

磁気円盤風駆動降着における ガスの加熱

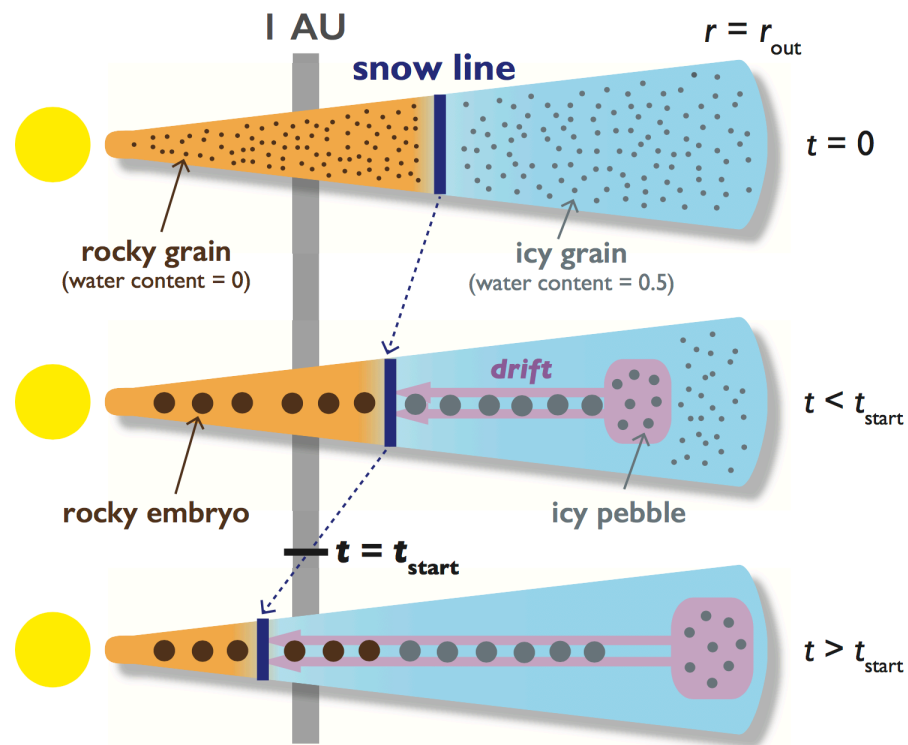
森 昇志 (東工大)

Xue-ning Bai(CfA), 奥住 聡(東工大)

原始惑星系円盤における温度構造

原始惑星系円盤の温度構造の解明は非常に重要

- 固体物質の分布
- 岩石型惑星への水の供給



Sato et al. 2016

粘性加熱のおさらい

- 円盤の加熱機構：
中心星からの輻射加熱 or 粘性加熱
- 粘性加熱：
粘性降着時に解放された重力エネルギーが、
乱流粘性等によって散逸し、熱に変換される機構
- 円盤が光学的に厚い時、
保温効果により赤道面を高温にする



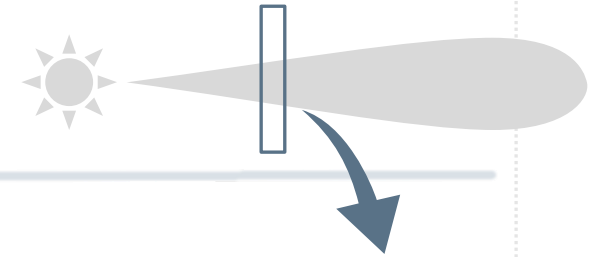
粘性加熱でよく用いられる仮定

「降着エネルギーは赤道面で散逸」

- 円盤全体が乱流状態なら、
乱流粘性によるエネルギー散逸率は密度に比例
→ 仮定OK
- しかし、乱流の空間分布は乱流発生機構に依存

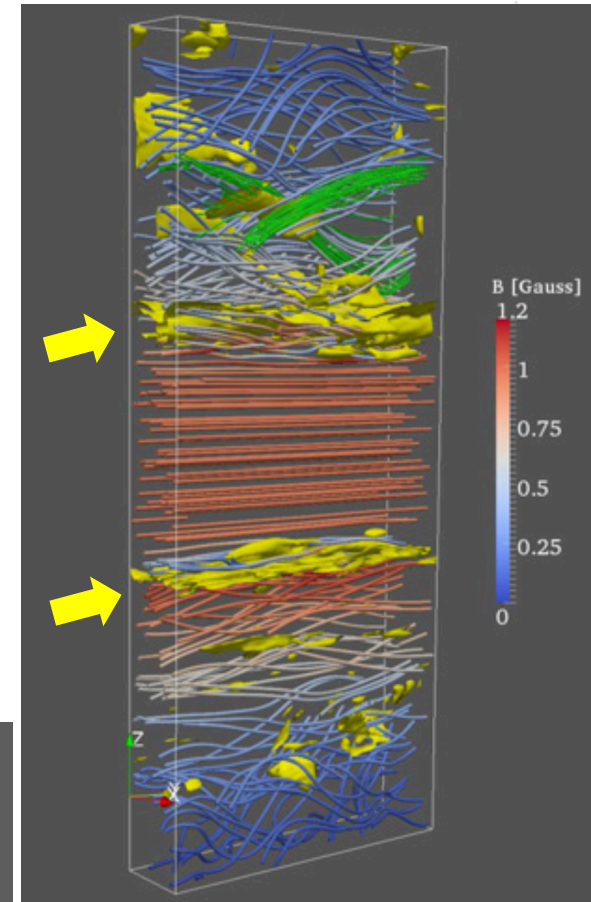
この仮定は 磁場のある円盤 でも成り立つ？

磁気乱流円盤での加熱



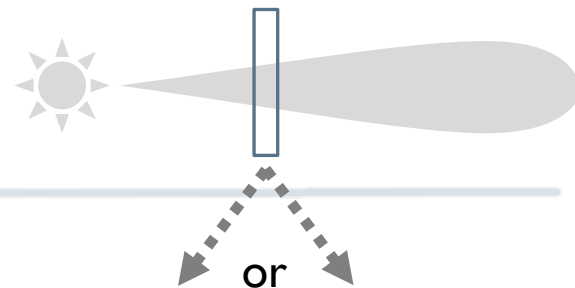
Hirose & Turner 2011

- MRIは磁気乱流を生成
- 低電離度領域ではMRI安定：
デッドゾーン
- 上層でエネルギー散逸
(Hirose & Turner 2011)
- その結果、赤道面は低温に
(理由は後述)



チューブ：磁力線
黄色：ジュール加熱領域

円盤上層での加熱



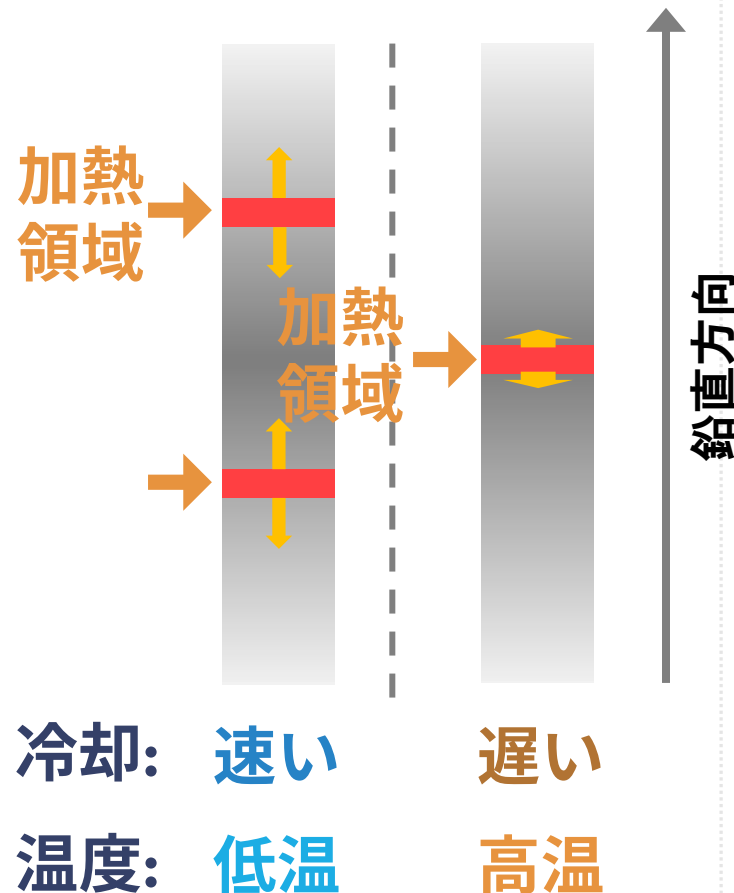
保温効果が非効率的

- 加熱：降着エネルギー
- 冷却：輻射輸送

$$F_{\text{dif}} \propto \frac{T^3}{\kappa \rho} \frac{dT}{dz}$$

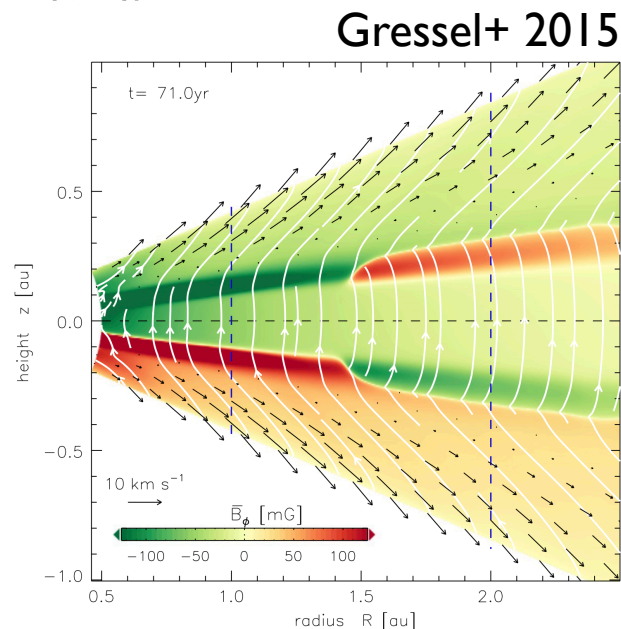
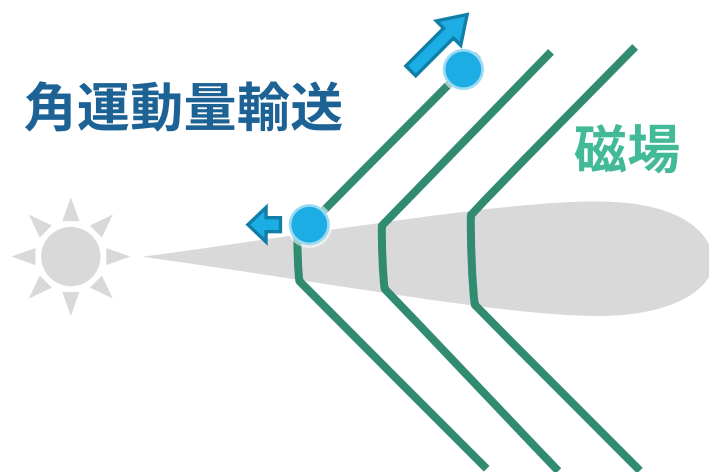
加熱領域間はフラックスが0
加熱領域の温度 = 赤道面温度

→ 赤道面は低温になる



円盤風駆動降着

- 上層も両極性拡散によって**MRI**が安定化しうる (Bai & Stone 2013)
- 磁気遠心力風が卓越
ガスを遠方に飛ばす反作用で円盤角運動量を抜く
- **MRI**乱流に代わる角運動量輸送機構



本研究の目的

磁場のある円盤の温度構造は
磁気流体力学構造に依存する

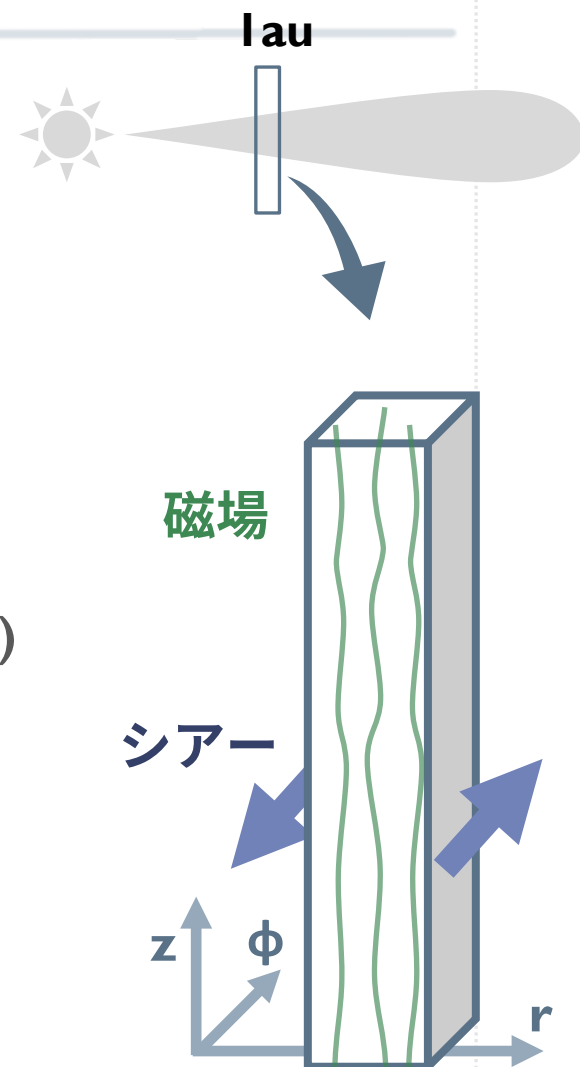
円盤風駆動降着のときの温度構造は？

円盤風が卓越した円盤で、どこで・どのくらい
エネルギーが散逸するか明らかにする

数値計算モデル

磁気流体力学計算を行い、
エネルギー散逸率の分布を求める

- MHDコード“**Athena**”を使用 (Stone+08)
- 非理想MHD効果を3種類考慮：
オーム散逸・ホール効果($B_z > 0$)・両極性拡散
- 円盤モデル
MMSN: $\Sigma = 1700 \text{ g/cm}^2$, $T = 280 \text{ K}$ (等温)
- 抵抗モデル: $r = 1 \text{ au}$, $d/g = 10^{-4}$, $a = 0.1 \text{ um}$
- 赤道面ガス圧/磁気圧 = 10^5
- 計算領域: $(0.48H, 0.48H, 16H)$
グリッド数: $(4, 4, 192)$



基礎方程式

- 抵抗性磁気流体力学方程式

連続の式

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

運動方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{B}}{c\rho} + 2\mathbf{u} \times \boldsymbol{\Omega} + 3\Omega^2 x \mathbf{e}_x - \Omega^2 z \mathbf{e}_z$$

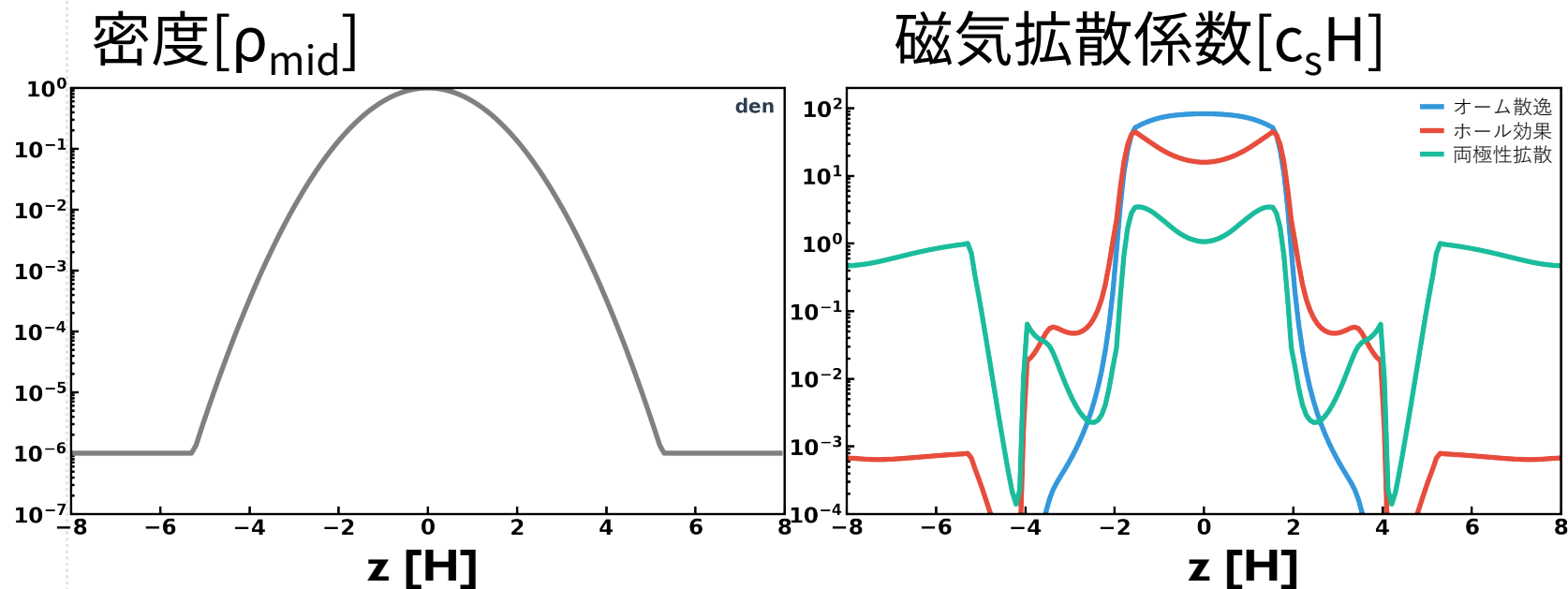
誘導方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) - \nabla \times \mathbf{E}'$$

$$\mathbf{E}' \equiv \eta_O \mathbf{J} + \eta_H (\mathbf{J} \times \hat{\mathbf{B}}) + \eta_A \mathbf{J}_\perp$$

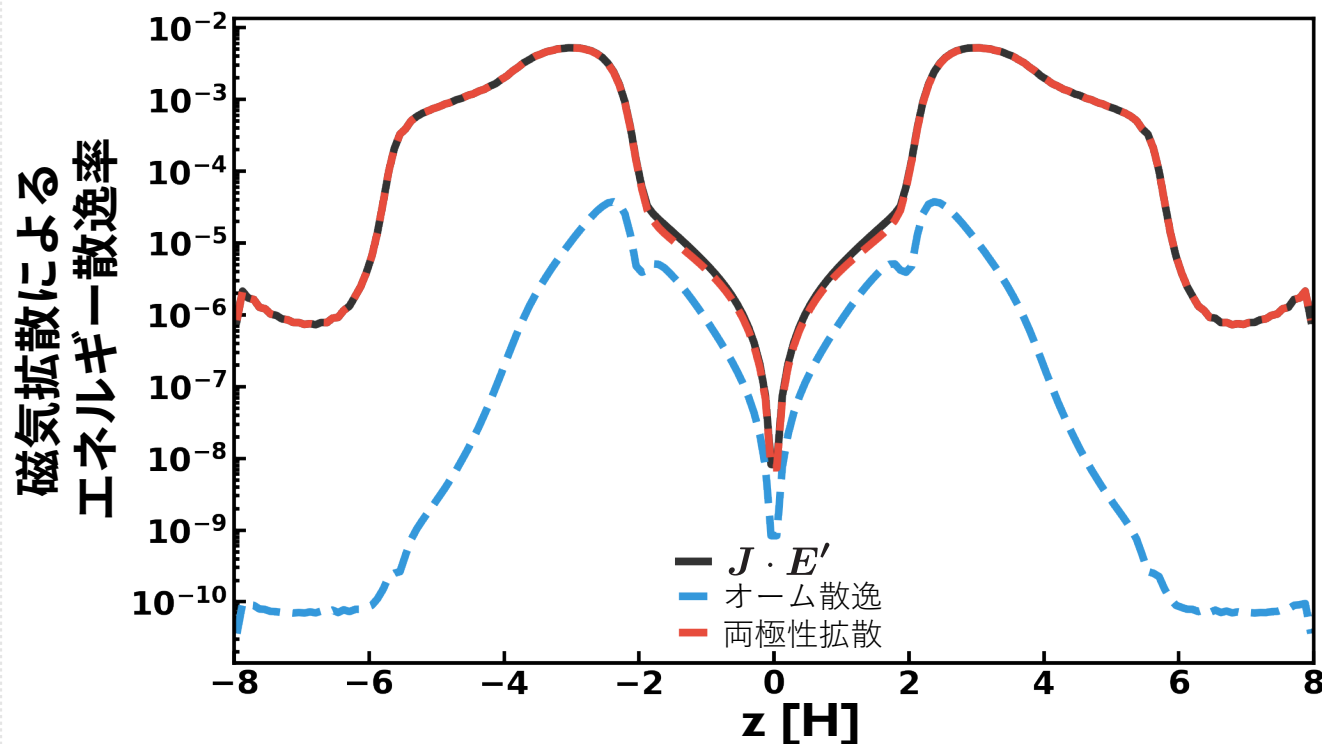
$$\eta_O \propto x_e^{-1}, \quad \eta_H \propto x_e^{-1} \left(\frac{B}{\rho} \right), \quad \eta_A \propto x_e^{-1} \left(\frac{B}{\rho} \right)^2$$

設定：初期分布



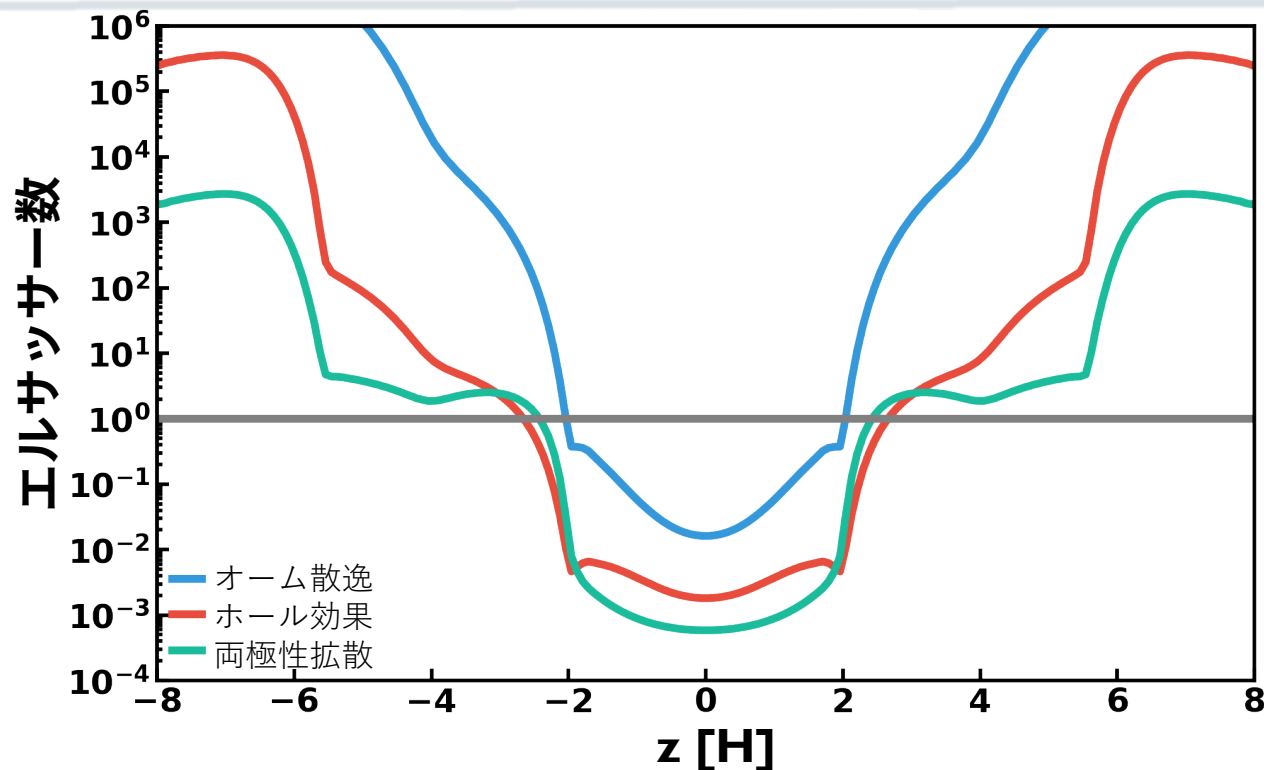
- 密度：静水圧平衡 + 密度下限値
- 磁気拡散係数：オーム → ホール → 両極性拡散
※ 拡散係数の和に上限を設定

結果：エネルギー散逸率の分布



- 3Hでエネルギー散逸率は極大
- 注入したエネルギーのうち70%が散逸

非理想MHD効果の分布

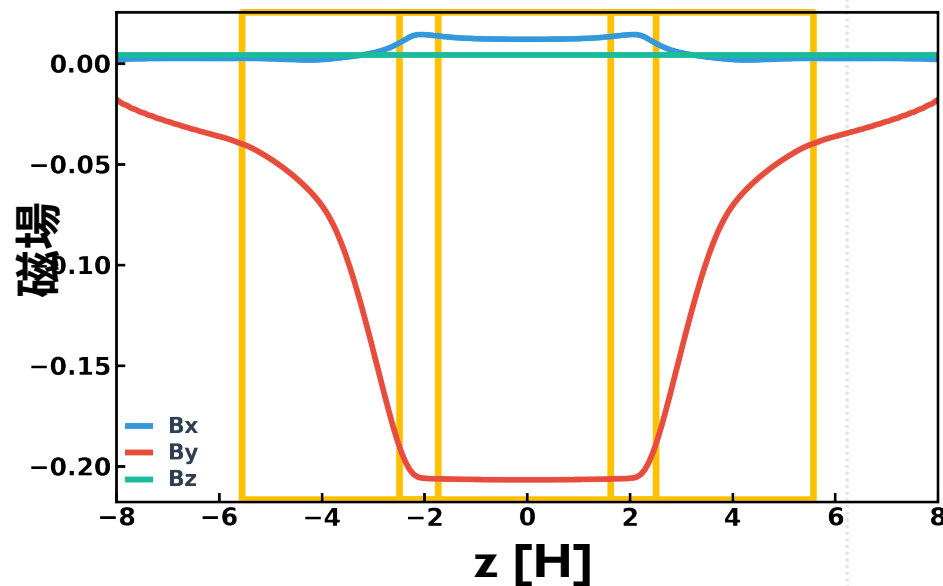
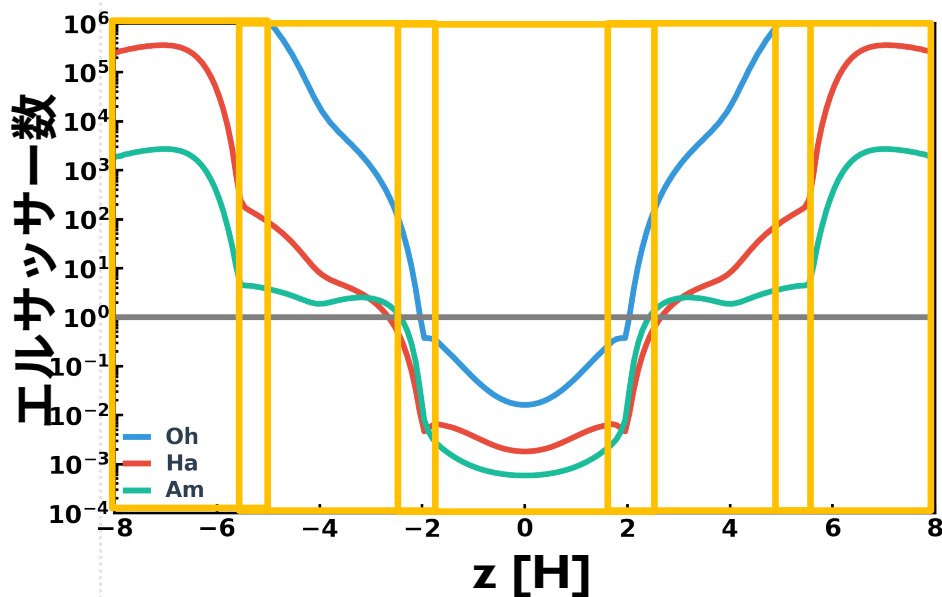


エルサッサー数

$$\Lambda_O = \frac{v_A^2}{\Omega\eta_O} \quad \Lambda_H = \frac{v_A^2}{\Omega\eta_H} \quad \Lambda_A = \frac{v_A^2}{\Omega\eta_A}$$

：誘導項 / 非理想MHD効果の項

非理想MHD効果による電流の減衰



- $|z| < 2H$: 両極性拡散により磁場強度が一定化 \rightarrow 電流流れない
- $|z| \sim 3H$: 磁場が折れ曲る \rightarrow 電流が発生
- $|z| > 6H$: FUVによる電離で拡散係数が下がる \rightarrow 散逸率小

まとめと課題

- 従来の粘性加熱モデルには降着ガスの重力エネルギーを赤道面で散逸させるという仮定がある。
→ 上層で加熱した場合、円盤の加熱は非効率的
- 磁気拡散の効果を考慮した磁気流体計算を行い、加熱領域を求めた
- 計算の結果、**3H**の位置で加熱率が極大値をとることがわかった。
- 今後はパラメーターサーベイを行い、加熱領域がどのように決まっているか原因(=磁力線が折れ曲がる条件)を探る。