原始惑星系円盤の大局的非理想MHD数値計算: 間欠的な表層降着

森 昇志（清華大学）

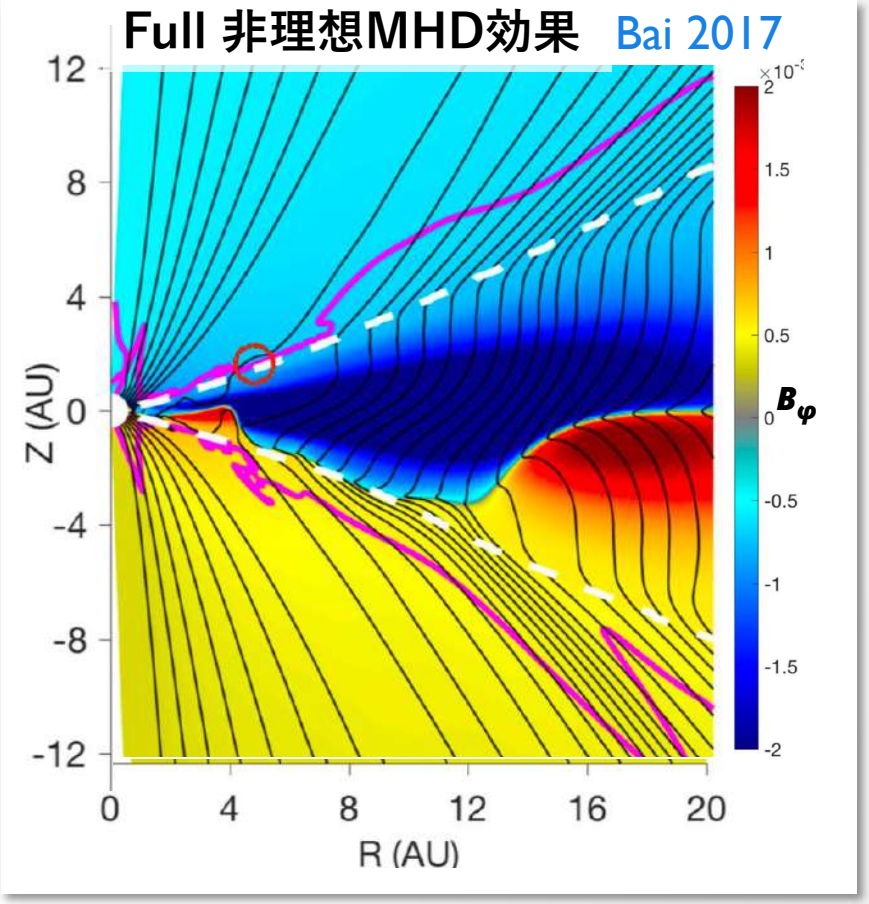
Xue-Ning Bai（清華大学）富田賢吾（東北大学）

Mori, Bai, Tomida (2025b), ApJ, in press
[arxiv:2508.03624]

原始惑星系円盤を支配する力学は？

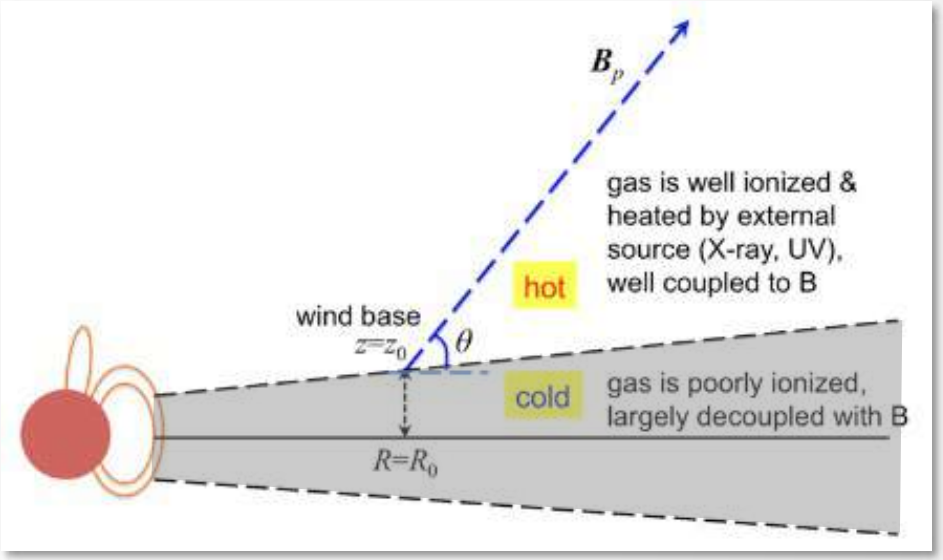
- 円盤の力学を理解したい – 惑星形成時の環境の理解
  - **原始惑星系円盤における磁場の役割は？**

- **層流**
  非理想MHD効果がMRI乱流を抑制
  (e.g., Bai & Stone 2013; Gressel 2015)
- **円盤風 & 表面降着**
  電離表面の磁場が角運動量を上空へと運ぶ
  (e.g., Blandford & Payne 1982; Bai & Stone 2013; Lesur 2021)
- **磁場方向依存性**
  $\Omega \cdot B$の符号に依存してホール効果が Bϕ を
  増幅したり減衰したり
  (e.g., Sano & Stone 2002; Kunz 2008; Bai 2014, 2017)



原始惑星系円盤を支配する力学は？

- 円盤の力学を理解したい – 惑星形成時の環境の理解
  - 原始惑星系円盤における磁場の役割は？
  - **輻射輸送の役割は？**
    - Magneto-thermal disk wind (Bai et al. 2016)
      ＝光蒸発＋磁気円盤風
    - 密度構造に応じて温度・圧力構造が変わる

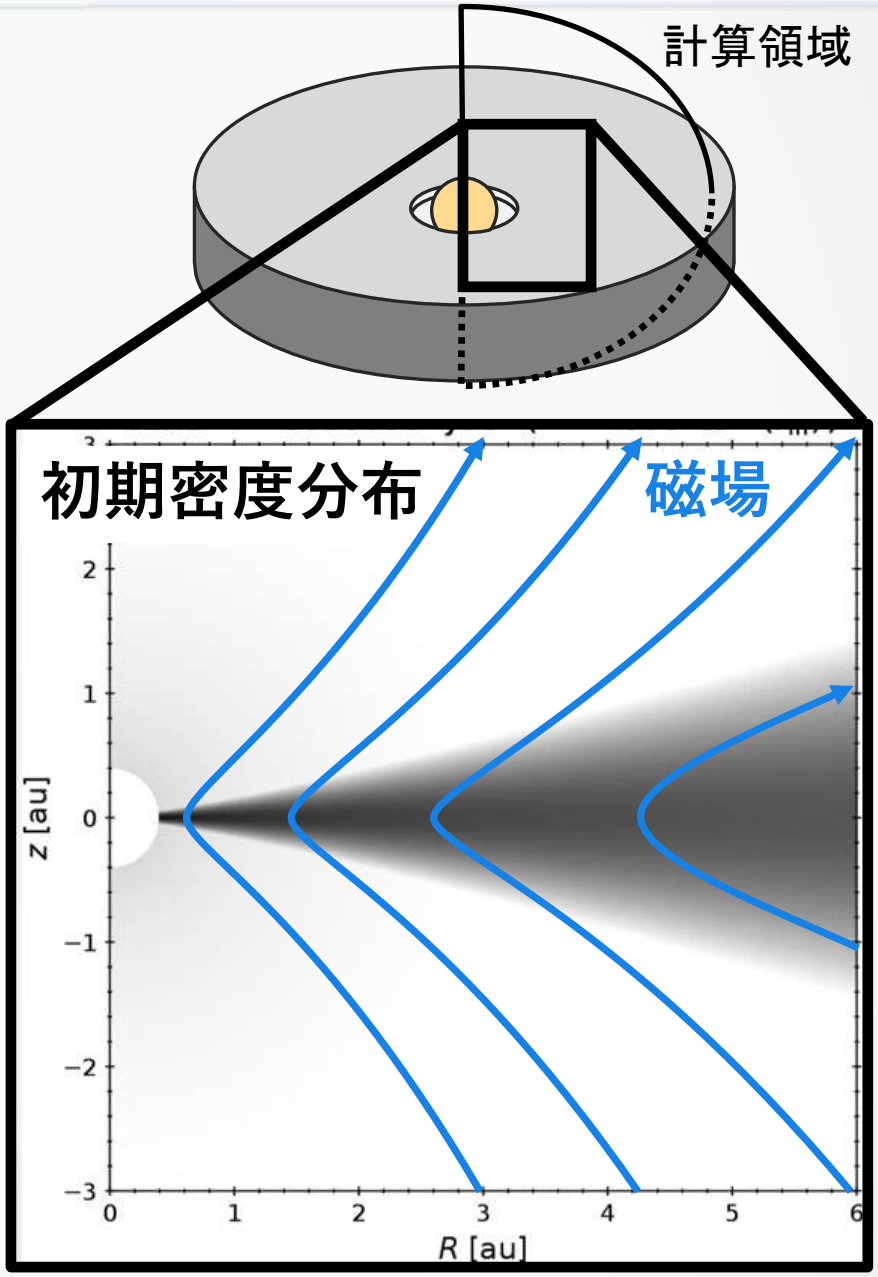


➔ 輻射輸送入り大局的非理想MHDシミュレーション

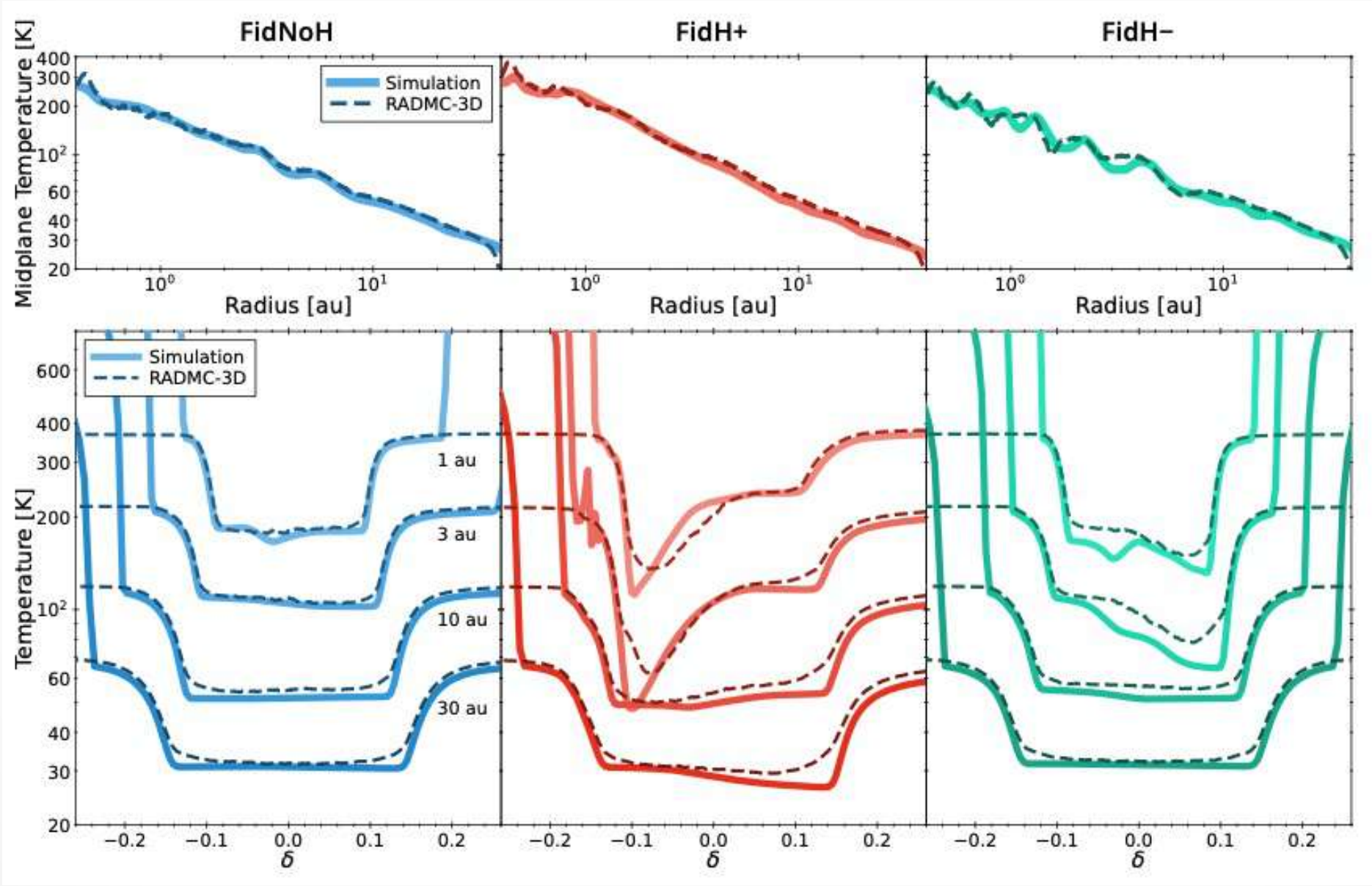
輻射輸送入り大局的非理想MHDシミュレーション

Mori, Bai, Tomida in press.

- 計算コード　Athena++ *(Bai 2017, Stone et al. 2021)*
  計算機 XC50 (国立天文台 CfCA)
- 軸対称２次元・大局的な計算領域
- 非理想MHD効果を全て考慮
  (オーム散逸・ホール効果・両極性拡散)
  - 係数は電離平衡時の電離度から計算
    - ダスト：0.1um, 対ガス質量比 = 0.01
- 輻射輸送：光学的に厚い領域と薄い領域での加熱冷却項を繋げたモデル (Xu & Kunz 2021)
  - **XUV加熱も考慮**



輻射輸送モジュールの確認



計算結果概要

容量削減のため削除しました
次ページをご覧ください

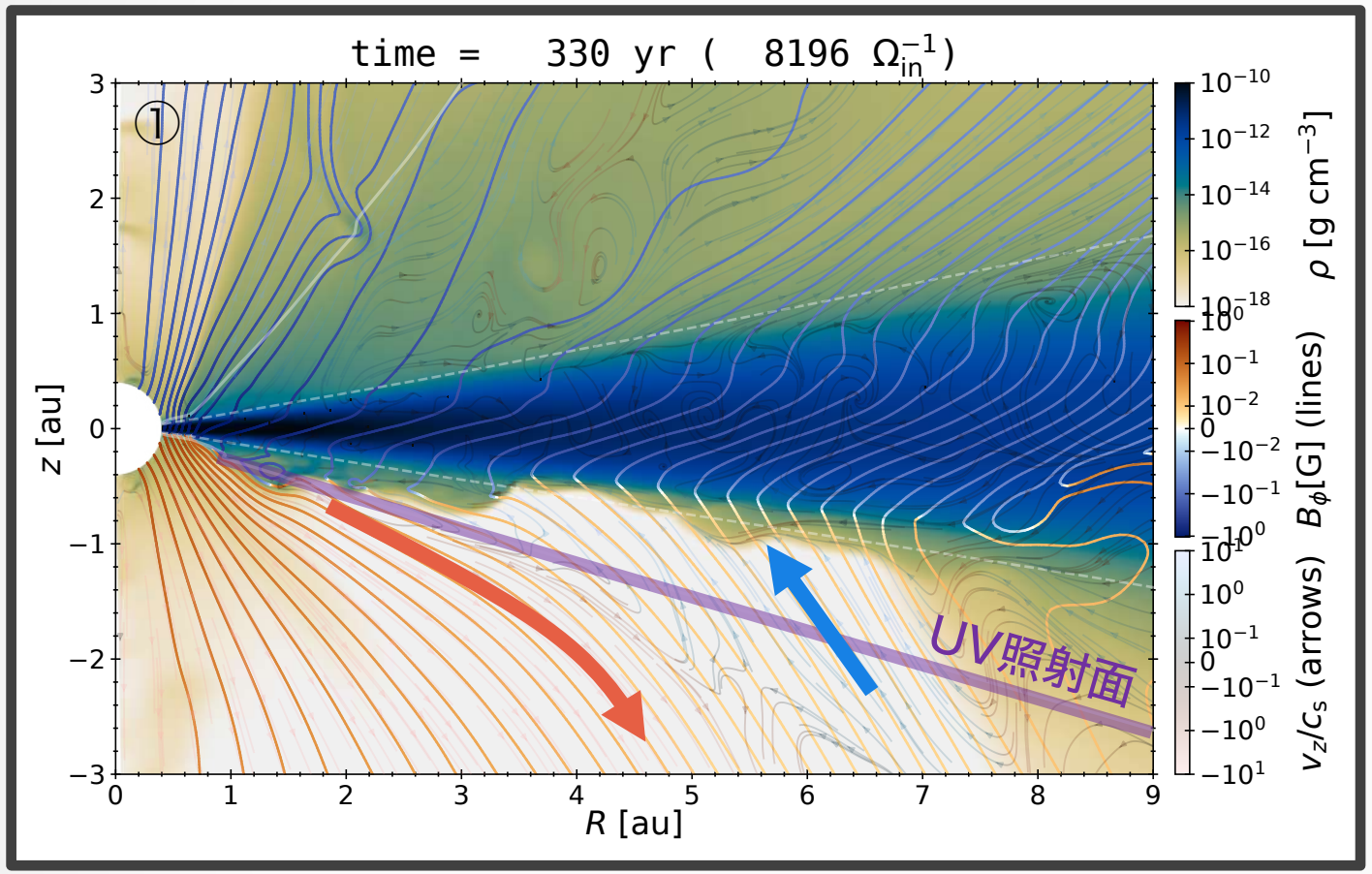
色：密度　線：磁力線（トロイダル磁場）　矢印：ガス速度（鉛直速度）

パラメーター
- 初期磁場：β ＝10^4
- 磁場方向：
  - 回転軸方向と同じ
  - ホール効果が磁場を増幅
- 面密度分布：320 g/ cm^2 $(r/au)^{-1}$
- 星光度：2.7 Lsun
- 照射オパシティ：1 cm^2/g
- 円盤オパシティ：1 cm^2/ g
- XUVオパシティ：33.3 cm^2/g

主に何が分かったか：

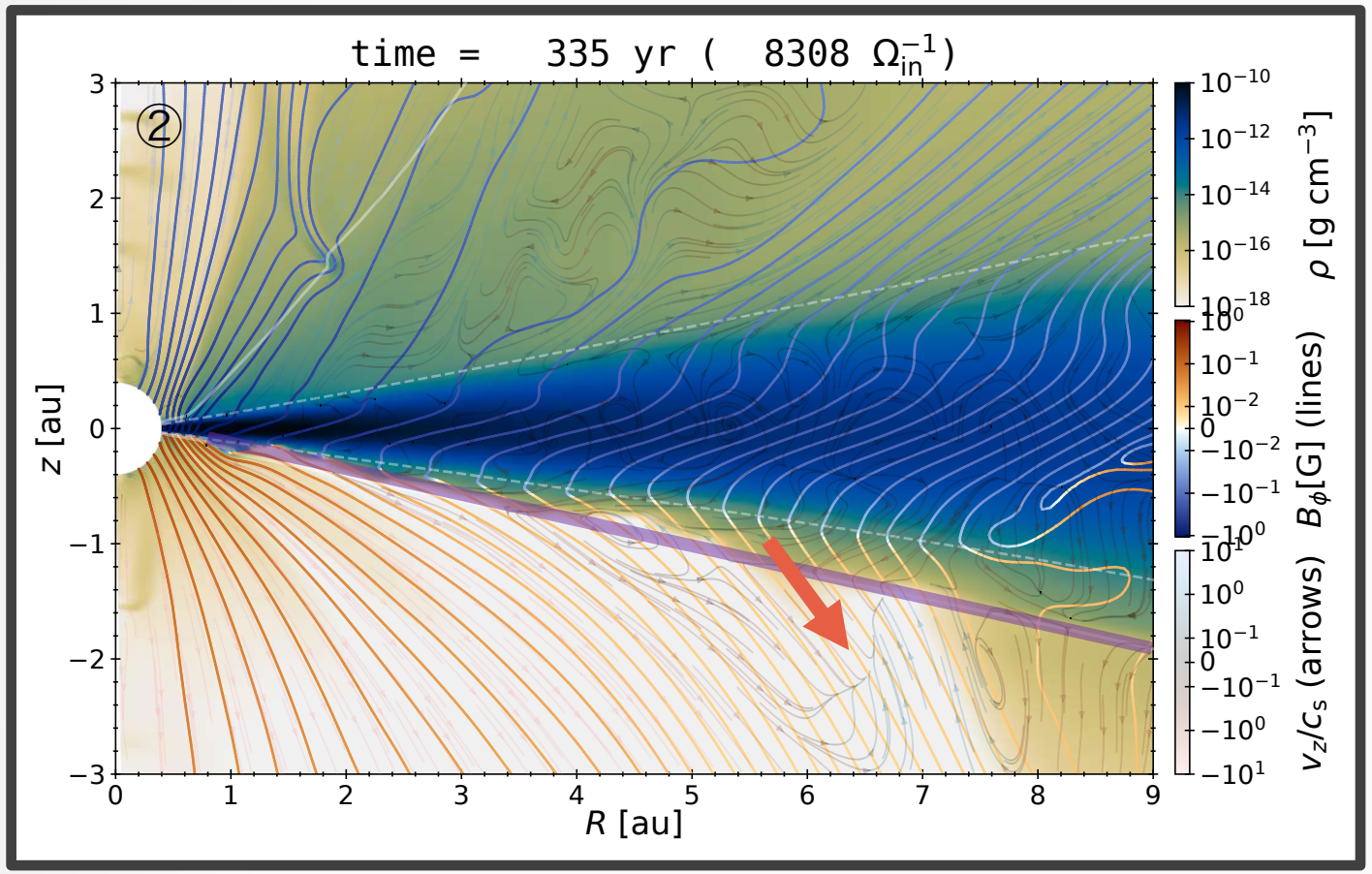
- **非対称な円盤風**
- **周期的な表層降着 (今回の発表)**
- **降着加熱は円盤温度を変えない**

物理メカニズム：降着＋円盤風＋照射



① 内側：表面バンプによる影(UV・可視光)
外側：影領域はガスが落下

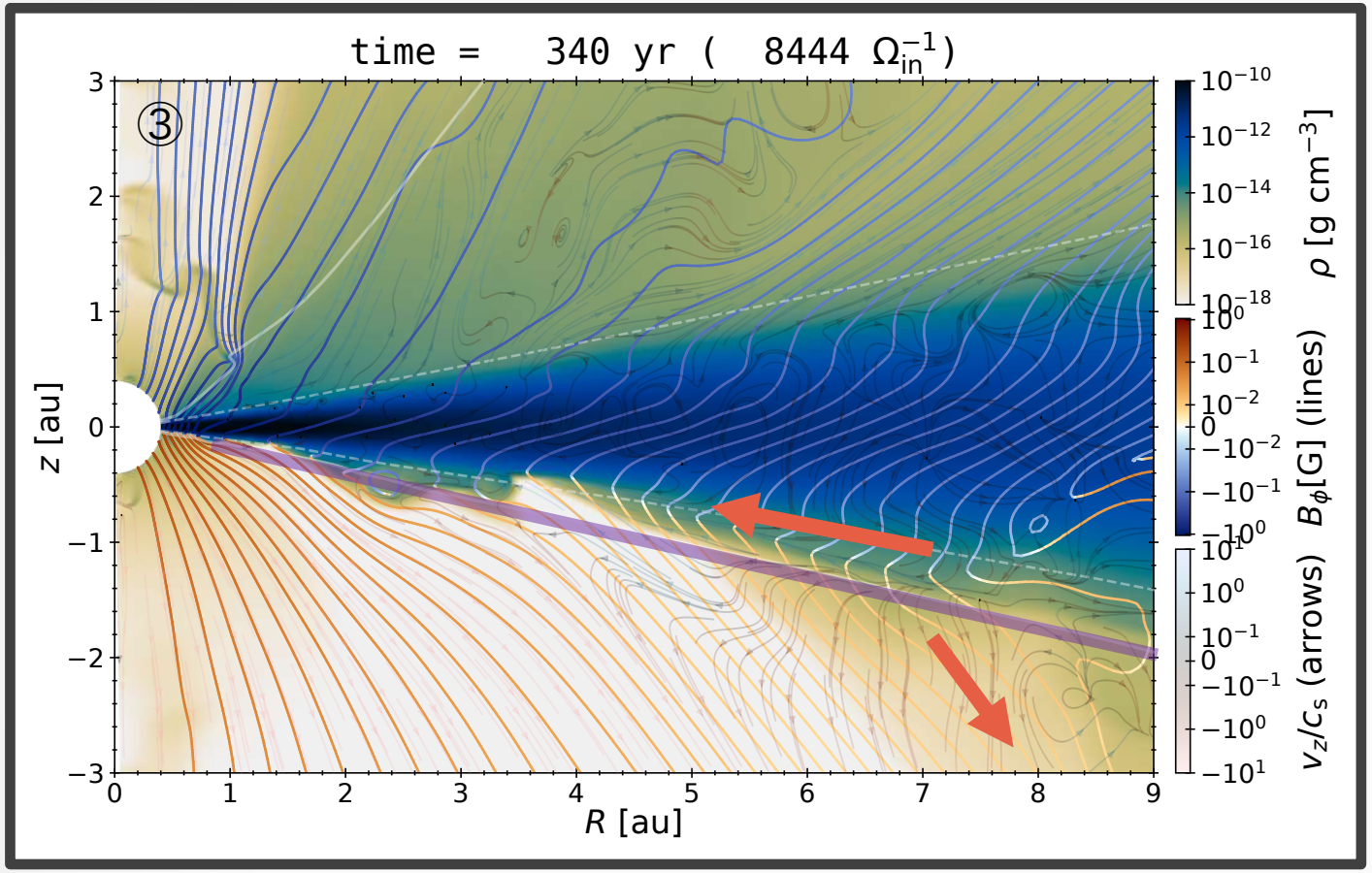
物理メカニズム：降着＋円盤風＋照射



① 内側：表面バンプによる影(UV・可視光)
外側：影領域はガスが落下

② バンプが降着、外側円盤がUV照射される
熱的円盤風を駆動

物理メカニズム：降着＋円盤風＋照射

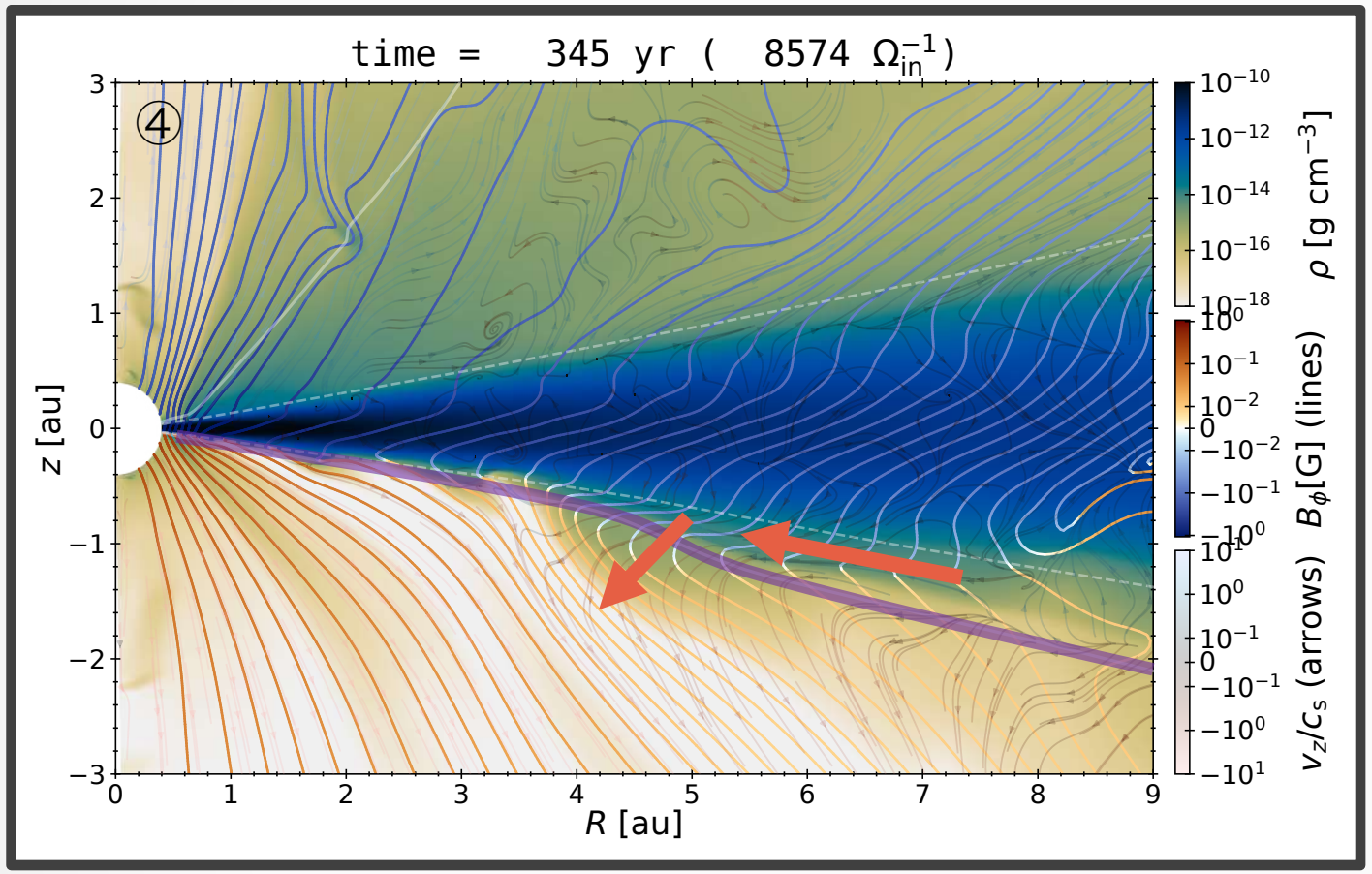


① 内側：表面バンプによる影(UV・可視光)
外側：影領域はガスが落下

② バンプが降着、外側円盤がUV照射される
熱的円盤風を駆動

③ 折れ曲がった磁力線によるガス降着

物理メカニズム：降着＋円盤風＋照射



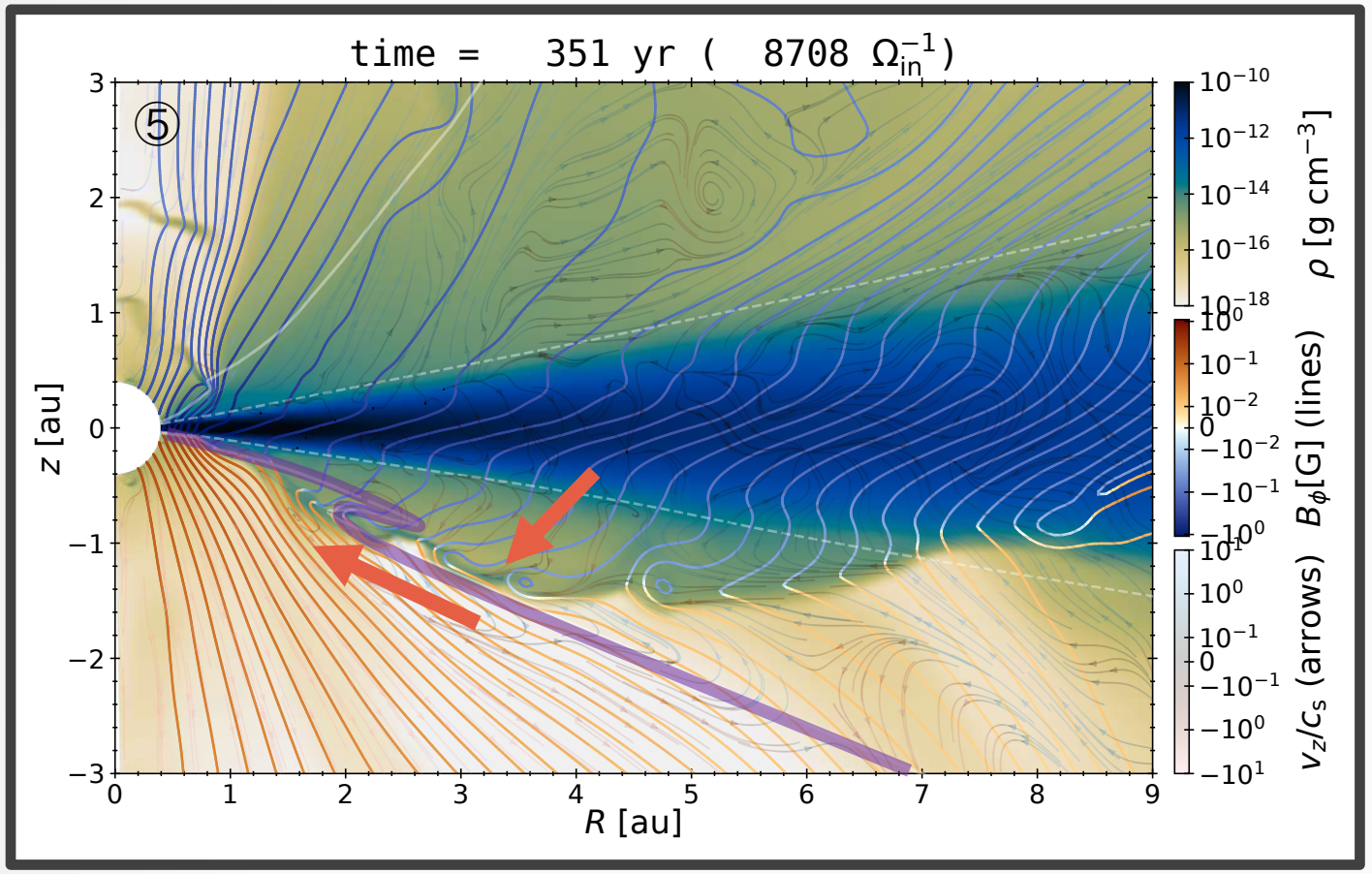
① 内側：表面バンプによる影(UV・可視光)
外側：影領域はガスが落下

② バンプが降着、外側円盤がUV照射される
熱的円盤風を駆動

③ 折れ曲がった磁力線によるガス降着

④ 降着層が照射され膨張
上空に降着層を形成

物理メカニズム：降着＋円盤風＋照射



① 内側：表面バンプによる影(UV・可視光)
外側：影領域はガスが落下

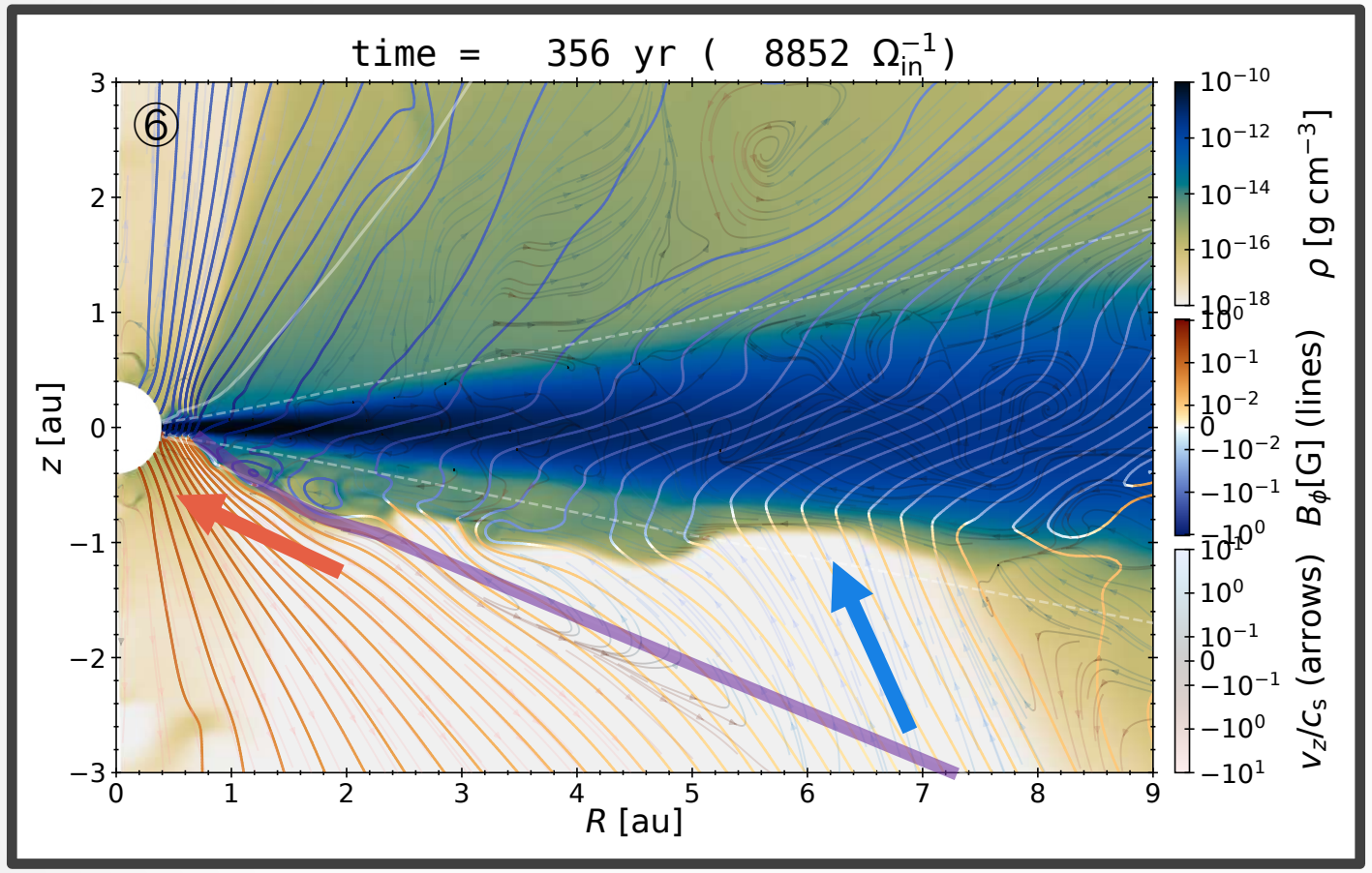
② バンプが降着、外側円盤がUV照射される
熱的円盤風を駆動

③ 折れ曲がった磁力線によるガス降着

④ 降着層が照射され膨張
上空に降着層を形成

⑤ 磁場を引きずりながら内側まで落下

物理メカニズム：降着＋円盤風＋照射



① 内側：表面バンプによる影(UV・可視光)
外側：影領域はガスが落下

② バンプが降着、外側円盤がUV照射される
熱的円盤風を駆動

③ 折れ曲がった磁力線によるガス降着

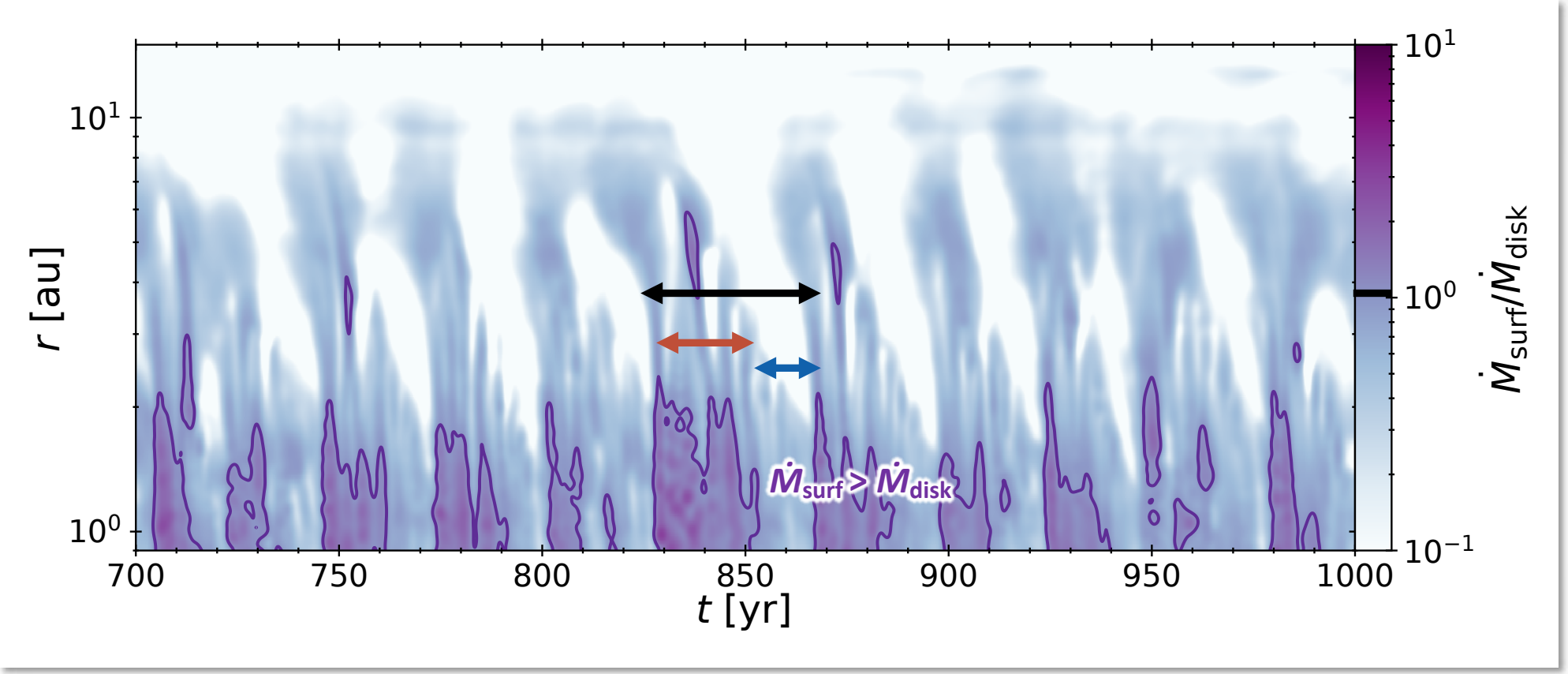
④ 降着層が照射され膨張
上空に降着層を形成

⑤ 磁場を引きずりながら内側まで落下

⑥ 内側表面にバンプを形成
外側円盤風は落下

降着率 時空図

$\dot{M}_{\rm disk}$ は 時間平均された円盤内部(|z|<4H)の降着率
$\dot{M}_{\rm surf}$ は Hスケール・軌道スケールでGaussian convolution



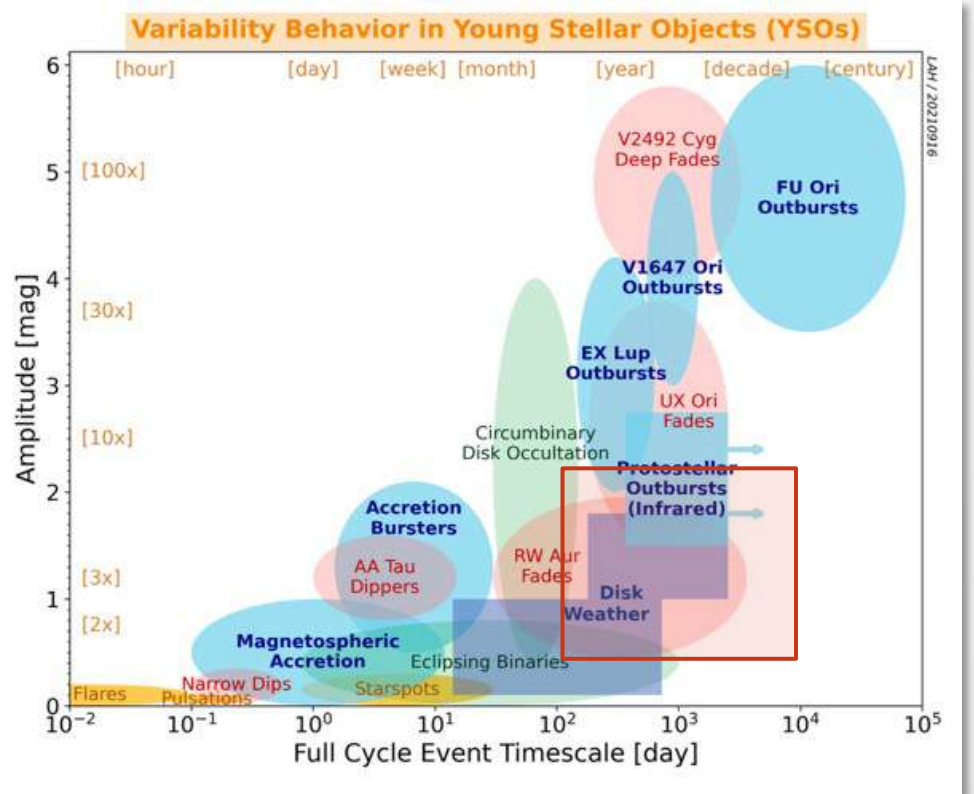
- 1サイクル ～ 20–30 yrs ： 降着期 ~10–20 yrs ➔ 静穏期 ~10 yrs
  - 5年で10回の落下（降着期）→ “一回”のガス降着は0.1-1yrsくらい続く
- 小半径で、内部降着率と同程度~数倍になりうる

議論：観測との対応

- **期待１：周期的に影を作る**
  - 年スケールで時間変動する赤外光(e.g., Espaillant+2011)
    - TW Hya：2~３に影が分裂 (Debes+2023, 2025)
  - ただし、影の作り方（同心円状 / 非軸対称）をちゃんと調べるには3D計算が必要

- **期待２：間欠的な降着ガスによって星への降着率も増加・変動**
  - 数100日スケールの星の降着率変動 (e.g., Fischer+2023)
  - 他の時間変動の要因にも
    - HD163296ジェットに16年間隔のノット (Ellerbroek+2014)
  - ただし、さらに内側(r<1au)の円盤物理に依存

まだ明らかな証拠は不明
（調査不足＋シミュレーション設定）



まとめ

Mori, Bai, Tomida (2025b), ApJ, in press [arxiv:2508.03624]

- 原始惑星系円盤の力学を理解するため輻射輸送を考慮した大局的非理想MHDシミュレーション
- 中心星からの照射によって増幅される間欠的な降着メカニズムを発見
  - 数十年スケール降着期・静穏期で繰り返す
  - 降着期は100日スケールの変動を繰り返す
- 観測との対応は今後の課題

計算データ提供できます。ご連絡ください。
shoji9m@mail.tsinghua.edu.cn