

原始惑星系円盤において 磁気流体構造に依存するスノーライン

概要

太陽系形成理論を構築する上で、地球の含水率が小さいという制約を満たす必要がある。水は氷として原始地球に運ばれるため、地球形成過程におけるスノーラインの位置が重要。円盤形成初期は光学的に厚いため、降着加熱がスノーラインの位置を決定すると考えられている。降着加熱を考慮する際、エネルギー散逸が赤道面で起きるという仮定がされる。しかし、このような仮定は必ずしも現実的ではない。磁場のある円盤では、エネルギー散逸は磁場構造と抵抗構造に大きく依存する。本研究では、この事実に着目し、3次元の磁気流体計算を行い、得られたエネルギー散逸率の鉛直分布から赤道面温度を見積もる。計算の結果、上層でエネルギー散逸を起こすことが分かった。上層でエネルギー散逸が起こるとした場合のスノーラインの位置についても議論する。

ポスターのダウンロード



森 昇志

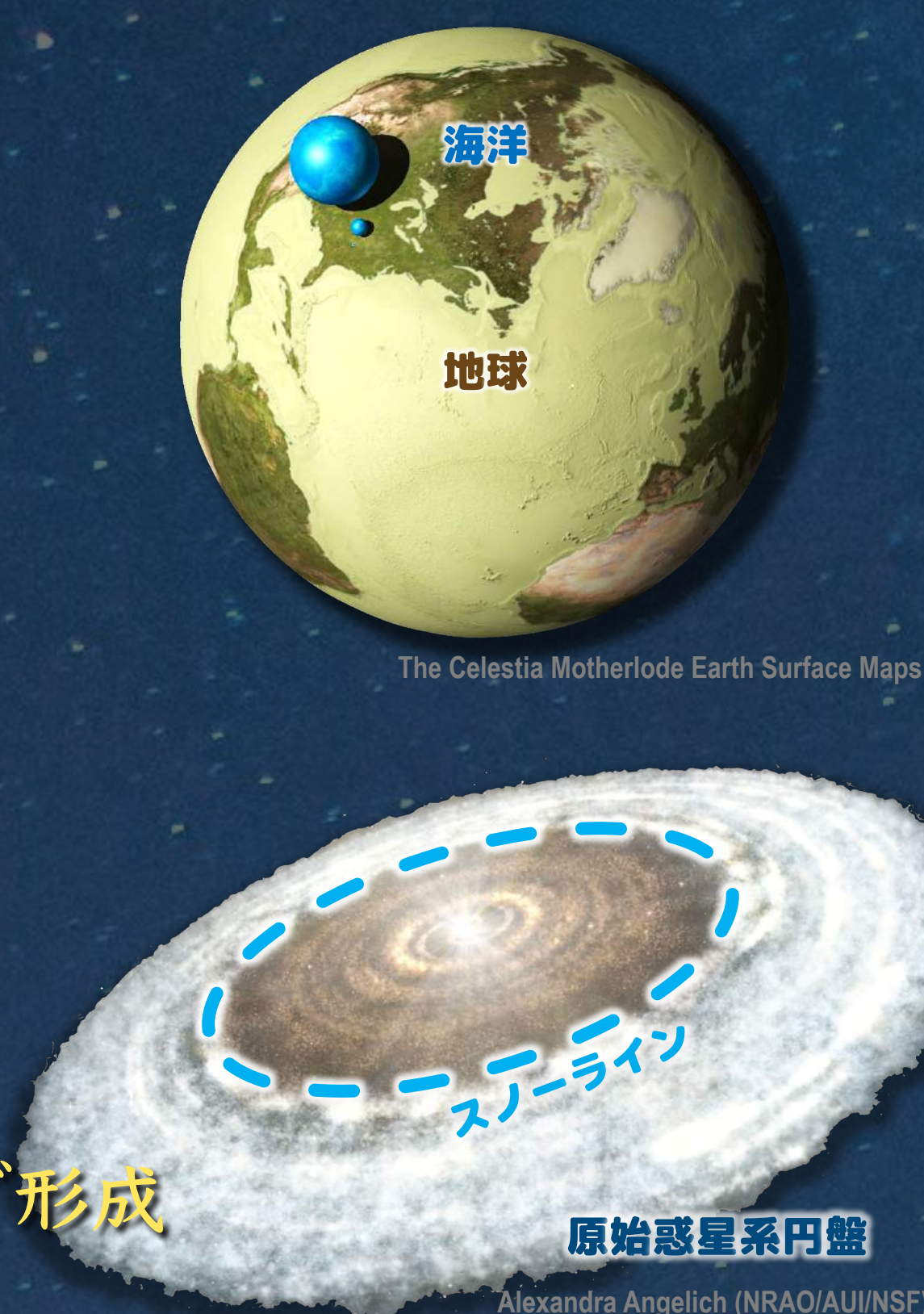
東京工業大学 D2
mori.s@geo.titech.ac.jp

共同研究者：
Xue-ning Bai (CfA) 奥住聡 (東工大)



1 “カラカラ”な地球

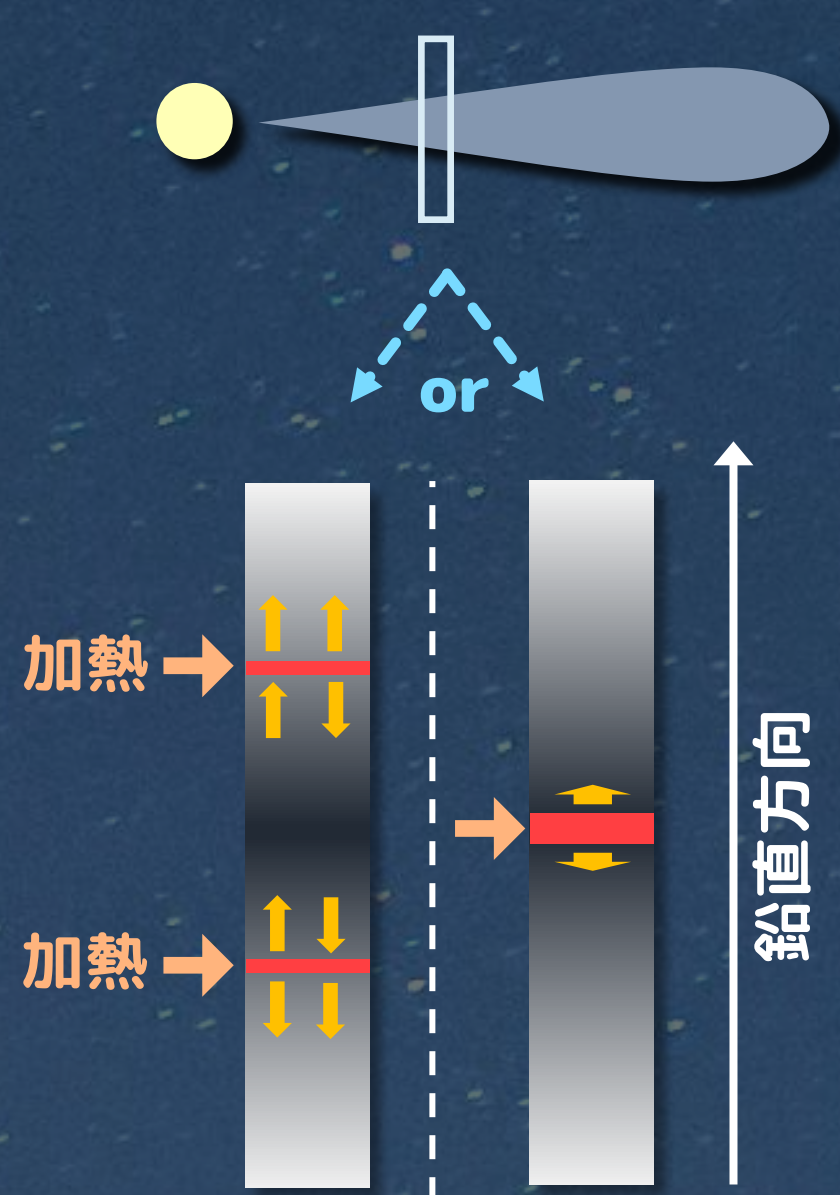
- 太陽系形成理論の構築する上で地球の含水率が小さいという制約が存在
 - 海の質量は地球質量の0.023%
 - 彗星などの外側天体は含水率は高い(~70%)
- 地球形成過程における原始惑星系円盤のスノーラインの位置が重要
 - 氷の昇華凝結境界
 - 水は原始惑星に氷として運ばれる
 - 光学的に薄い円盤で2.7au



おそらく原始地球はスノーライン内側で形成

3 磁気流体円盤では典型的な降着加熱？

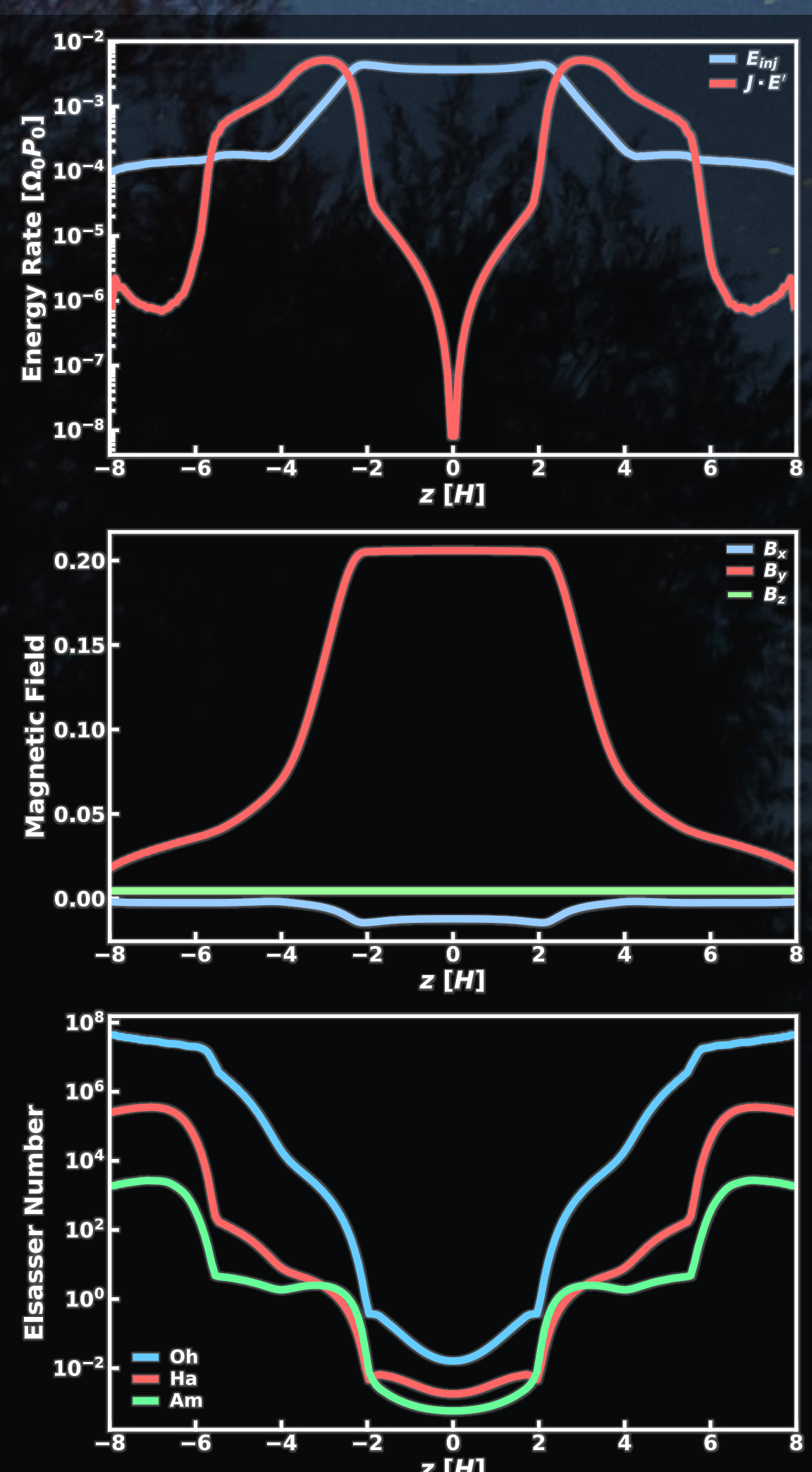
- 降着加熱で暗に使われる仮定
「降着エネルギーは赤道面で全て散逸」
- エネルギー散逸分布は散逸機構に依存
 - この仮定は磁気円盤でも成り立つ？
 - 赤道面では電離度が低く、非理想MHD効果が卓越
 - 円盤風によるエネルギー流出 [Bai 2013]
- 円盤上層での加熱 → 非効率な降着加熱
 - 冷たい円盤：スノーラインはより内側に



研究目的 磁気円盤で降着エネルギーはどこでどのくらい散逸する？その時のスノーラインの位置は？

5 磁気流体計算：結果

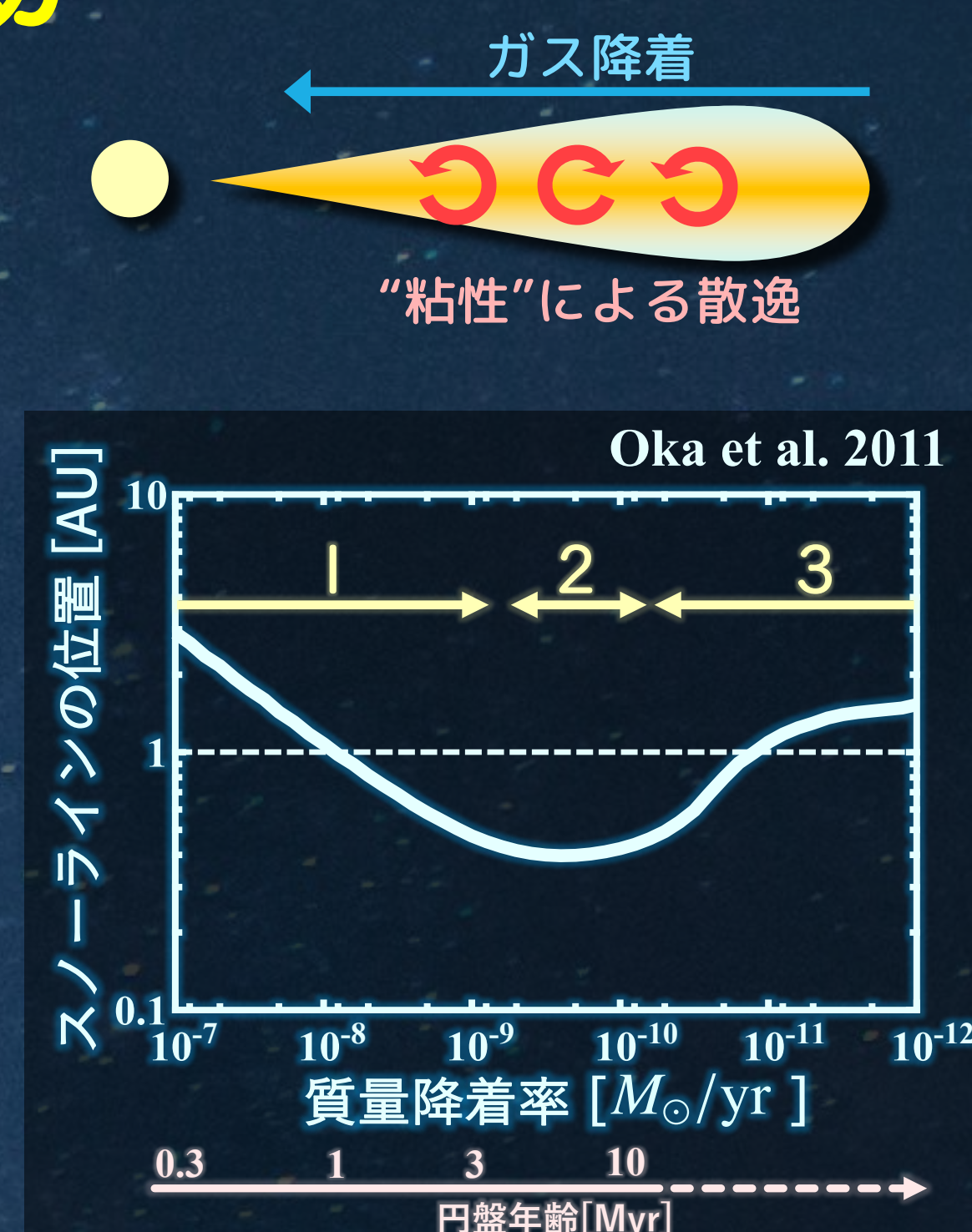
- 注入されるエネルギーは赤道面付近に集中(上段青)
 - シアーのする仕事率 ~ 降着エネルギー
 - 降着は赤道面で起きる
- エネルギー散逸は $z=\pm 3H$ で極大(上段赤)
 - $|z| < 2H$ ：両極性拡散により磁場強度が一定化(中段赤) → 電流流れない
 - $|z| \sim 3H$ ：磁場が折れ曲る(中段赤) → 電流が発生、エネルギーが散逸
 - $|z| > 6H$ ：FUVによる電離で拡散係数が下がる(下段緑) → 散逸率小
- エネルギー注入率の70%が散逸、残りは鉛直境界から流出



2 スノーラインの移動

- 光学的に厚い円盤の温度：
中心星からの照射 + 降着加熱
- スノーラインは降着率に応じて移動
 1. 光学的に厚く、降着加熱が支配的
 2. 降着率が下がり、中心星照射が支配的
 3. 光学的に薄くなり、中心星照射が効率的
- 原始地球は高降着率の時代に形成？
[e.g., Morbidelli et al. 2016, Sato et al. 2016]
 - 1 Myrで原始地球できる？

降着加熱によるスノーラインの移動モデルをより正確にすることが重要



4 磁気流体計算：設定

- 磁気流体計算を行い、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
 - 円盤モデルは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)



- 誘導方程式 with 非理想MHD効果

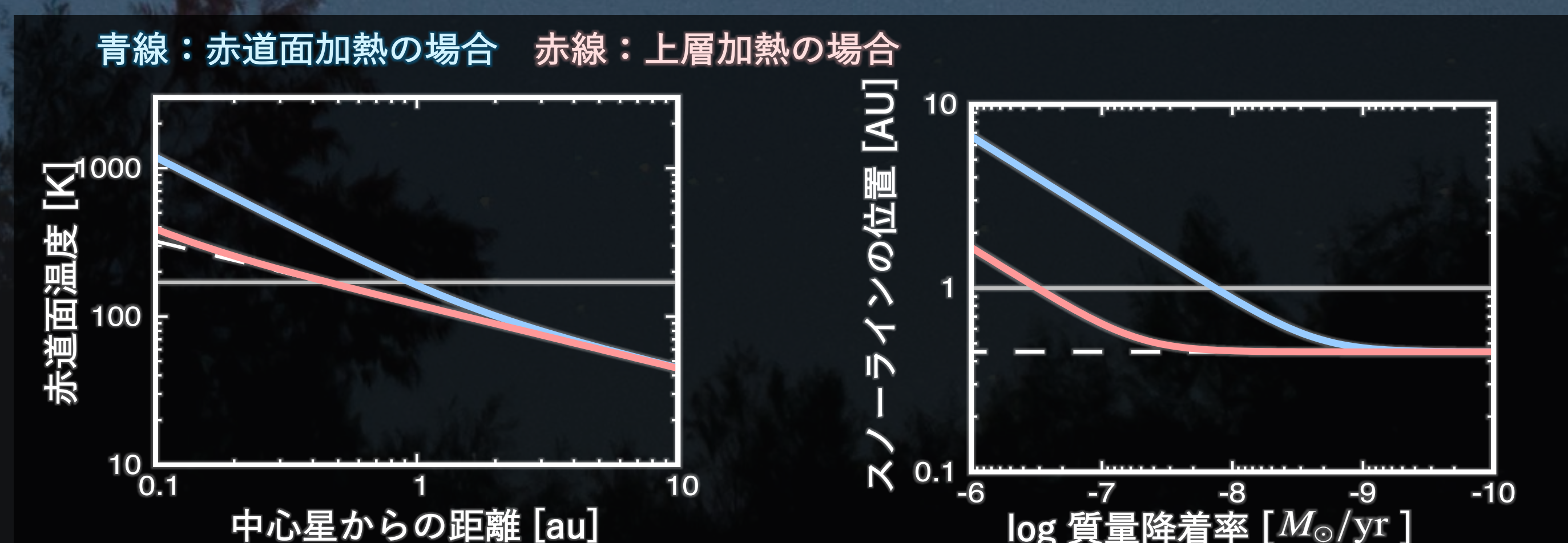
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) - \nabla \times \mathbf{E}' \quad \mathbf{E}' \equiv \eta_O \mathbf{J} + \eta_H (\mathbf{J} \times \hat{\mathbf{B}}) + \eta_A \mathbf{J}_\perp$$

理想MHD項 オーム散逸 ホール効果 両極性拡散

- エネルギー散逸機構：ジュール加熱 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}'$

6 議論：スノーラインへの影響

- 赤道面加熱の場合(青線)と上層加熱の場合(赤線)における円盤温度とスノーラインの位置を計算
 - 上層加熱: $z = 3H$ で降着エネルギーの70%が熱に変わると仮定
- 赤道面加熱に比べ、円盤温度は1/5倍 スノーライン位置は1/4倍
 - それぞれ降着加熱効率 $0.7 \text{erfc}(3/\sqrt{2})$ の1/4乗と2/9乗
- 原始地球の形成条件はより厳しいものとなる



結論

本研究は、“典型的な降着加熱モデル”が磁気円盤で成り立つかを調べた。計算は非理想MHD効果を考慮した磁気流体計算を行った。その結果、円盤上層でエネルギー散逸が起きた。これは磁気円盤では赤道面加熱の仮定が成立しない可能性を示す。そのような磁気円盤における太陽系形成は今後調べてゆく必要がある。