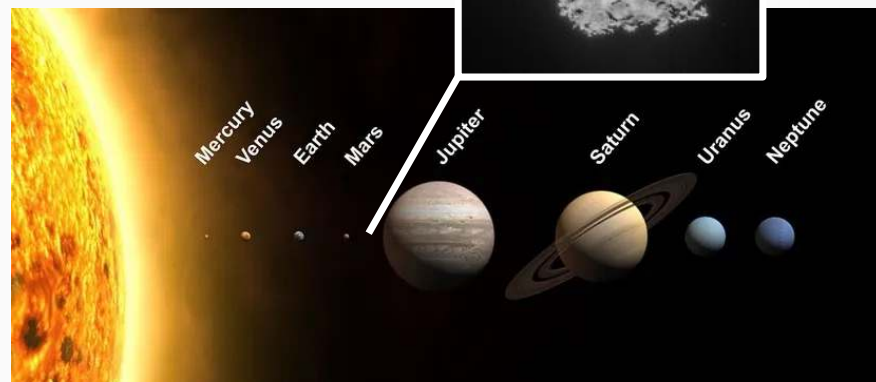
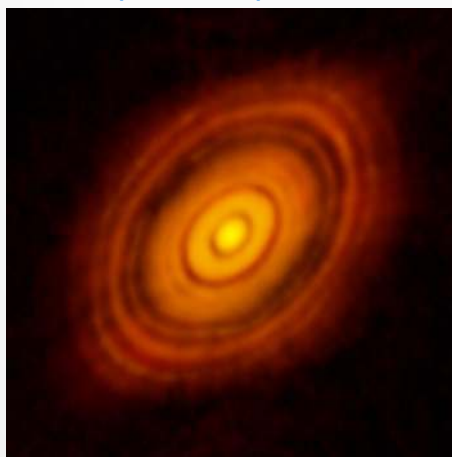


NASA Exoplanet Archive

惑星の形成過程 – ダストから惑星へ

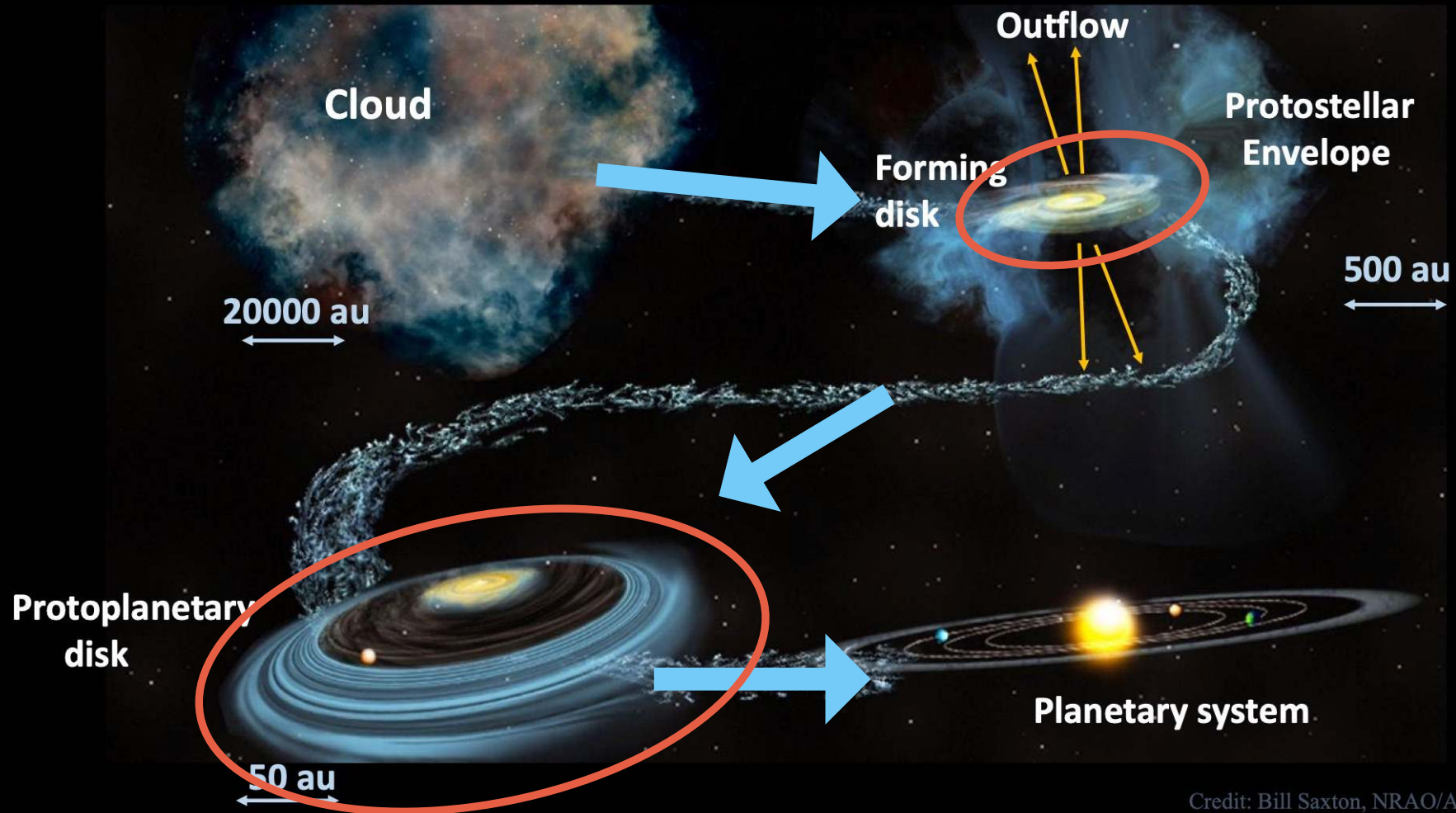
- 惑星は原始惑星系円盤の中で形成する
 - ダストから微惑星、原始惑星、惑星へ
- 観測は全てが見える訳ではない → 円盤の理論的研究
 - 円盤観測：原始惑星系円盤のダスト
 - 系外惑星・太陽系観測：形成後の惑星・天体

ALMA partnership et al. 2015



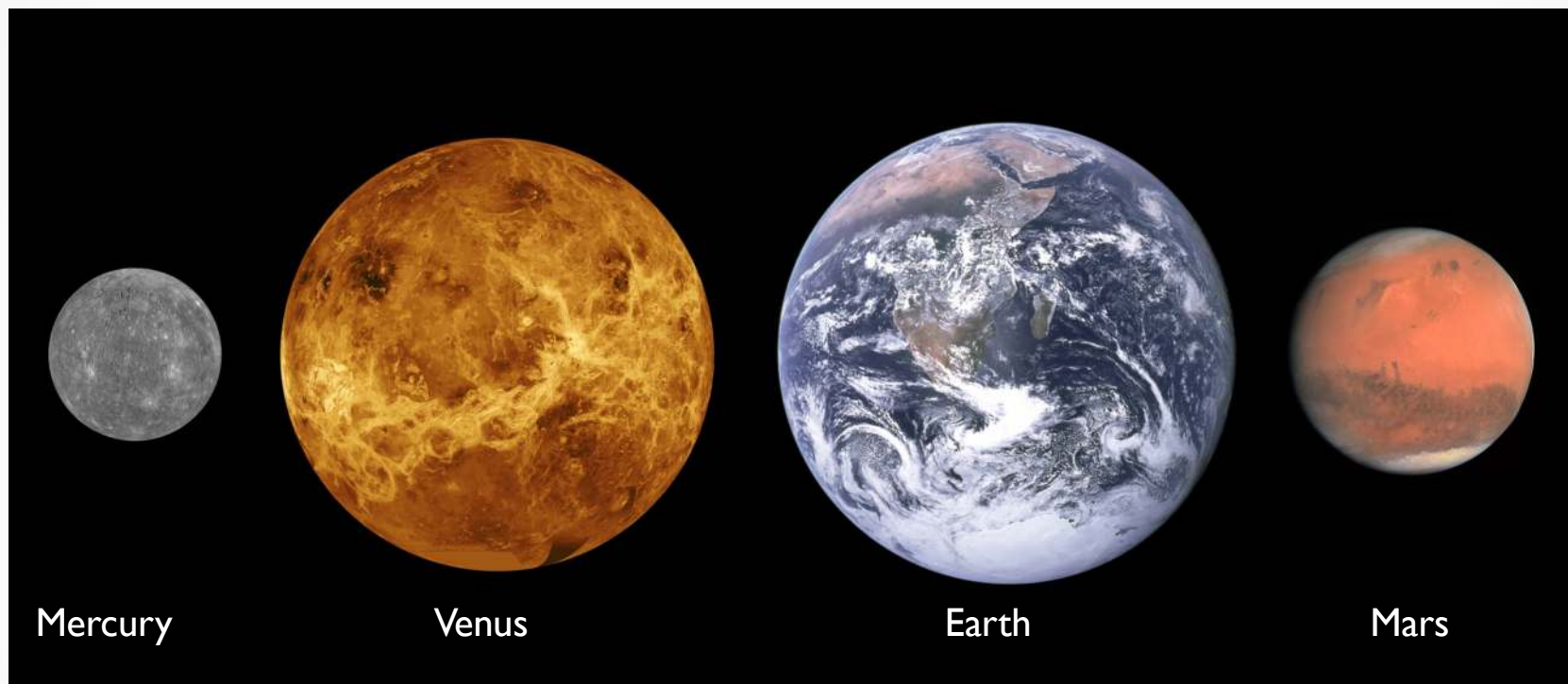
Credit: European Space Agency

原始惑星系円盤とは 若い星周囲に形成される円盤状星雲



円盤の温度構造の重要性：
惑星含水率に影響

太陽系の地球型惑星の含水率は低い



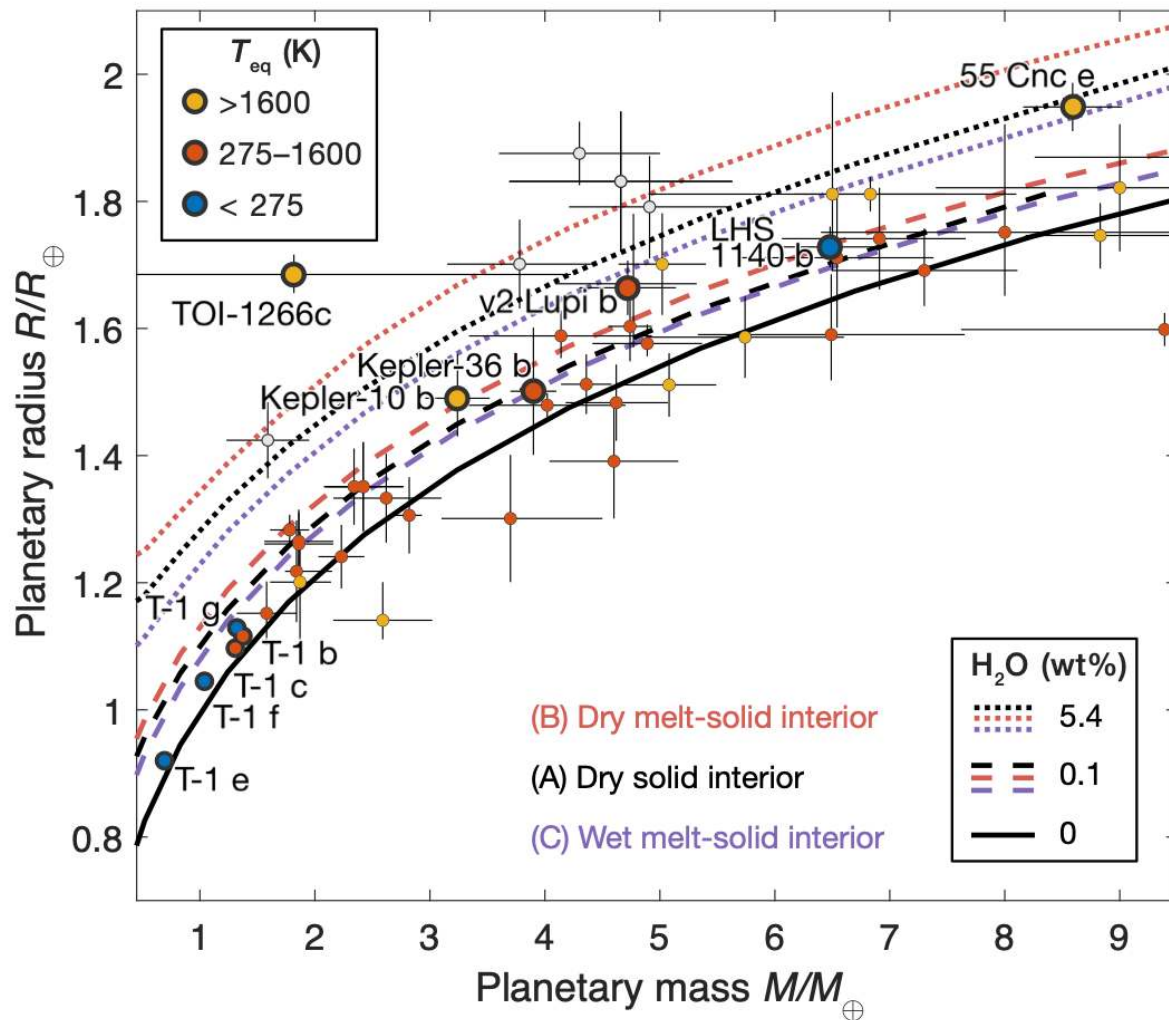
含水率はせいぜい ≈ 1 wt%

(e.g., Nomura et al. 2014; Fei et al. 2017; Kurokawa et al. 2014; Elkins-Tanton et al. 2007; Lawrence et al. 2013)

c.f. 彗星・氷惑星 > 10 wt%

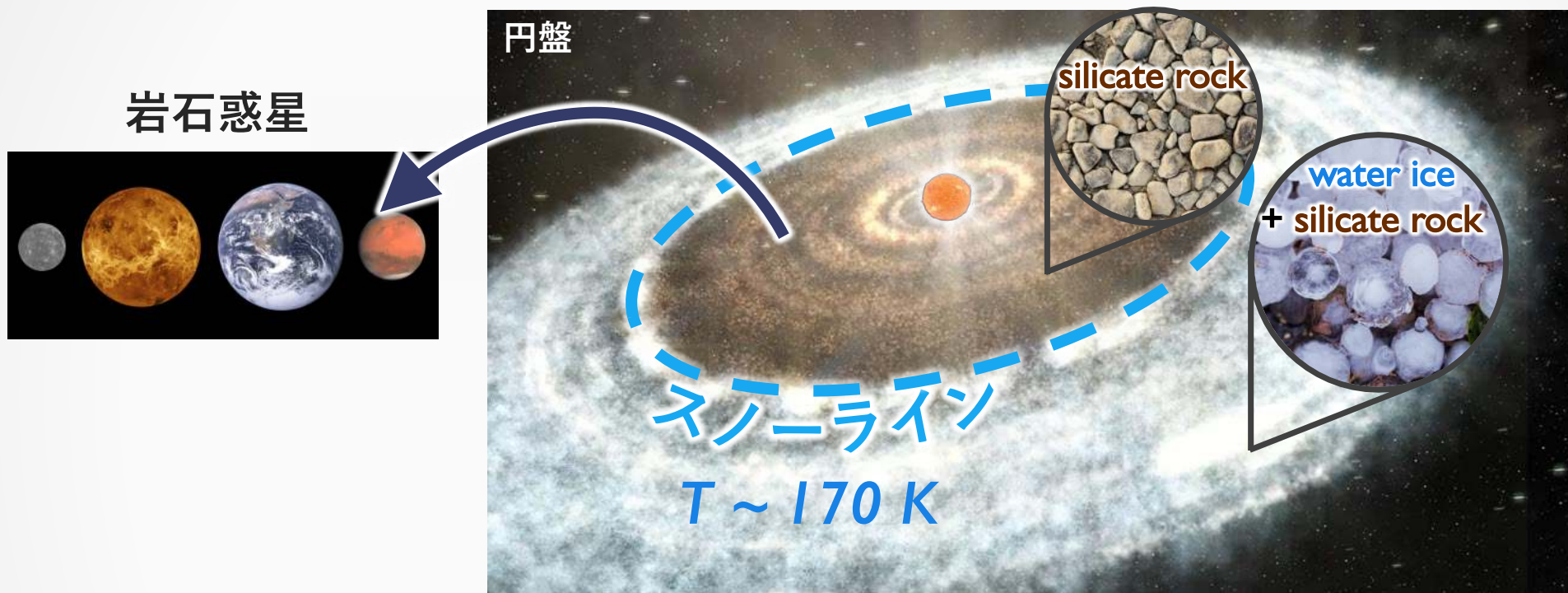
(e.g., Guillot 2005; A'Hearn et al. 2011; Rotundi et al. 2015)

系外惑星の含水率



Dorn & Lichtenberg 2020

原始惑星系円盤中のスノーライン



Protoplanetary Disk : Alexandra Angelich (NRAO/AUI/NSF)

形成場所とスノーラインの位置関係が 惑星の初期含水率を決定づける
→ 原始惑星系円盤の温度構造を知る必要がある

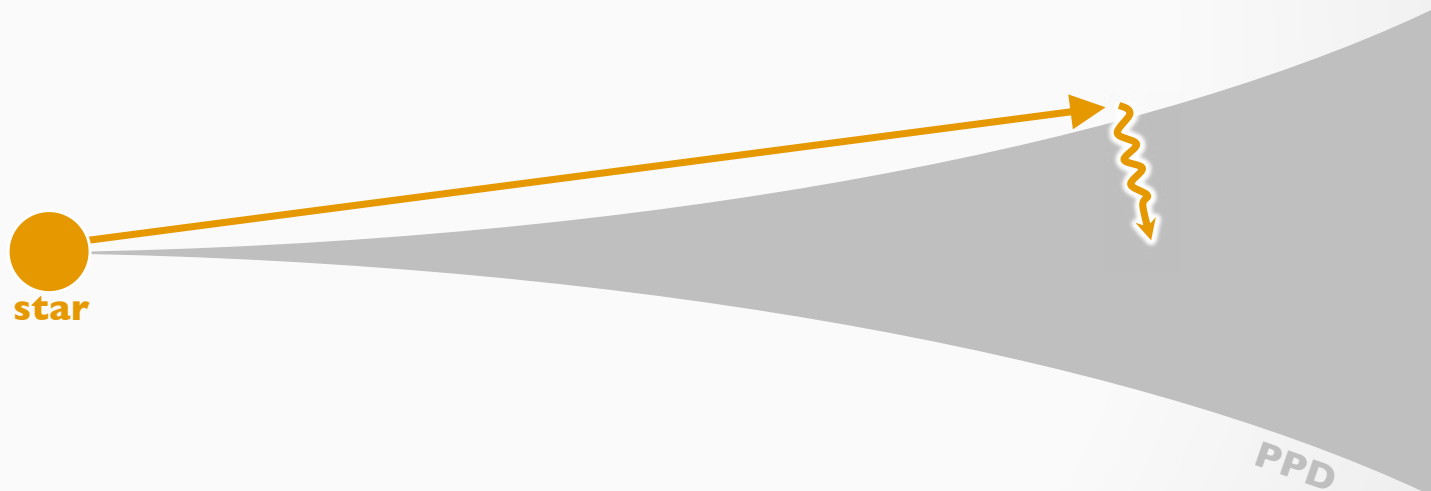
円盤の温度構造 – 古典的描像

円盤ガスの加熱源

- 照射加熱

(Calvet 1981; Chang & Goldreich 1997)

- 中心星が円盤表面を照らす
- 円盤表面からの再放射が円盤内部を暖める



円盤ガスの加熱源

- 照射加熱

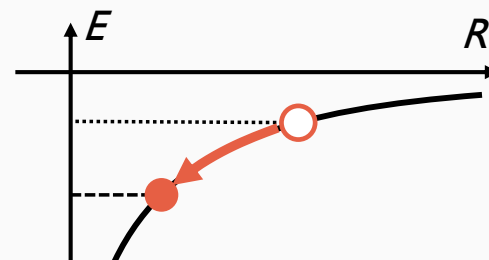
(Calvet 1981; Chang & Goldreich 1997)

- 中心星が円盤表面を照らす
- 円盤表面からの再放射が円盤内部を暖める

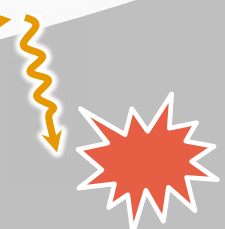
- 降着加熱

(Lynden-Bell & Pringle 74; Shakura & Sunyaev 1973)

- “降着エネルギー”の散逸
 - 円盤ガスの降着に伴って生じるエネルギー



$$\text{Energy per mass at } R \quad E(R) = \frac{1}{2} v_K^2(R) - \frac{GM}{R} = -\frac{1}{2} \frac{GM}{R}$$



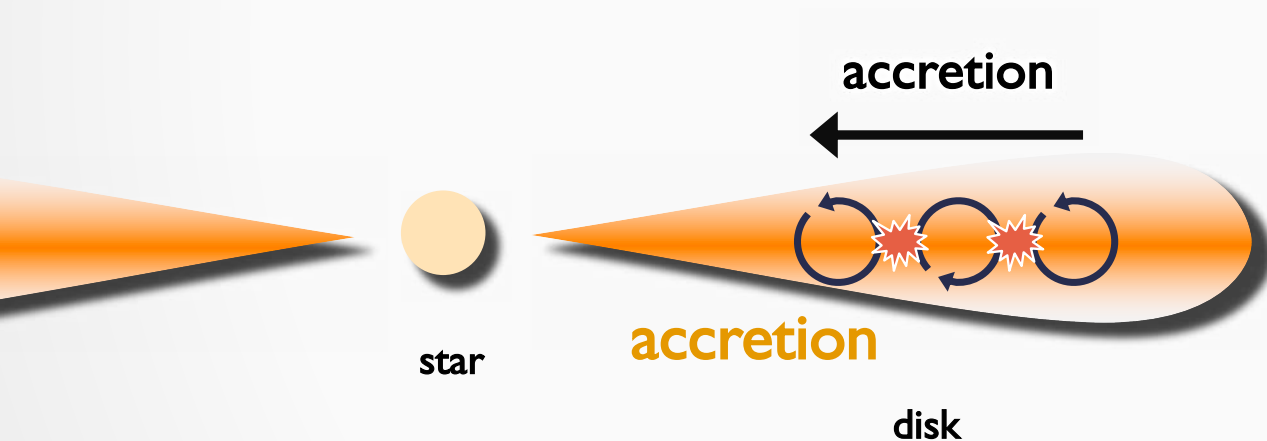
どうやって円盤ガスが降着するか？

- 観測的要請
 - 降着率 $\sim 10^{-9} - 10^{-7} \text{ Msun/yr}$ (e.g., Hartmann 2016)
- 古典的描像：円盤が乱流的であれば乱流粘性で降着できる
 - 乱流渦同士の相互作用が実効的に粘性の働きをする
 - 必要な乱流強度：速度擾乱 $\delta v \sim 10\%$ 音速



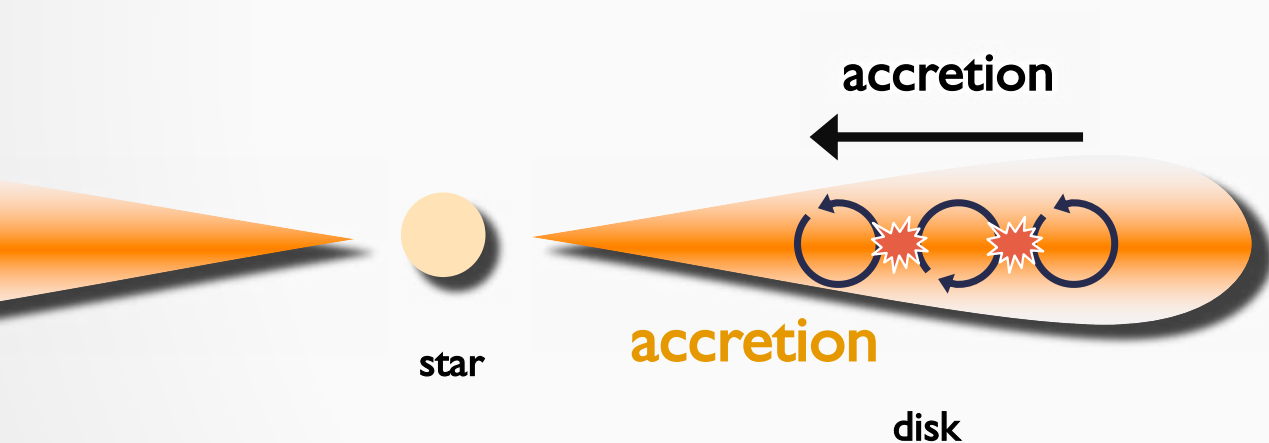
どうやって降着エネルギーは散逸するのか？

- 古典的描像：乱流粘性が降着エネルギーを散逸（粘性加熱）
 - 粘性の摩擦熱によって円盤の回転エネルギーを熱へと変換



乱流粘性による加熱は効率的

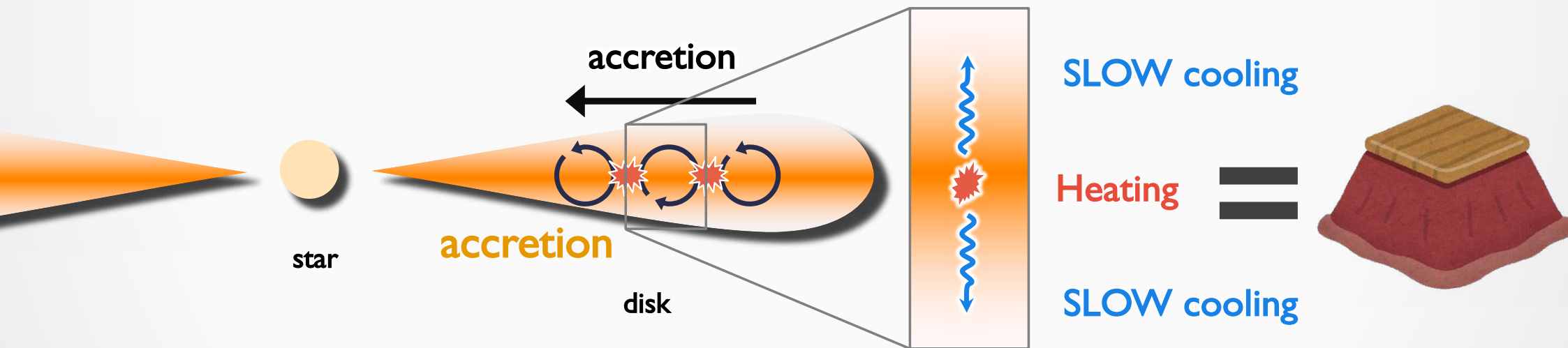
- 熱は主に赤道面付近で開放される（加熱率が密度に比例）
 - 光学的に厚いと冷却が非効率：ブランケット効果
- 円盤内部の温度を効率よく上昇



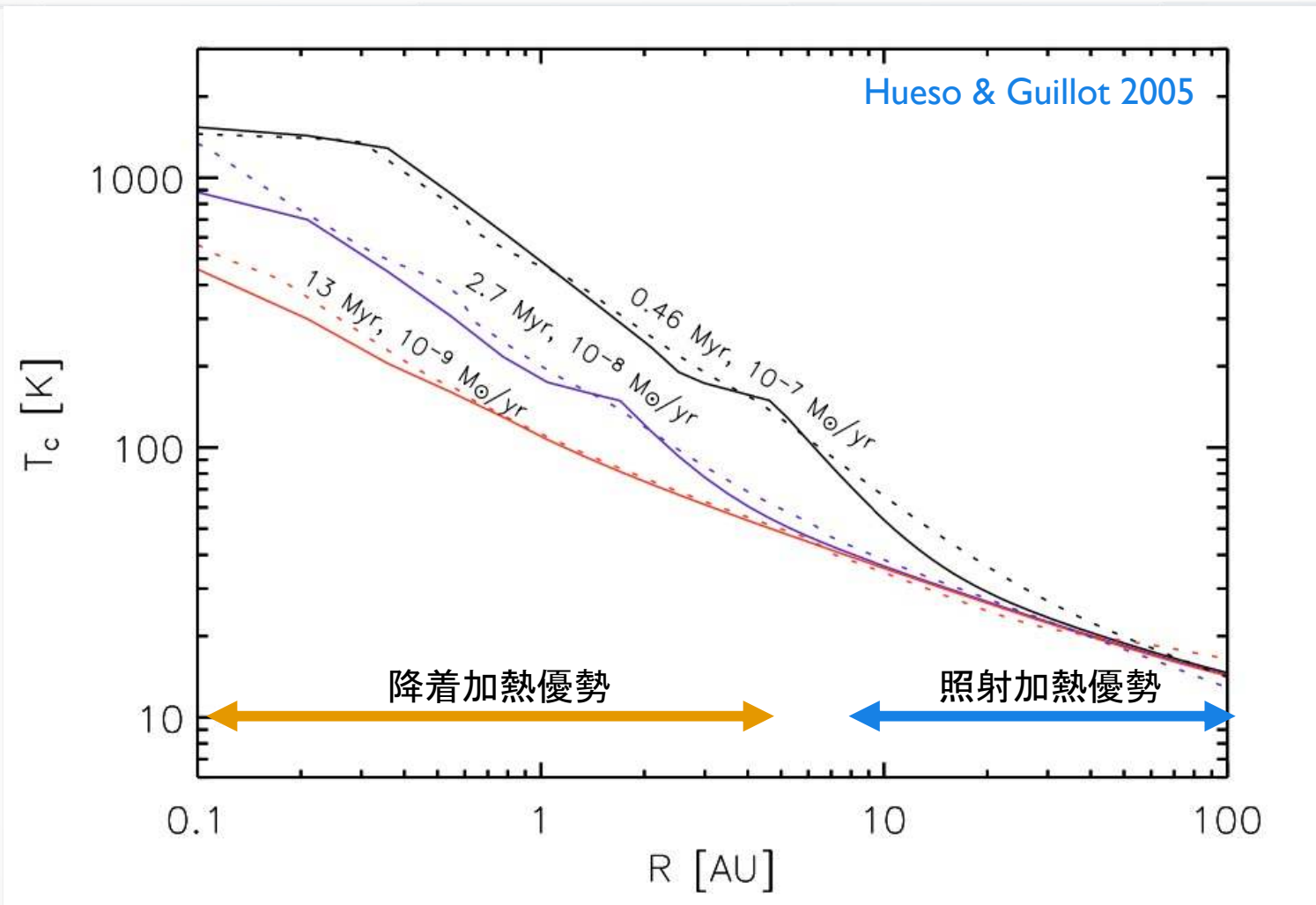
乱流粘性による加熱は効率的

- 熱は主に赤道面付近で開放される（加熱率が密度に比例）
- 光学的に厚いと冷却が非効率：ブランケット効果

→ 円盤内部の温度を効率よく上昇



円盤の温度モデルの例

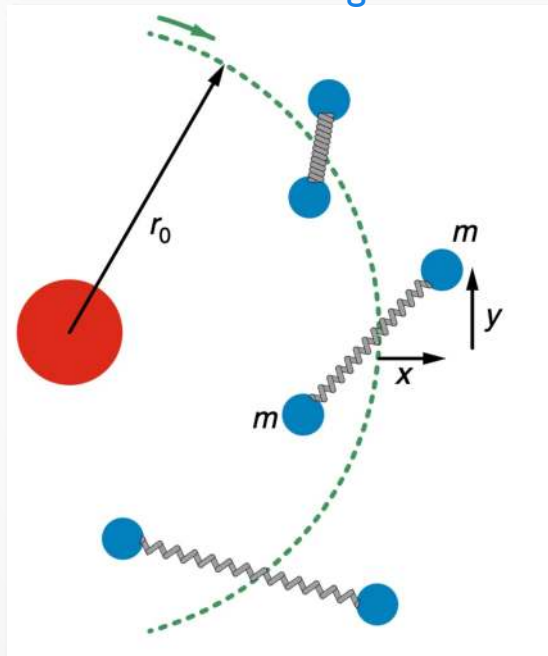


磁気流体力学に基づく 原始惑星系円盤の描像

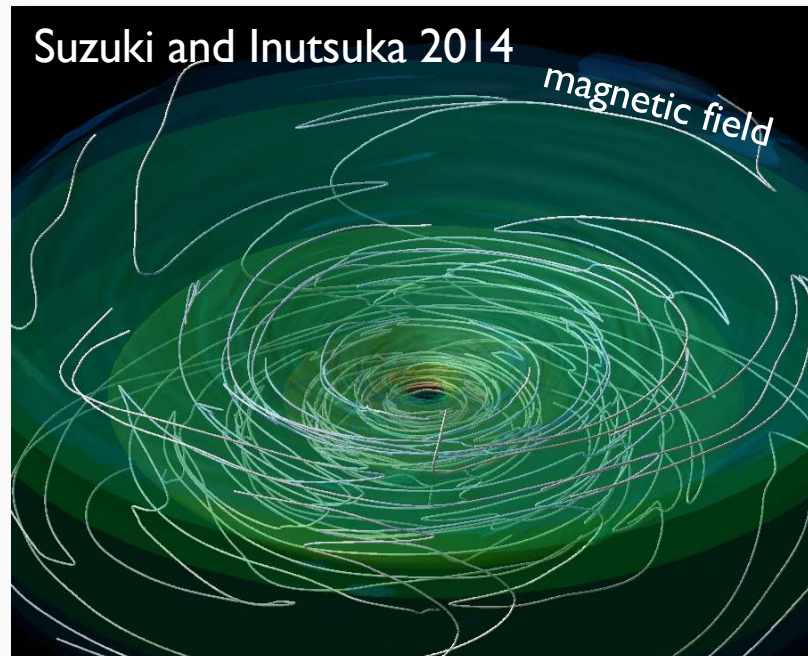
なにが円盤降着を駆動するか？乱流？

- 磁気回転不安定性 (MRI) 由来の乱流は強い乱流を作れる
(Balbus & Hawley 1991; Hawley et al. 1995; Suzuki & Inutsuka 2009; Suzuki & Inutsuka 2014)
- 純粋な流体不安定も”それなり”の乱流を作ることができる
(Lyra & Umurahan 2018; see also Lesur et al. 2023, PPVII review)

Hung et al. 2019



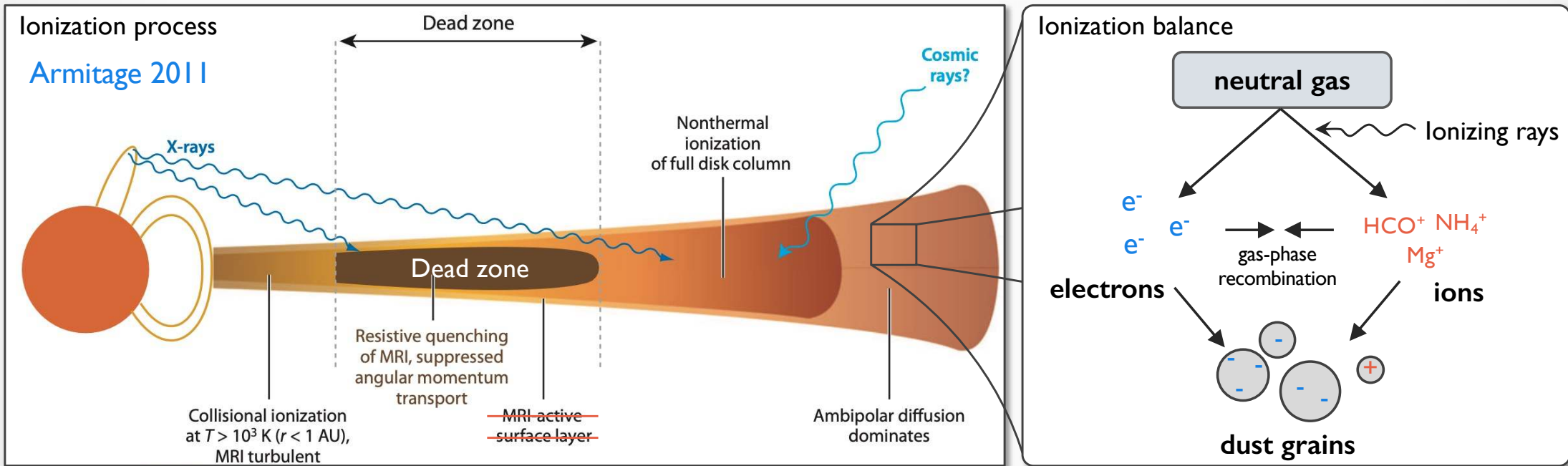
Suzuki & Inutsuka 2014



しかし円盤は基本的に弱電離

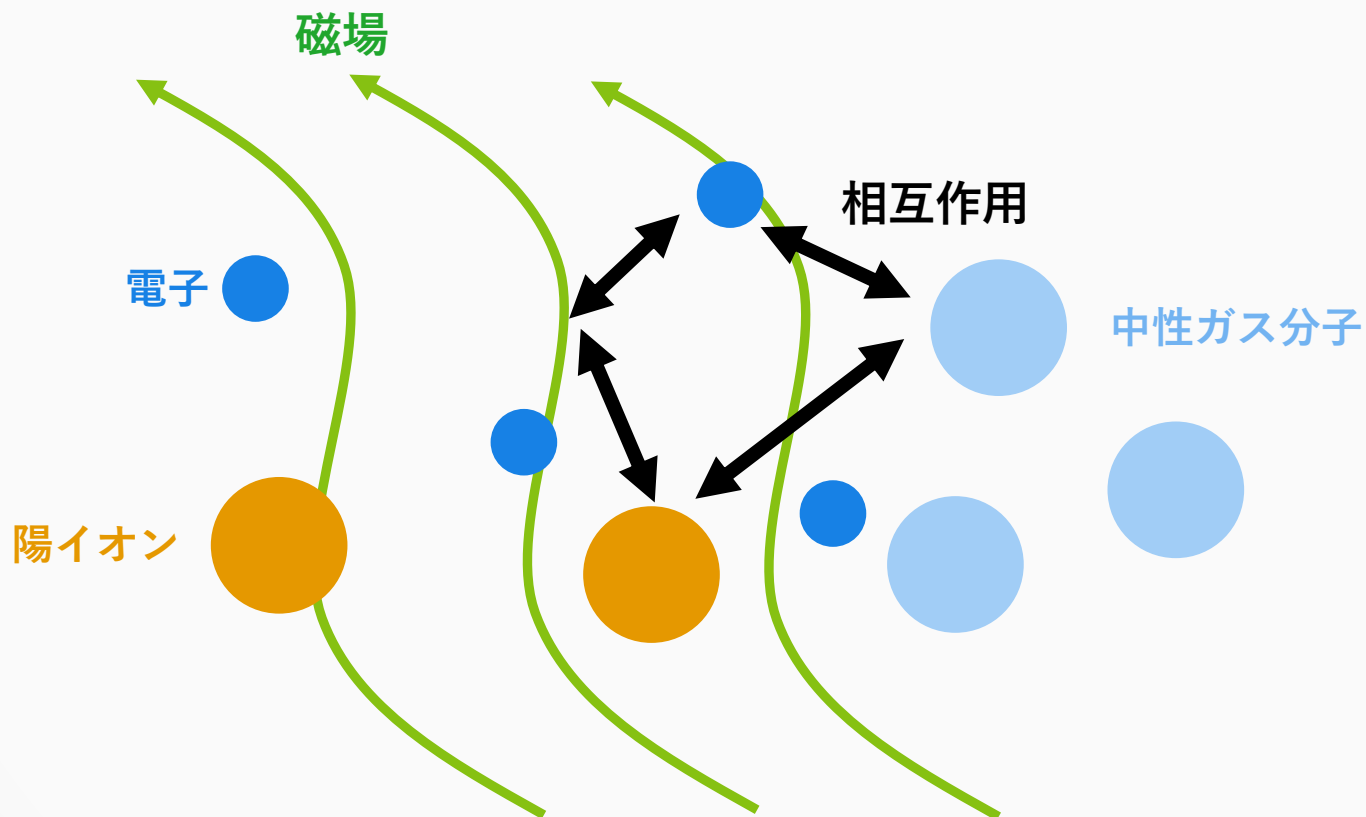
- 原始惑星系円盤は高密度・低温
 - 電離源 (宇宙線, X線, FUV) は簡単に遮蔽されてしまう
 - ダストが荷電粒子を吸着する
- 中心星近傍 ~ 0.1 auでは熱電離で電離度高。円盤外側ではそれなりに電離。

Sano et al. 2000, Dzyurkevich et al. 2013; Simon et al. 2015; see Lesur 2020



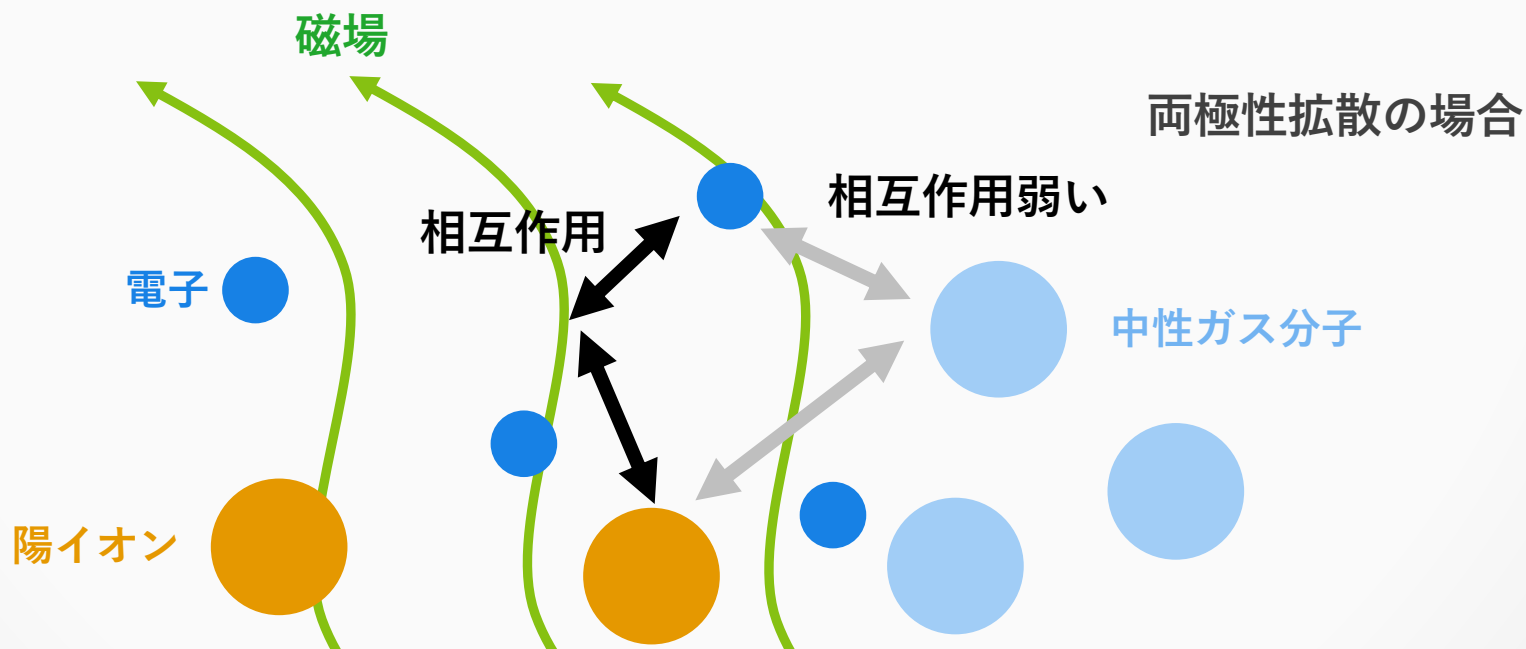
原始惑星系円盤の磁気流体力学(MHD)

- 電離度が高い → 磁場とガスが荷電粒子を介して共に運動



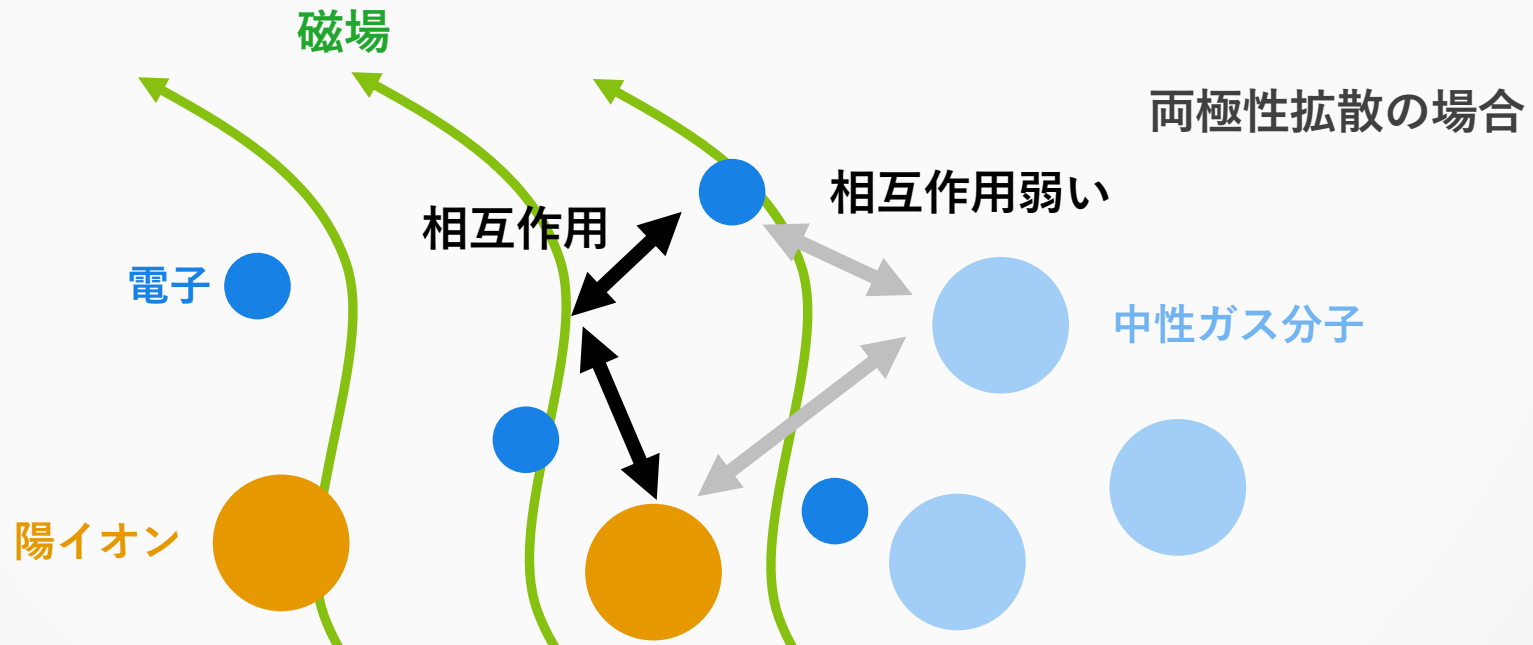
原始惑星系円盤の”非理想”磁気流体力学(MHD)

- 電離度が高い → 磁場とガスが荷電粒子を介して共に運動
- 電離度が高い → 磁場とガスが分離



原始惑星系円盤の”非理想”磁気流体力学(MHD)

- 電離度が高い → 磁場とガスが荷電粒子を介して共に運動
- 電離度が高い → 磁場とガスが分離
- 3つの非理想MHD効果：オーム散逸、両極性拡散、ホール効果
 - オーム散逸と両極性拡散：磁場を拡散させる
 - ホール効果：磁場の向きに依存して、磁場を増幅または減衰させる

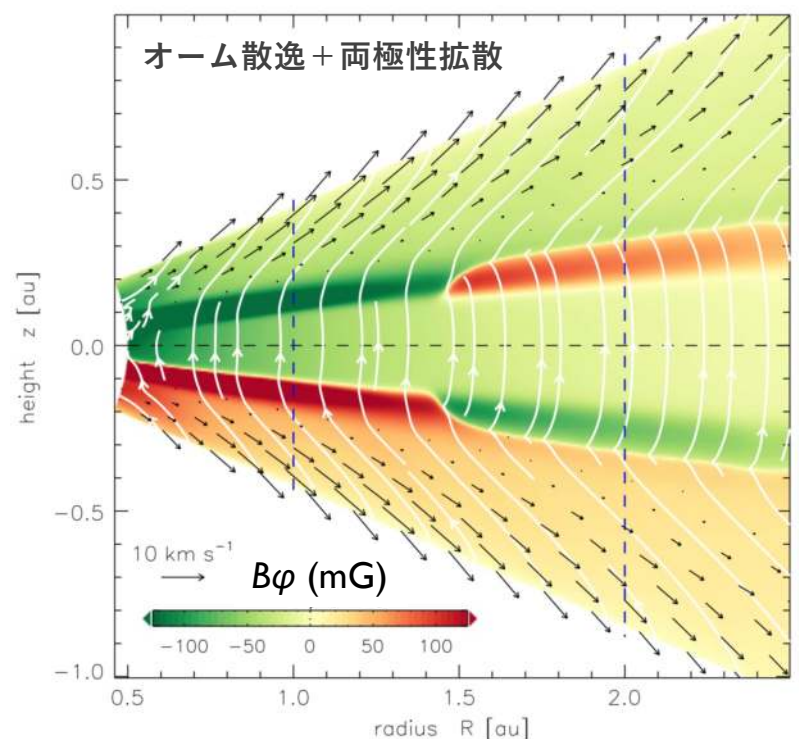
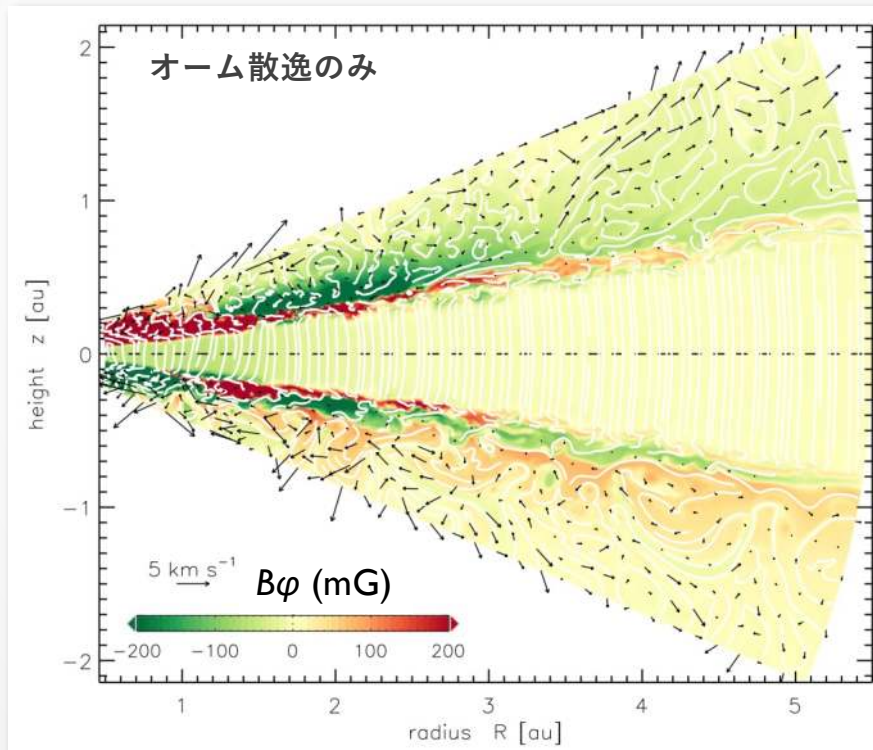


非理想MHD効果が円盤内側領域のMRI乱流を安定化

(e.g. Fleming+00; Turner & Sano 08; Bai & Stone 13; Gressel+15; Bai 17)

- オーム散逸が円盤内部のMRIを抑制
- 両極性拡散が円盤表面のMRIを抑制

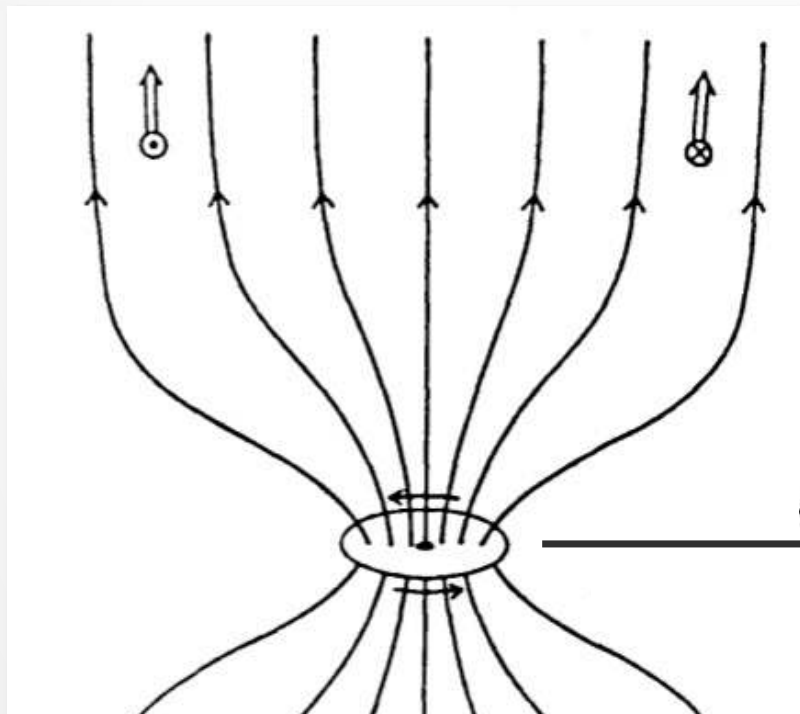
Gressel et al. (2015)



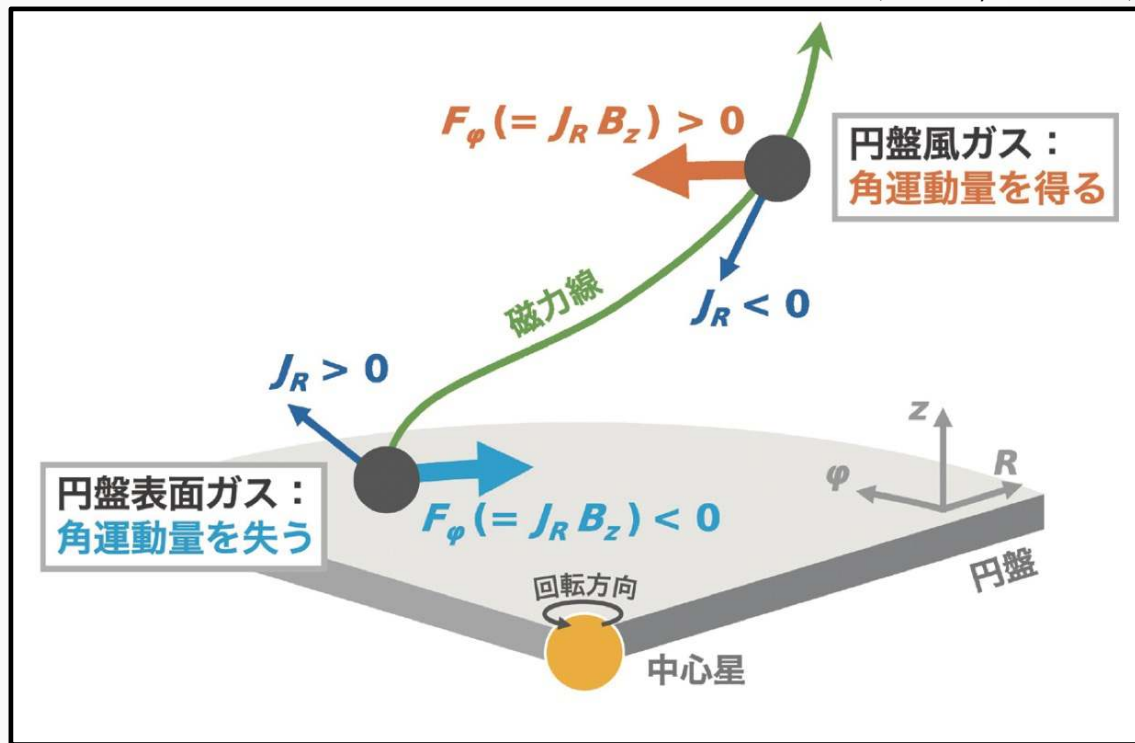
大局的な磁場が円盤降着を引き起こす

- 円盤風を伴う磁気応力 (磁気制動) は降着を引き起こす
(e.g., Uchida & Shibata 1985; Bai & Stone 2013)
 - 磁力線に沿って角運動量を輸送
 - Class II 円盤の典型的な降着率 ($\sim 10^{-8}$ Msun/yr) を再現

Uchida & Shibata 1985



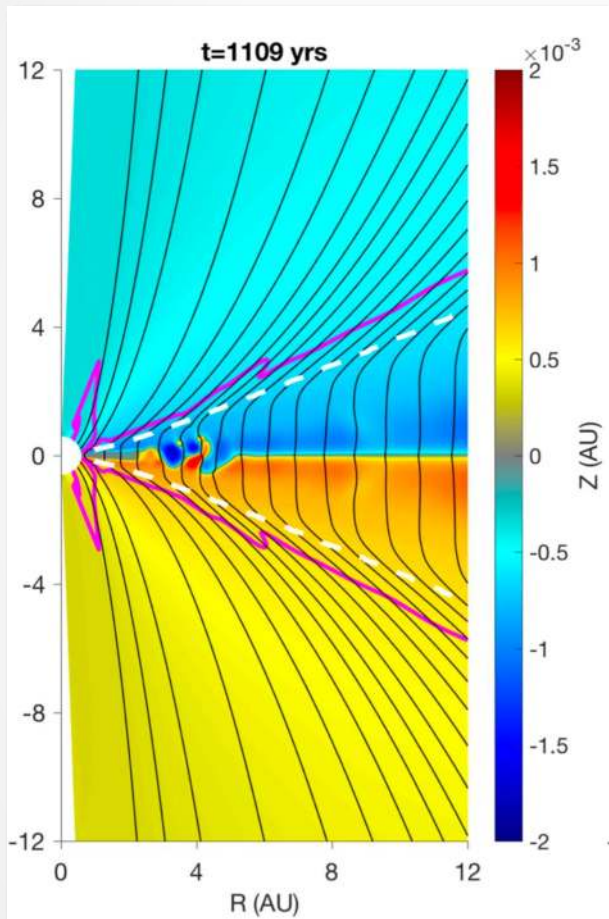
森昇志 (2021, 遊星人)



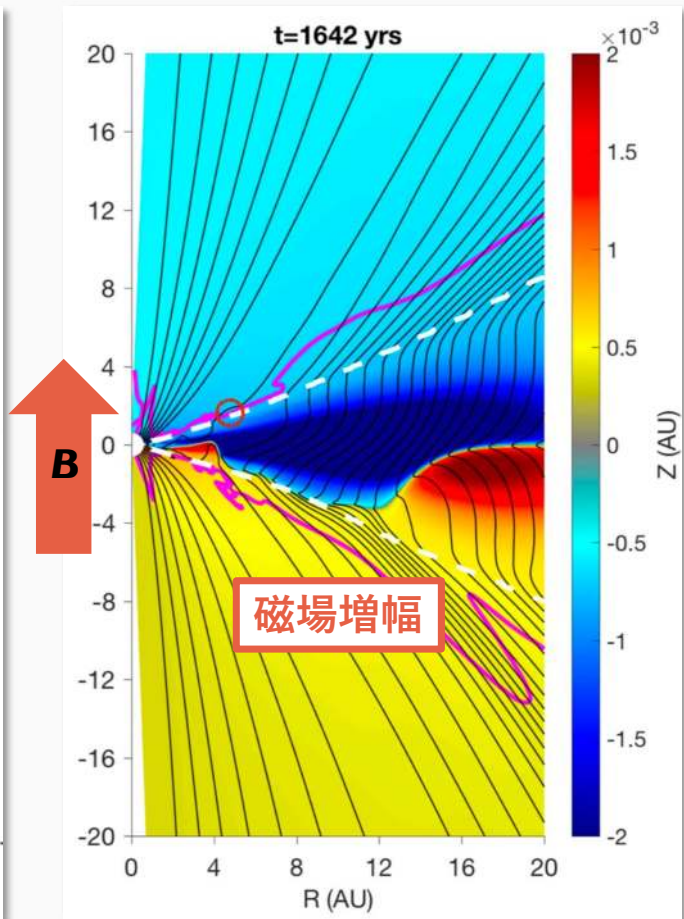
磁場の極性に依存するホール効果

Bai 2017

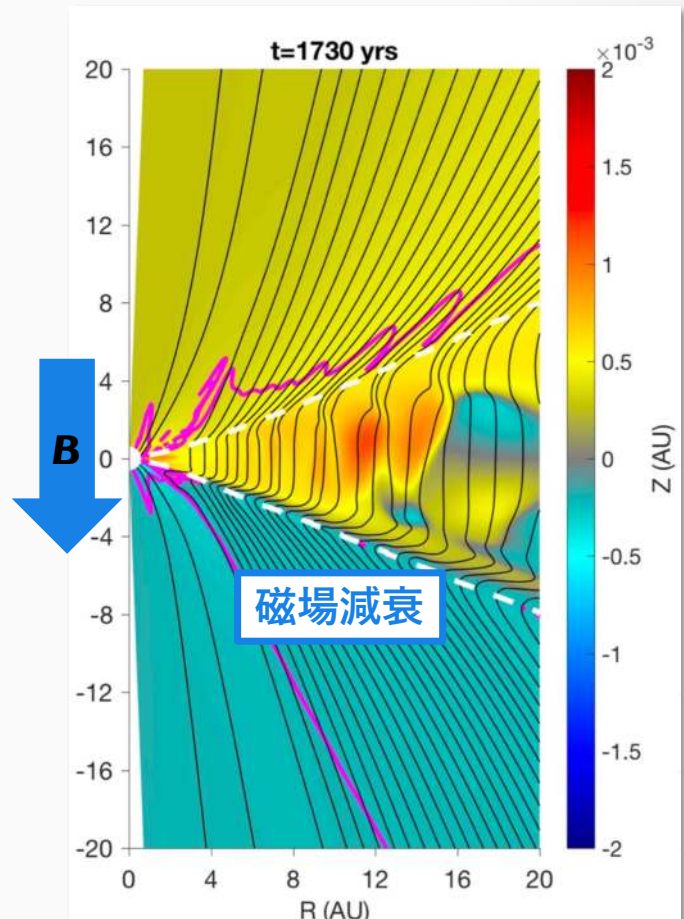
オーム散逸・両極性拡散のみ



ホール効果あり : $B \cdot \Omega > 0$



ホール効果あり : $B \cdot \Omega < 0$



層流的な磁気降着円盤における 円盤の温度構造

原始惑星系円盤の降着加熱の機構を明らかにする

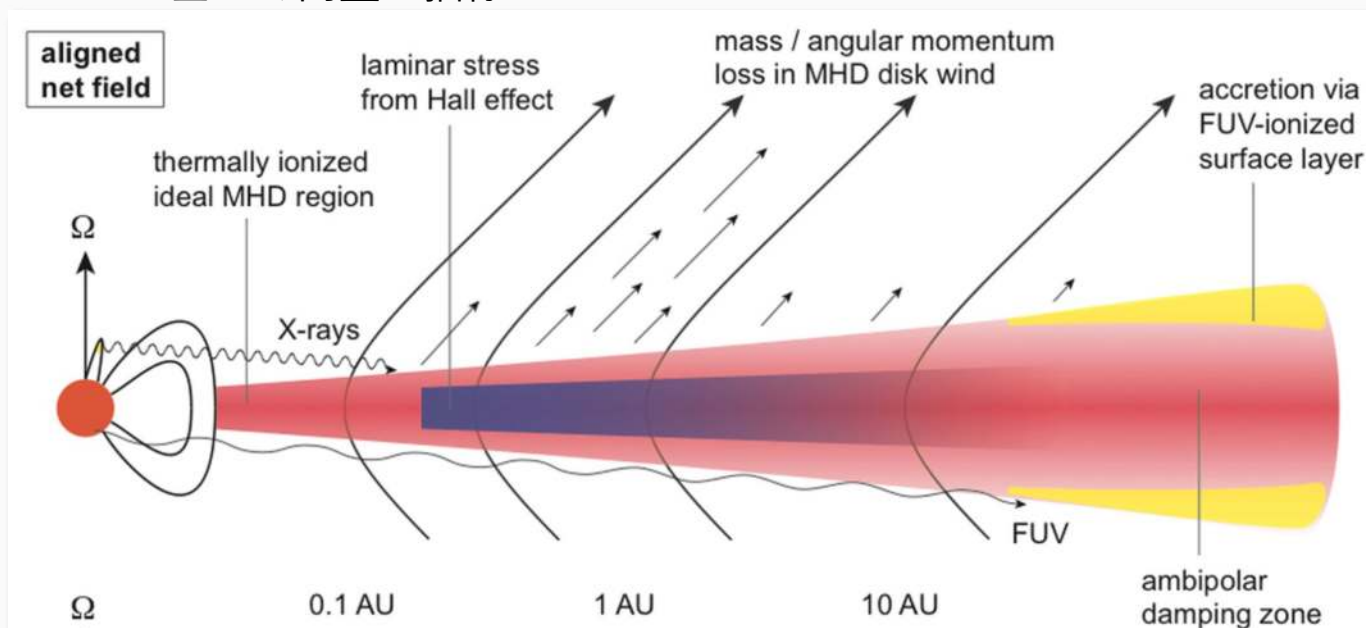
Hirose et al. 2011; Mori et al. 2019

これまで中心星から数auの領域は粘性加熱が支配的だった

→ MHDを考慮し、円盤の力学に基づいた降着加熱の描像を確立したい

MHDに基づく円盤の描像

Simon et al. 2015

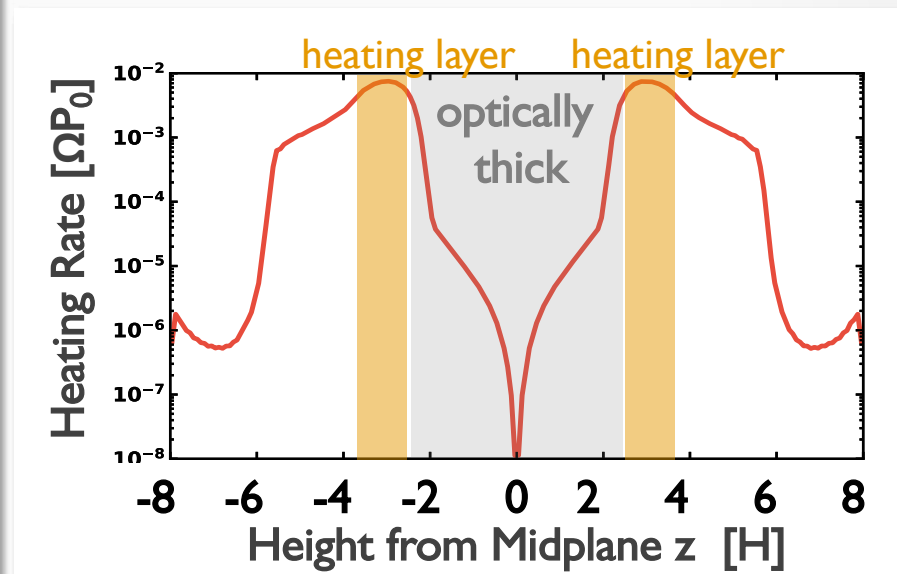
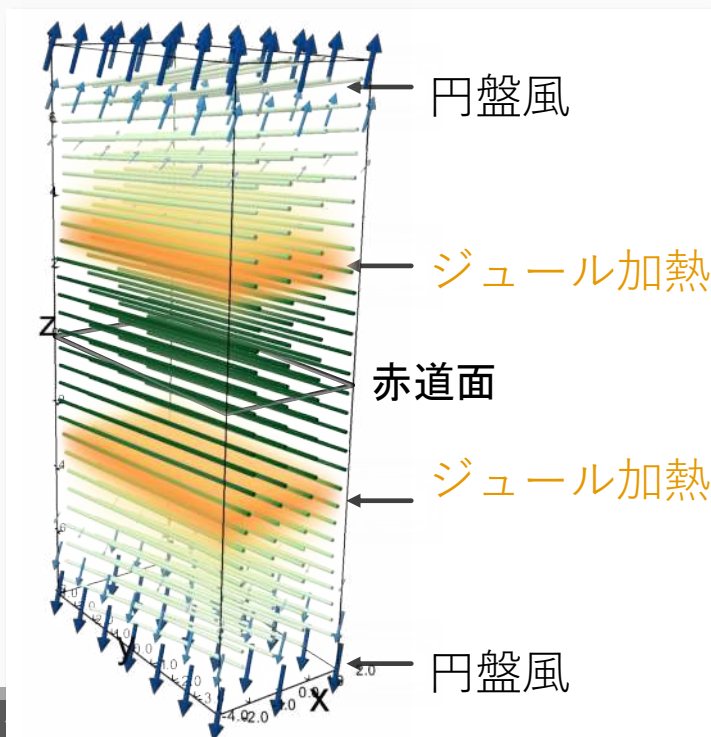
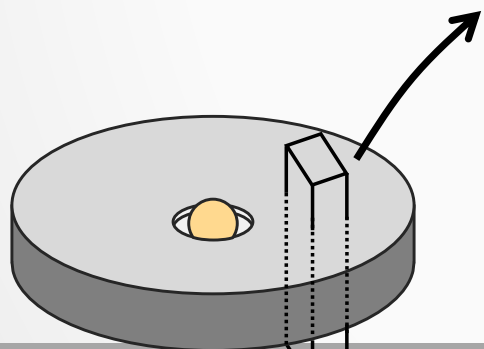


原始惑星系円盤の数auでの加熱高度を求める

Mori et al. 2019

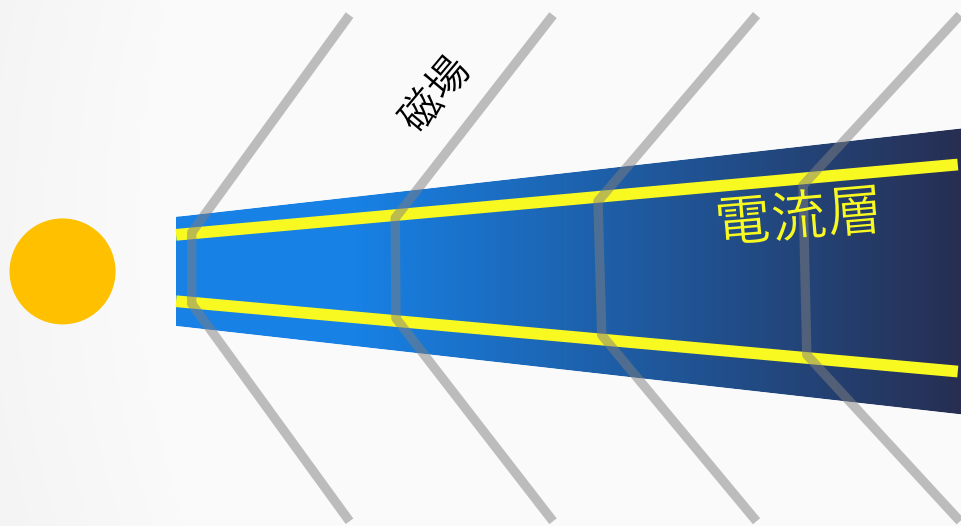
- 全ての非理想MHDを考慮した”局所計算”
 - 円盤のある一部分を取り出した計算領域
 - ケプラー回転はせん断流として考慮、曲率は無視

→ 降着エネルギーの散逸(=ジュール加熱)が高い高度で起きる



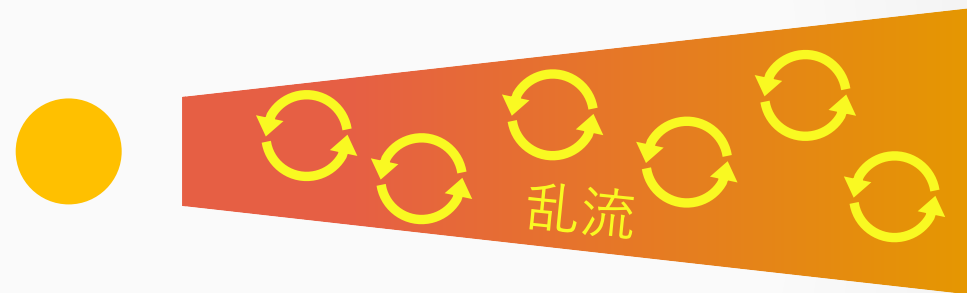
局所シミュレーションから得られる予想

磁気降着層流円盤



円盤表面での加熱

古典的粘性円盤



赤道面近傍での加熱

スノーラインの位置は？ → ID円盤温度モデル

Mori, Okuzumi, Kunitomo, Bai 2021

$$T_{\text{irr}} = 110 \left(\frac{r}{1 \text{ au}} \right)^{-3/7} \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)^{2/7} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1/7} \text{ K}$$

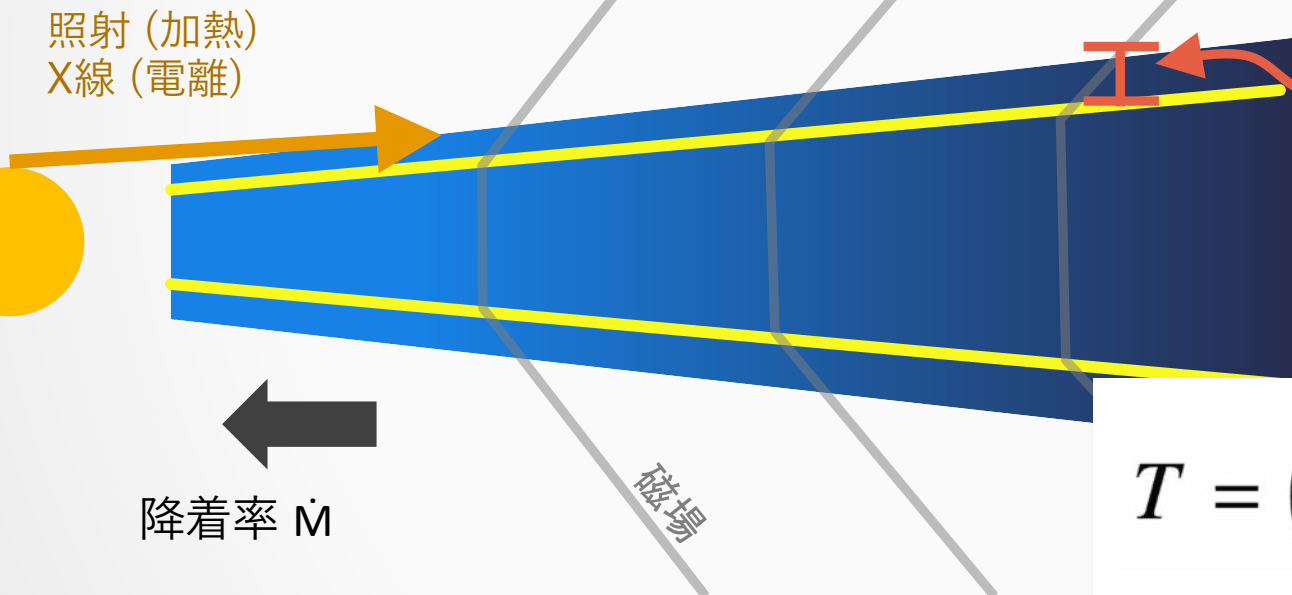
(e.g., Chang & Goldreich 1997)

$$T_{\text{acc, MHD}} = \left[\left(\frac{3\dot{M}\Omega^2 f_{\text{heat}}}{32\pi\sigma} \right) \left(\tau_{\text{heat}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \right]^{1/4}$$

(Mori et al. 2019)

$\tau_{\text{heat}} = \frac{K_{\text{R}}}{\Sigma_{\text{heat}}}$

照射 (加熱)
X線 (電離)

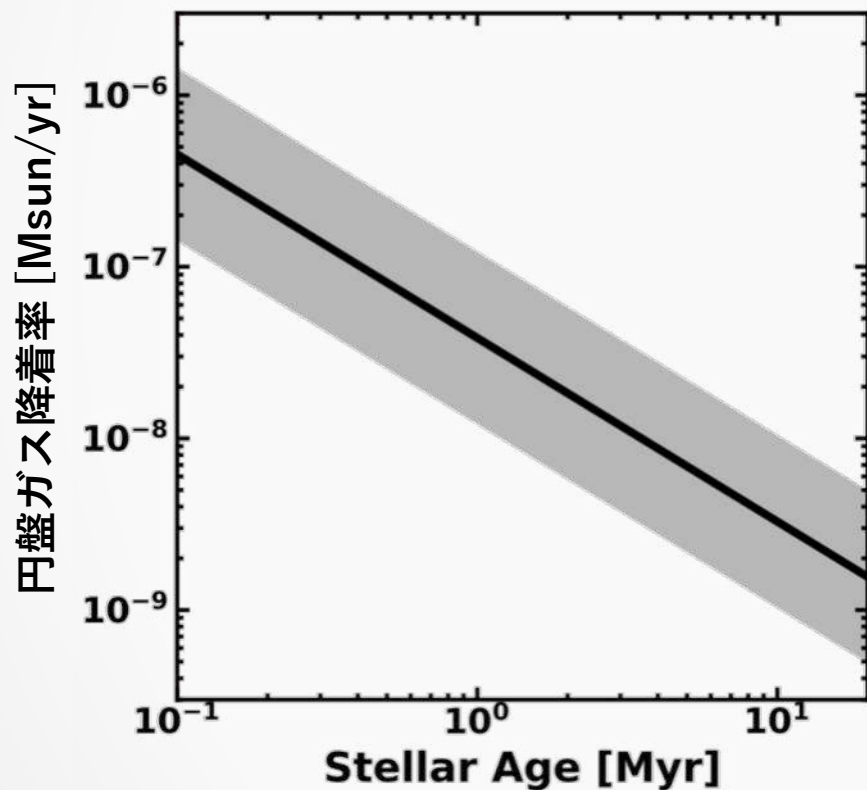


$\Sigma_{\text{heat}} =$ 加熱高度での柱密度
加熱高度 ~ 両極性拡散が弱くなる高度

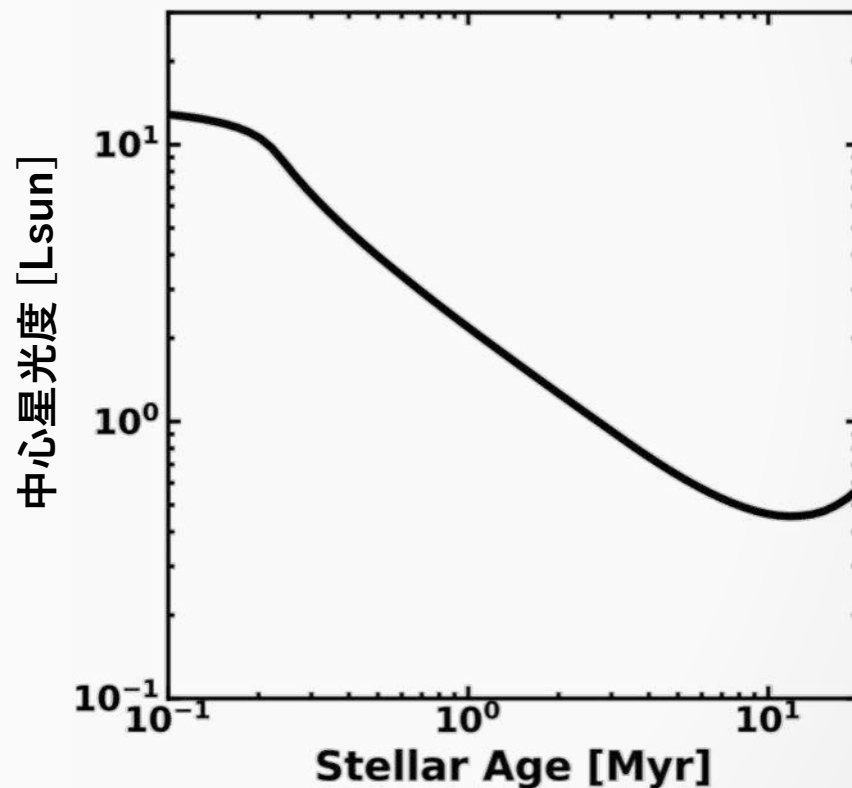
$$T = \left(T_{\text{irr}}^4 + T_{\text{acc, MHD}}^4 \right)^{1/4}$$

円盤ガス降着率と星光度の時間進化を考慮

$\dot{M}(t)$ from observations
(Hartmann 2016)



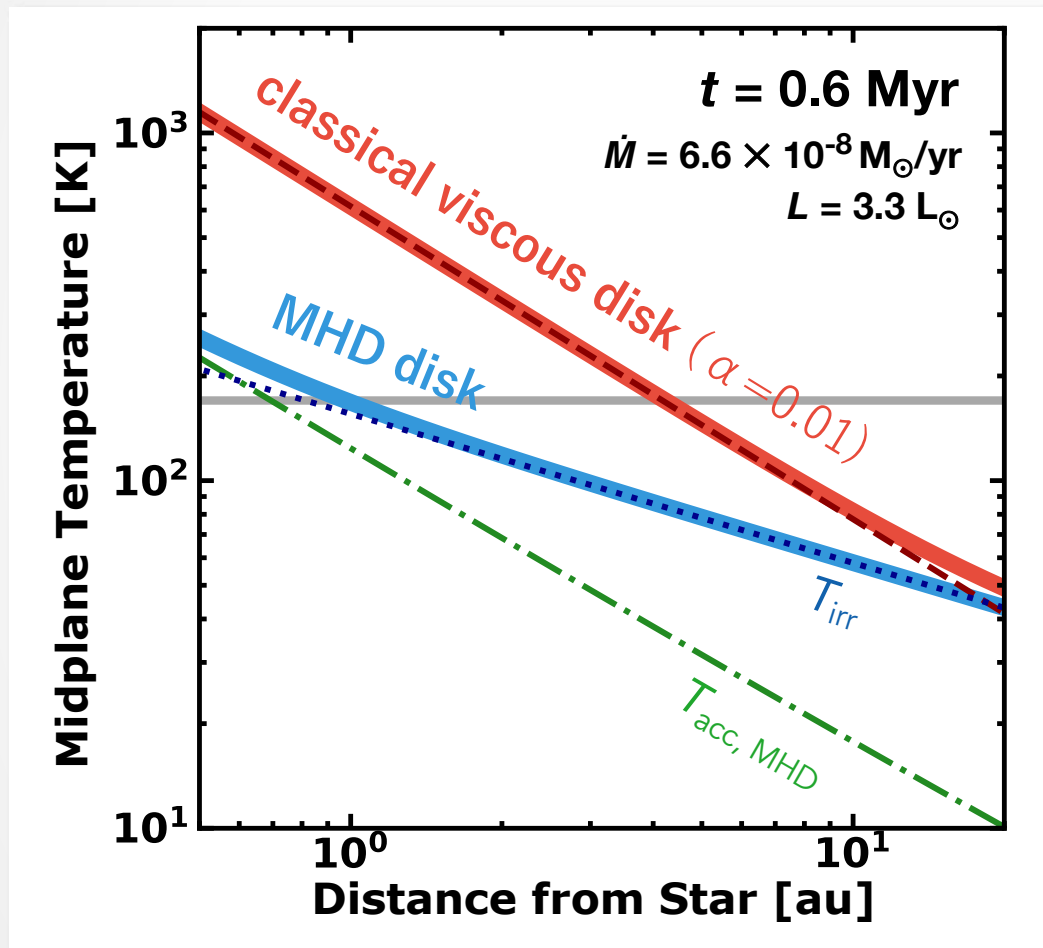
$L(t)$ from evolution model for
solar-mass star (Feiden et al. 2016)



Midplane Temperature Profile

$\kappa = 5 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, $d/g = 0.01$, grain size = $0.1 \mu\text{m}$

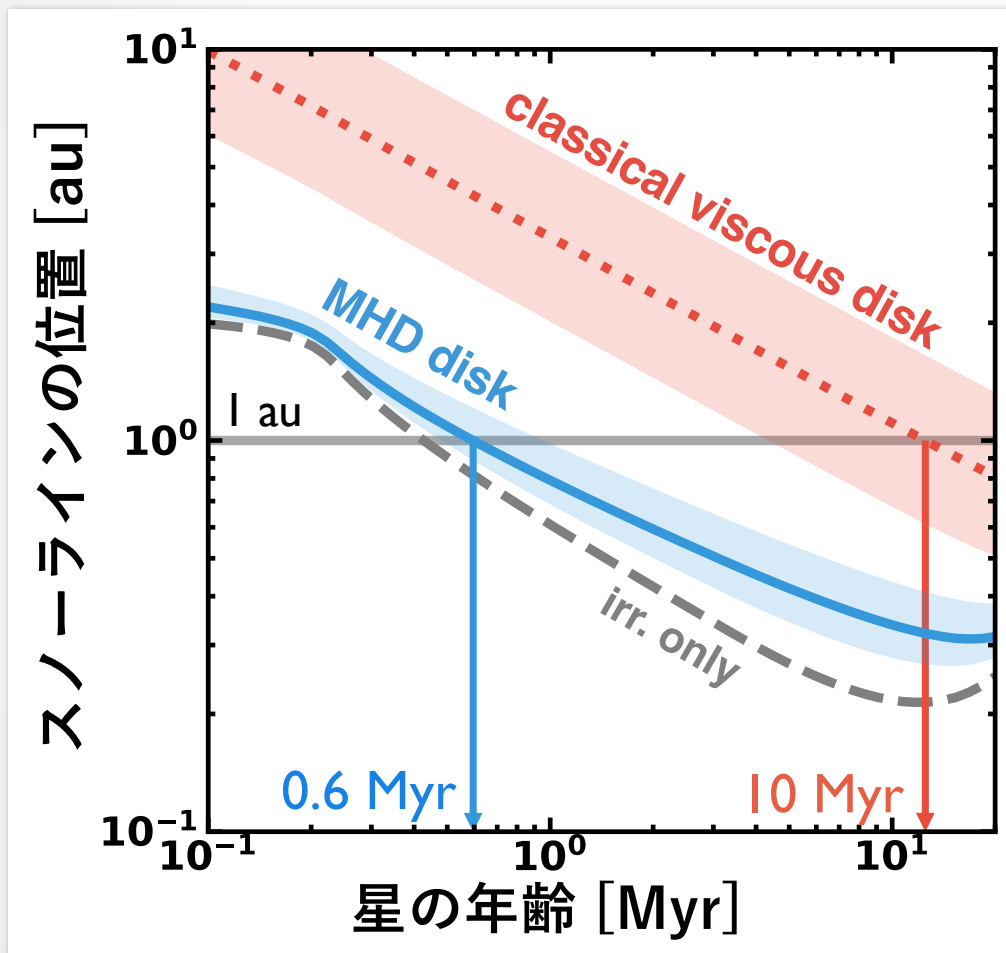
Mori, Okuzumi, Kunitomo, Bai 2021



- 粘性加熱より冷たい円盤に
 - 非効率な降着加熱
 - 数auでも照射加熱が支配的

Migration of Snow Line

Mori, Okuzumi, Kunitomo, Bai 2021



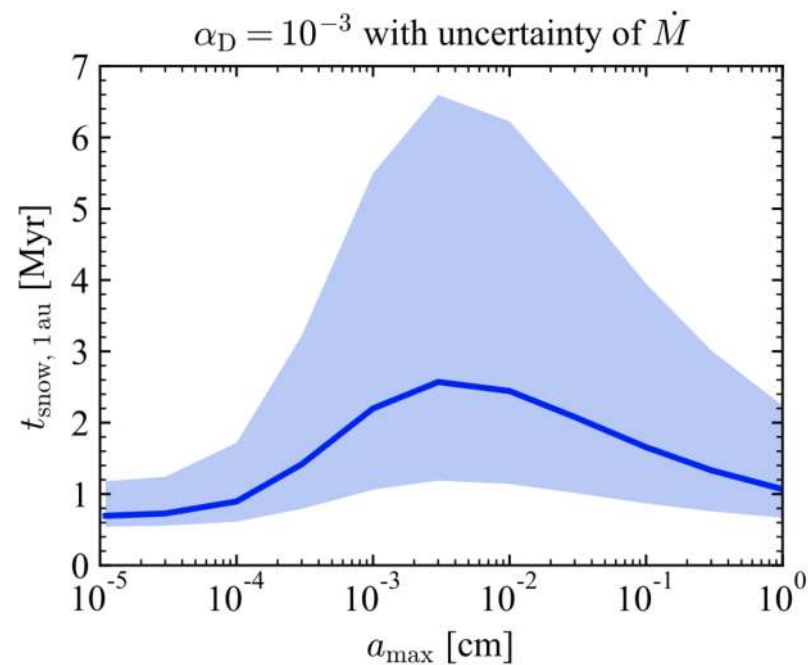
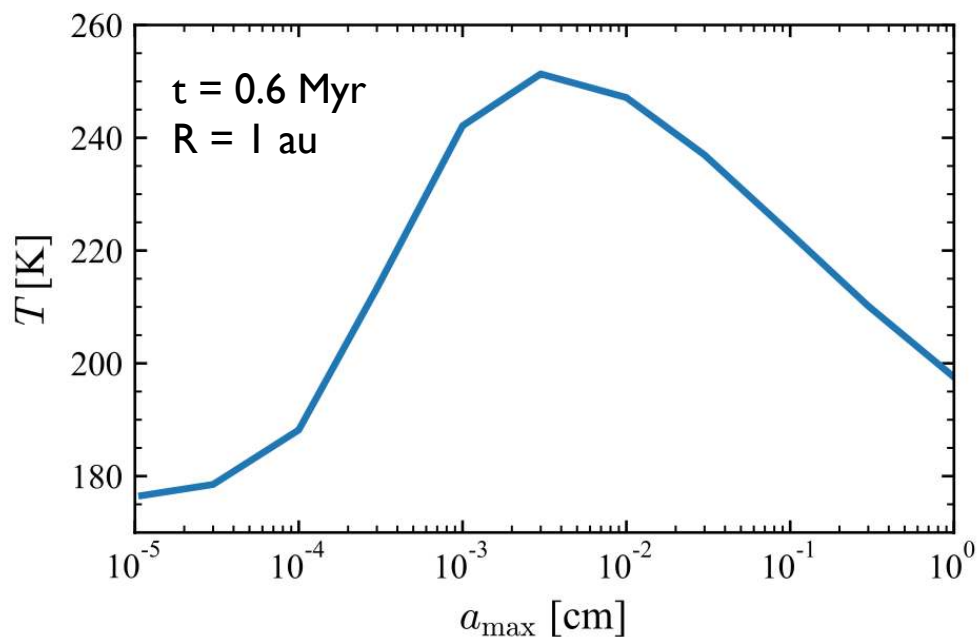
スノーラインは
より早い段階で 1auに到達する
円盤形成後 < 1Myr

岩石(微)惑星は円盤進化の早い段階に
形成したのでは

ダスト成長の効果

Kondo, Okuzumi, Mori (2023)

- 表層加熱はダストのサイズ・空間分布に依存
 - Mori et al. (2021) は シングルサイズ $a = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$ を仮定 二つの効果の競争…
 - ダストが成長すると、電離度が減少(加熱高度の減少) + オパシティの減少(保温効果の上昇)
- あるサイズ分布 ($a_{\min}=0.1\mu\text{m}$, a_{\max} =変数) の整合的な電離度とオパシティを計算
→ 温度分布・スノーラインの到達時間 共に **ダストの最大サイズに依存**



輻射輸送入り 大局的 2D 非理想MHD計算

降着に伴うエネルギー輸送・大局的な磁場構造が作る電流を考慮

- Athena++ (Bai 2017, Stone et al. 2021)

- 非理想 MHD 効果を考慮

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \frac{4\pi}{c} \nabla \times (\eta_O \mathbf{J} + \eta_H \mathbf{J} \times \mathbf{b} + \eta_A \mathbf{J}_\perp),$$

Ohmic diff. Hall effect Ambipolar diff.

- 各係数は電離度計算から求める
- 電離率は柱密度に依存
 - r方向, θ方向の柱密度を計算
 - ダスト : 0.1um 粒子, fdg = 10⁻²

- 簡単化した輻射輸送

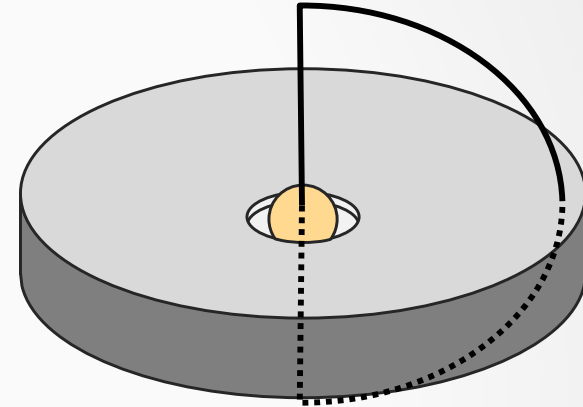
$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} = \dots + Q_{\text{rad}} \quad \text{where} \quad Q_{\text{rad}} = \underbrace{\exp(-\tau_\theta) Q_{\text{thin}}}_{\text{Source term}} - \underbrace{\nabla \cdot [\exp(-1/\tau_\theta) \mathbf{F}_{\text{thick}}]}_{\text{Diffusion term}}$$

$$Q_{\text{thin}} = -4\rho\kappa_P\sigma (T^4 - T_{\text{thin}}^4) \quad \& \quad T_{\text{thin}}^4 = (T_{\text{opt}}(r) \exp(-\tau_r))^4 + T_{\text{re}}^4$$

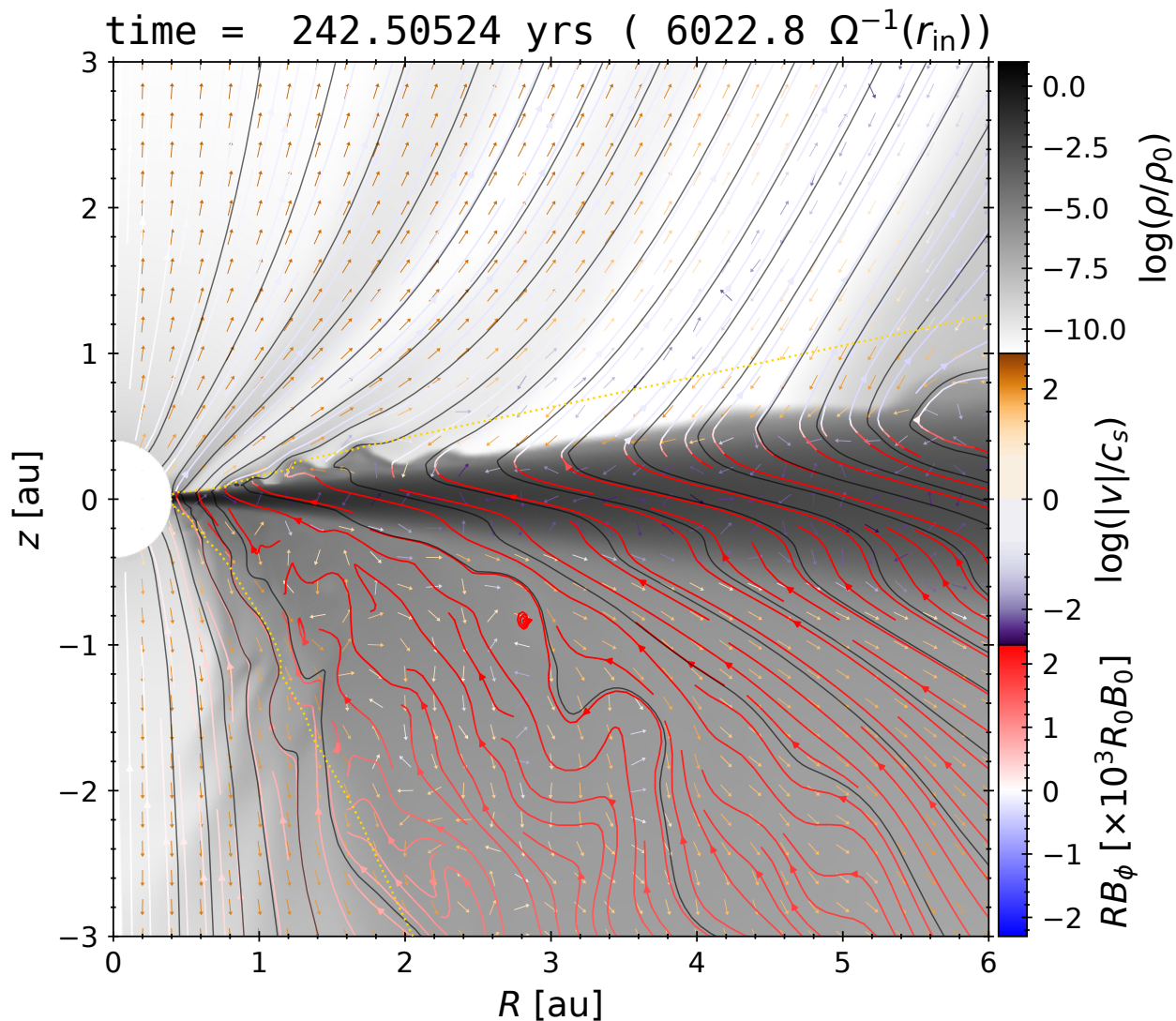
T_{re}^4 : reemitted radiation intensity; RT eq. is integrated along θ

$$\mathbf{F}_{\text{thick}} = -\frac{4\sigma}{3\rho\kappa} \nabla T^4$$

Diffusion approximation

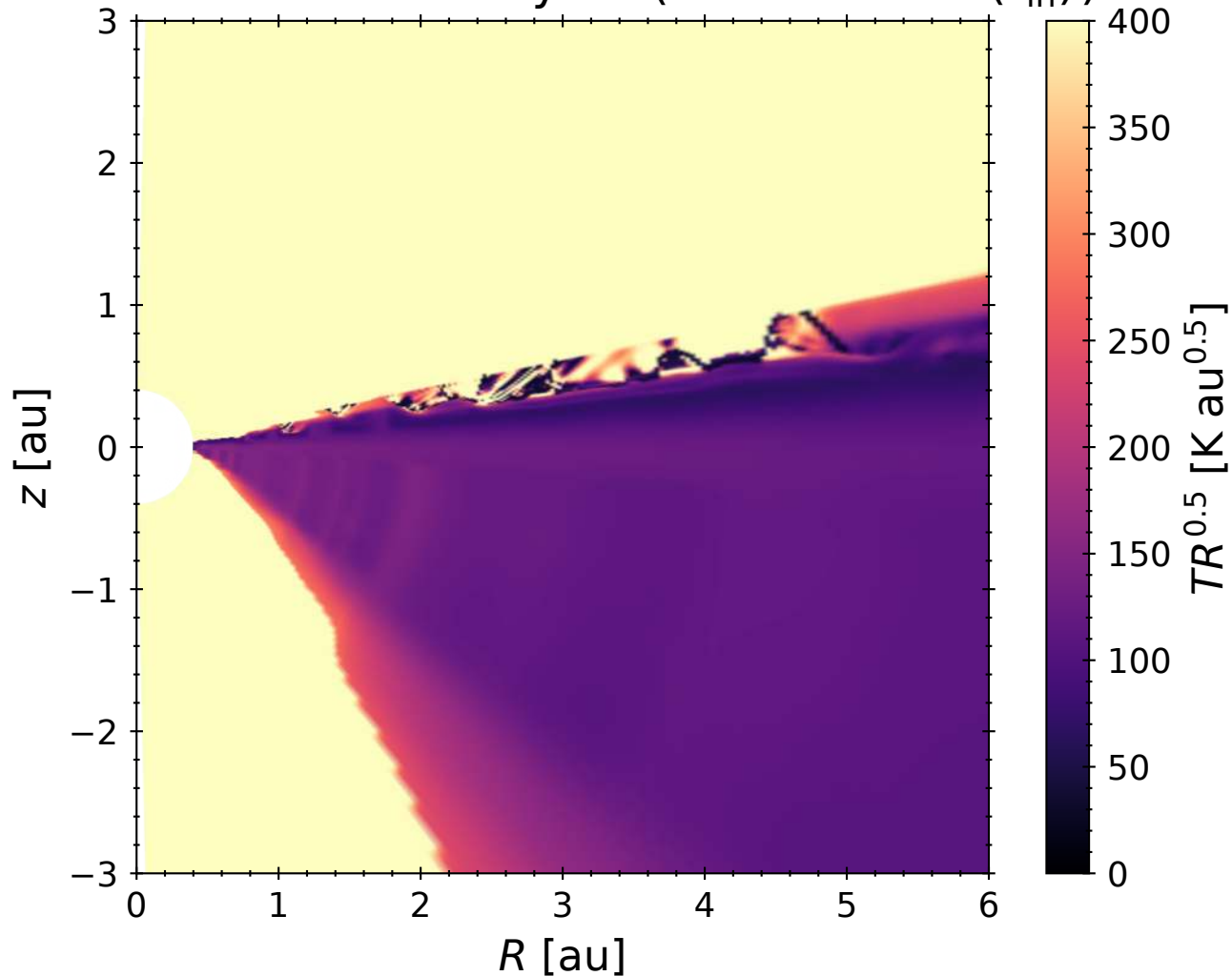


計算結果の例：密度分布

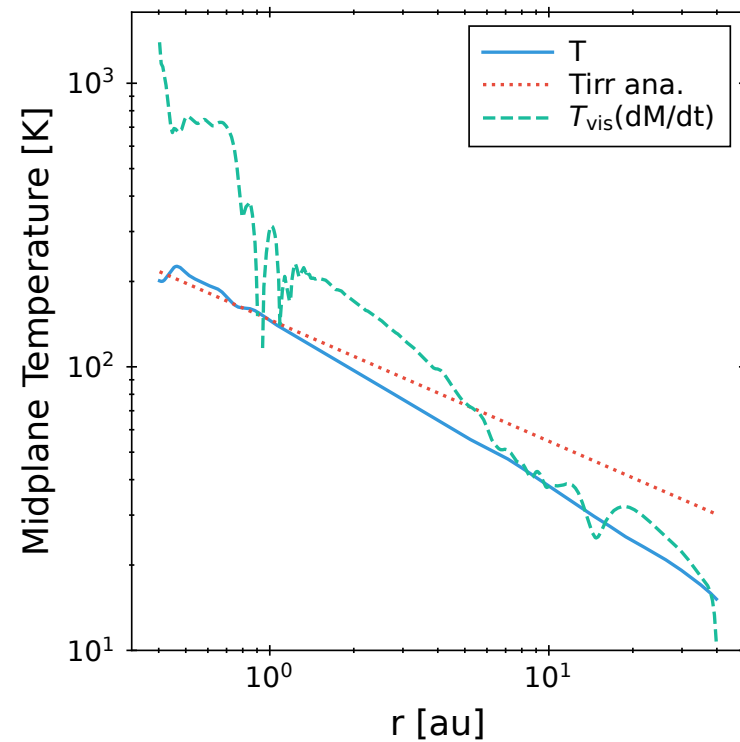


温度構造

time = 242.50524 yrs (6022.8 $\Omega^{-1}(r_{in})$)

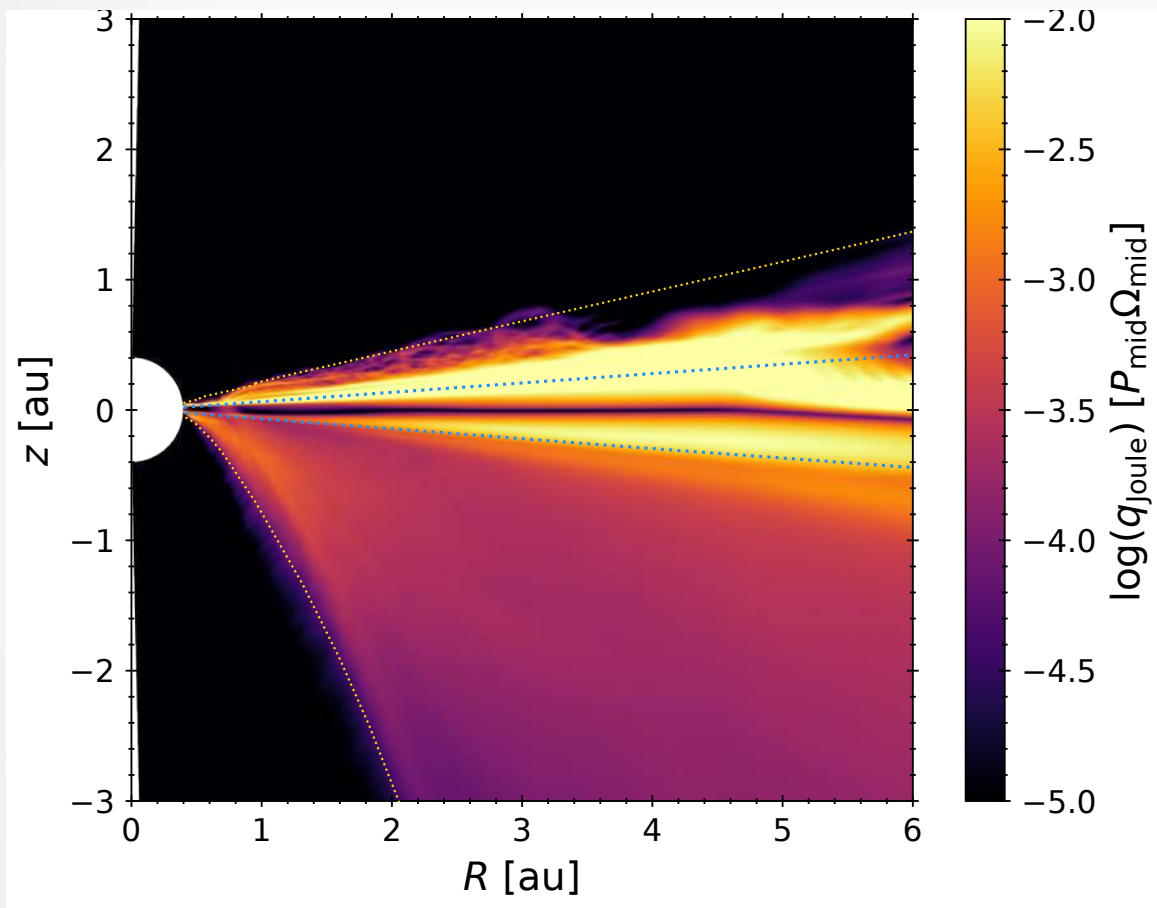


Time-averaged over $t = [200:260]$ yr



$\dot{M} \sim 3e-8 - 2e-7$ Msun/yr

加熱率分布



大局的な磁場は円盤表層で
ジュール加熱を起こす
円盤温度の上昇には寄与しない

まとめ

- 原始惑星系円盤の温度構造を知ることは、惑星の組成の成り立ちを知る上で欠かせない。
- 原始惑星系円盤では非理想MHD効果が働く。しかしMHDは依然として重要な要素。
 - MRI乱流は抑制
 - 円盤降着は大局的な磁気応力によって駆動
 - ホール効果が円盤の磁気活動を二極化
- 非理想MHD効果によって、原始惑星系円盤では降着加熱は非効率となるだろう。
 - 加熱が上層で起きる
 - 具体的な効率は大局的なシュミレーションが必要