

原始惑星系円盤内縁構造とデッドゾーン 内側境界におけるダスト濃集

植田 高啓¹, 奥住 聡¹, Mario Flock²

¹東京工業大学, ²JPL, Caltech

Outline

1. 原始惑星系円盤の内縁領域とデッドゾーン内側境界
2. 内縁モデルの構築
 - 2.1. 中心星輻射が支配的な場合
 - Ueda, Okuzumi, & Flock 2017 in ApJ
 - 2.2. 粘性加熱円盤でのデッドゾーン内側境界へのダスト濃集
3. まとめ

Outline

1. 原始惑星系円盤の内縁領域とデッドゾーン内側境界

2. 内縁モデルの構築

2.1. 中心星輻射が支配的な場合

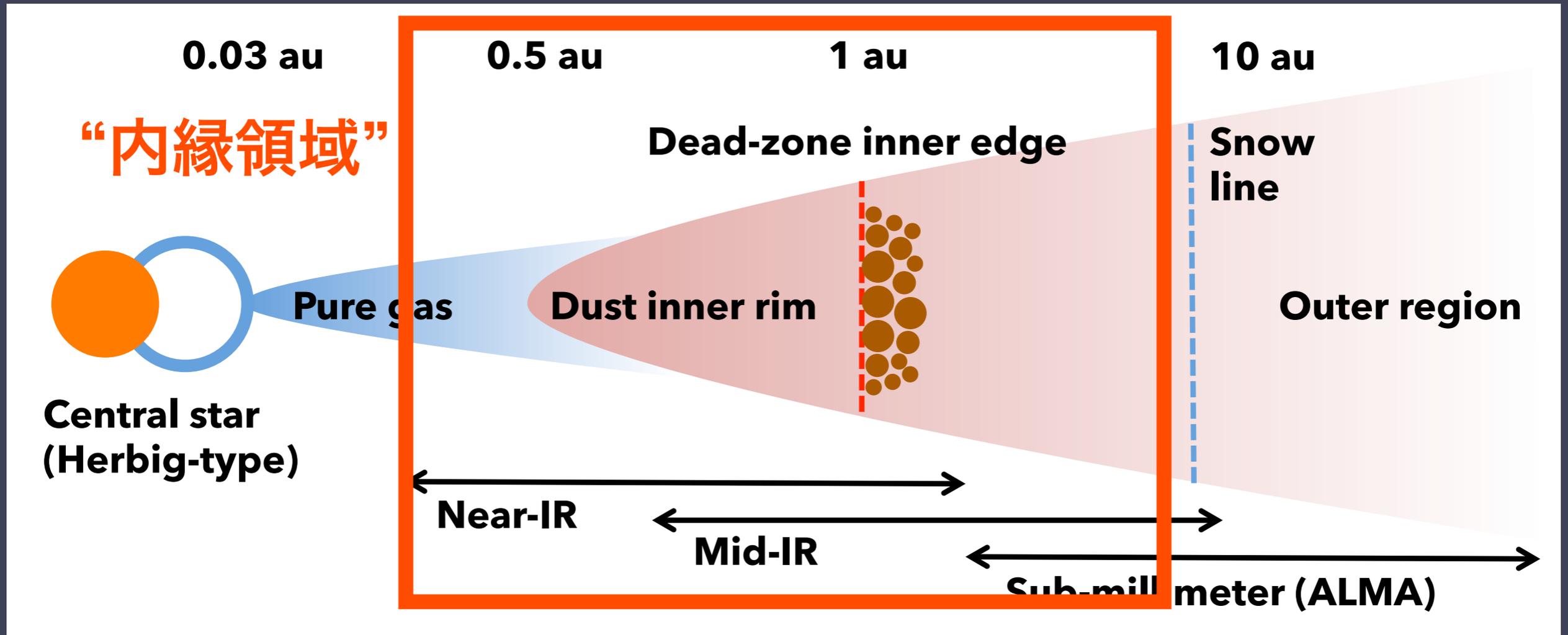
- Ueda, Okuzumi, & Flock 2017 in ApJ

2.2. 粘性加熱円盤でのデッドゾーン内側境界への ダスト濃集

3. まとめ

原始惑星系円盤内縁領域

内縁領域・・・円盤中の岩石ダストが支配的な領域
特に温度が800Kを超える高温領域

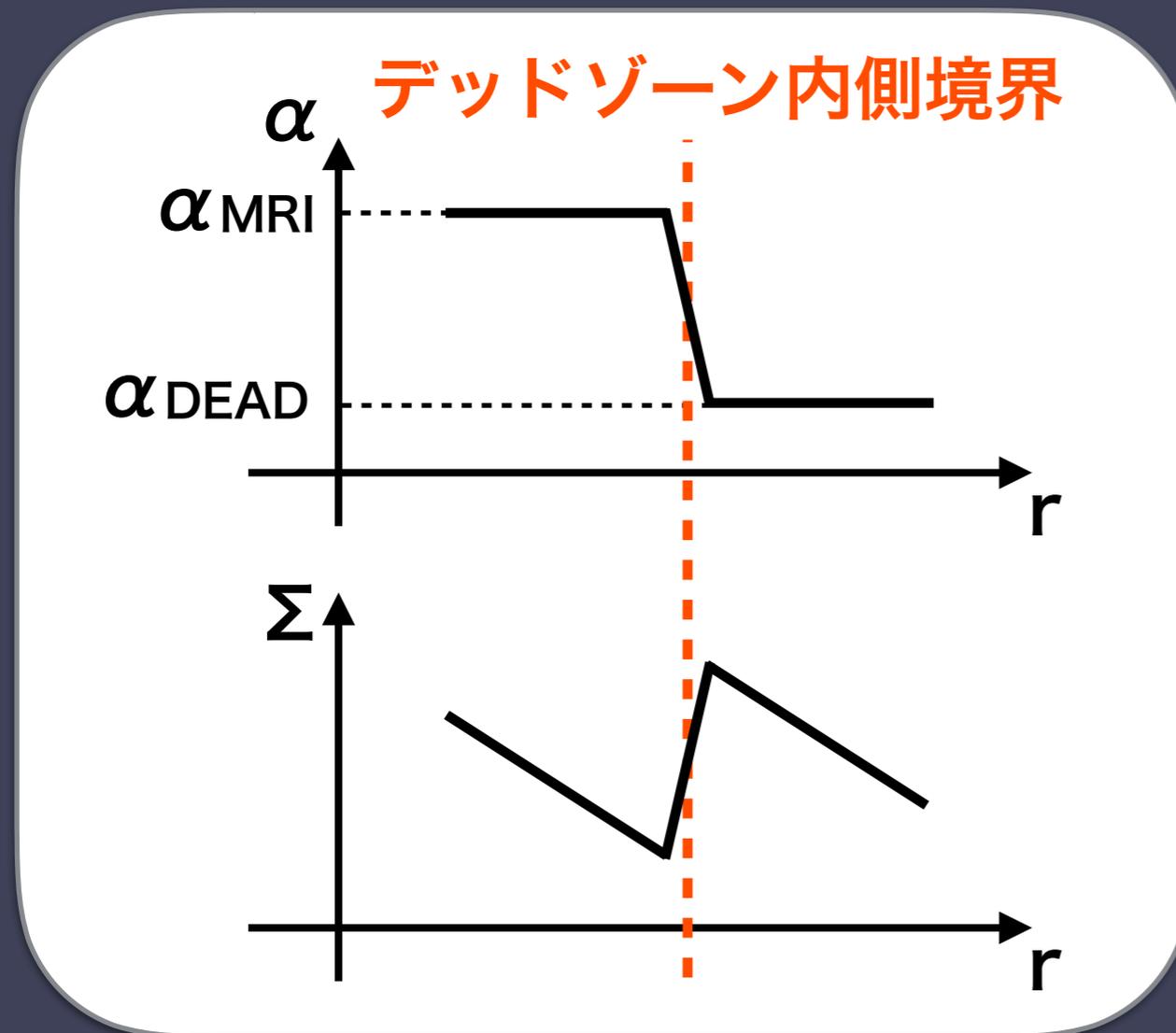


- 岩石ダスト昇華線、デッドゾーン内側境界など、特徴的な構造が存在
- 主に近中間赤外で光る

デッドゾーン内側境界

デッドゾーン内側境界 (Dead-zone inner boundary; DIB)

- ・ 円盤ガスの熱電離が起こることによってMRIが駆動し、乱流強度が大きく変化する領域 (Gammie 1996)
- ・ 温度が**1000K**程度の場所に存在 (Desch & Turner 2015)



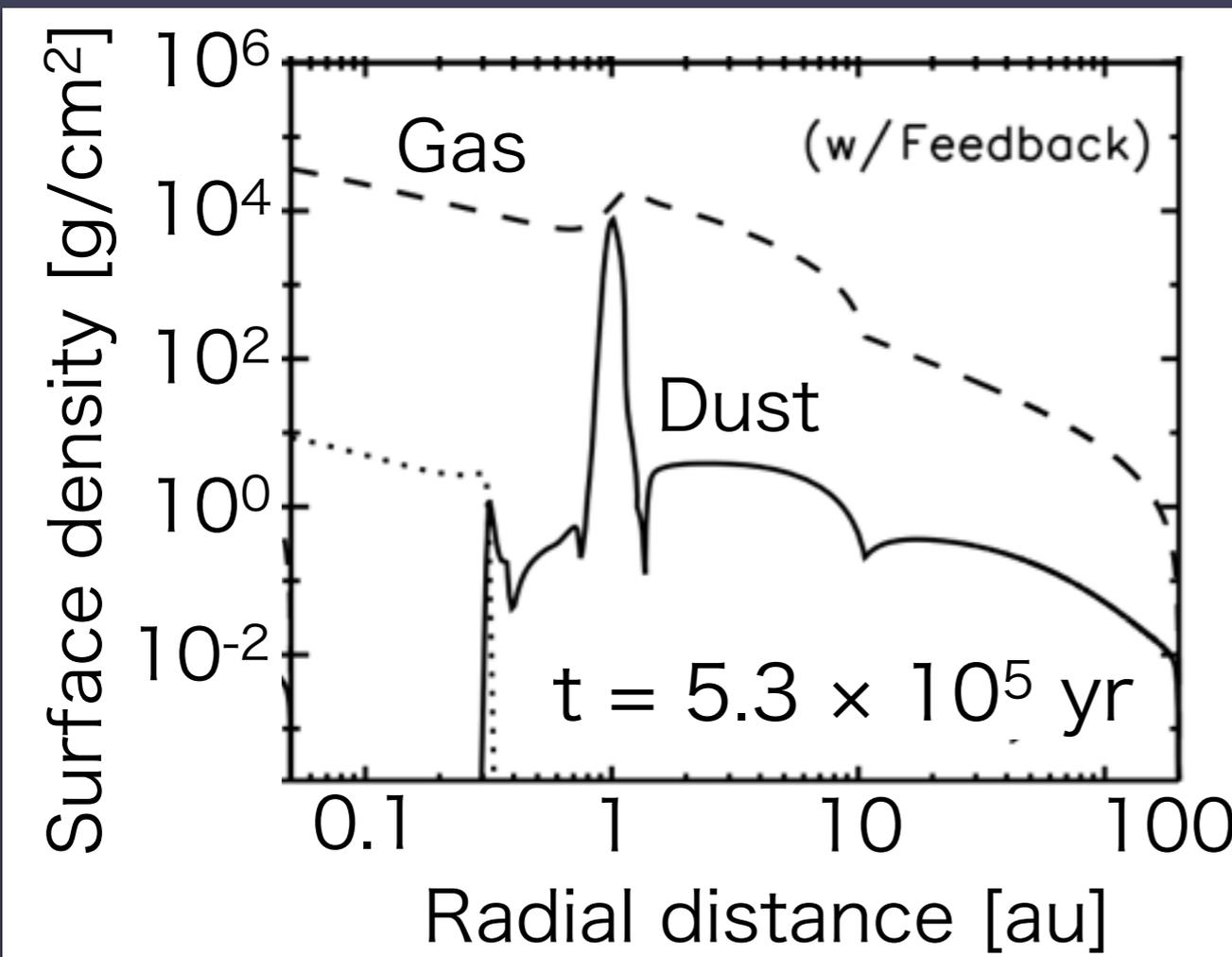
デッドゾーン内側境界では、急激な面密度変化によって

- ・ 惑星-円盤ガス重力相互作用による惑星の**軌道進化が止まる** (Masset+2006)
- ・ **ダストが動径方向に濃集**する (Kretke+2009)

デッドゾーン内側境界へのダスト濃集

Kretke+2009

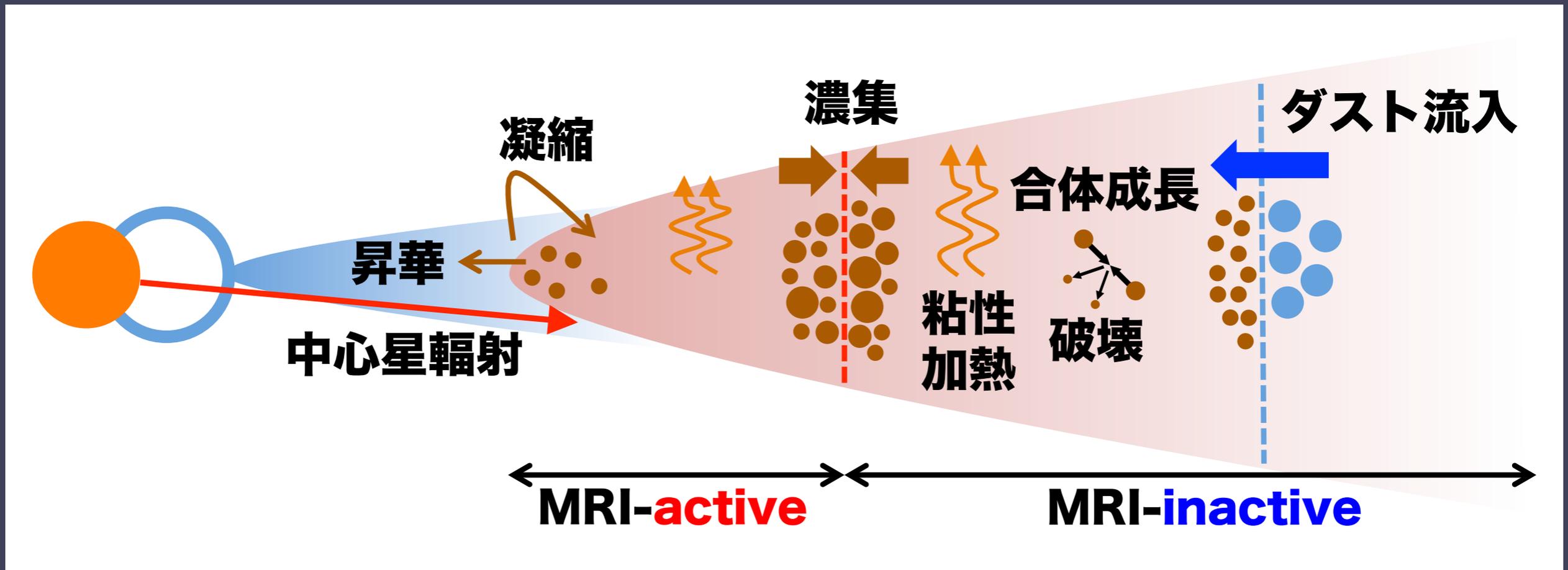
- A型星周りの粘性加熱円盤でのDIBへのダスト濃集計算
- DIBへのダスト濃集によってガス惑星コアができることを示唆



問題点

- **オパシティを完全に固定**
円盤温度はオパシティ(ダスト量・サイズ)に強く依存
- **ダストの破壊を無視**
岩石ダストは円盤中での典型的な衝突速度で破壊される(Wada+2013)

本研究の目標



- ダストの**成長・破壊・濃集・昇華・凝縮**と**円盤ガス構造**を矛盾なく取り入れた**円盤内縁モデルを構築**する
 - (将来の)近中間赤外干渉計、大型望遠鏡による観測
- 内縁、特に**デッドゾーン内側境界での微惑星・惑星形成**の可能性を明らかにする

Outline

1. 原始惑星系円盤の内縁領域とデッドゾーン内側境界

2. 内縁モデルの構築

2.1. 中心星輻射が支配的な場合

- **Ueda, Okuzumi, & Flock 2017 in ApJ**

2.2. 粘性加熱円盤でのデッドゾーン内側境界への
ダスト濃集

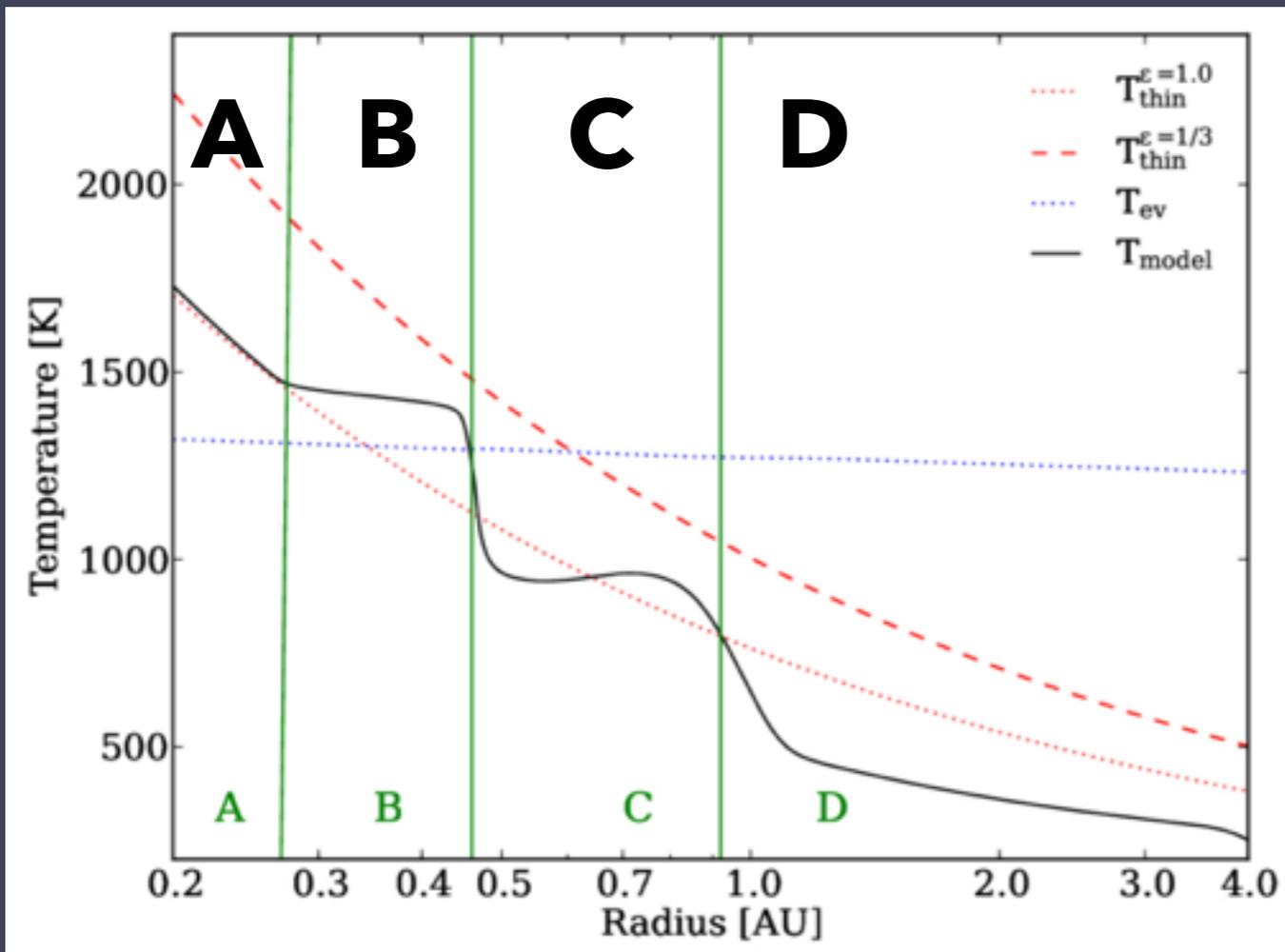
3. まとめ

中心星輻射が支配的な円盤の内縁構造

特に惑星形成後期過程では粘性加熱よりも中心星輻射が支配的

Flock+2016

- 最新の3次元輻射流体平衡計算
- **A型星周り**の円盤の**温度分布が階段状になる**ことを示した



本研究：

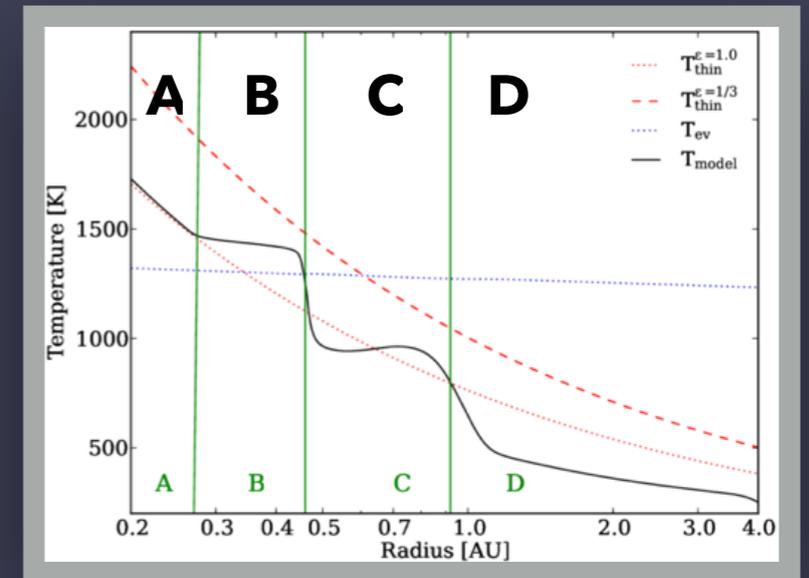
輻射流体計算の結果を**解析解**
で再現することで、**幅広いパ**
ラメータ範囲に対応した円盤
モデルを構築する

光学的に薄い内側領域 A, B

光学的に薄い領域の温度

$$T = \epsilon^{-1/4} \left(\frac{R_*}{2r} \right)^{1/2} T_*$$

$$\epsilon \equiv \frac{\kappa_g + f_{d2g} \kappa_d(T)}{\kappa_g + f_{d2g} \kappa_d(T_*)}$$



- 領域A: 完全にガスのみの領域

ダストが完全に蒸発し、**光学的に薄いガスの温度分布**に従う

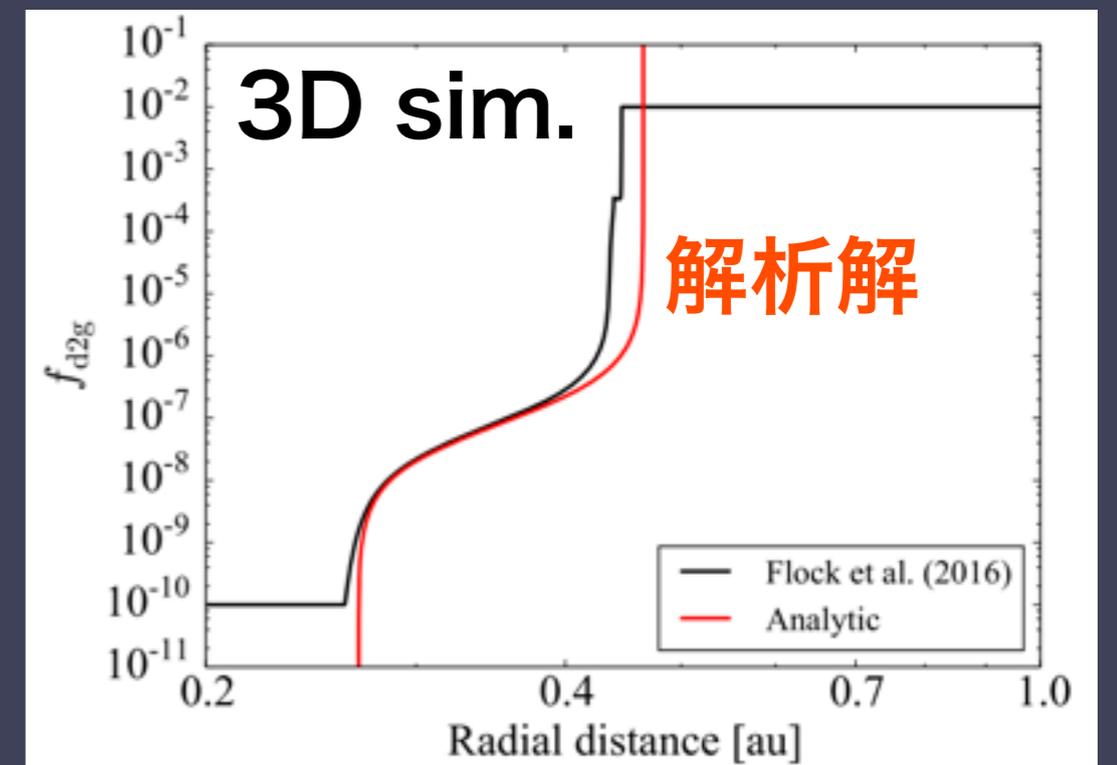
- 領域B: ダストハロー

ダストの凝縮温度付近になると
ダストが凝縮

輻射効率 ϵ が減少し温度が上昇

**円盤温度がダストの昇華
温度で一定に保たれる**

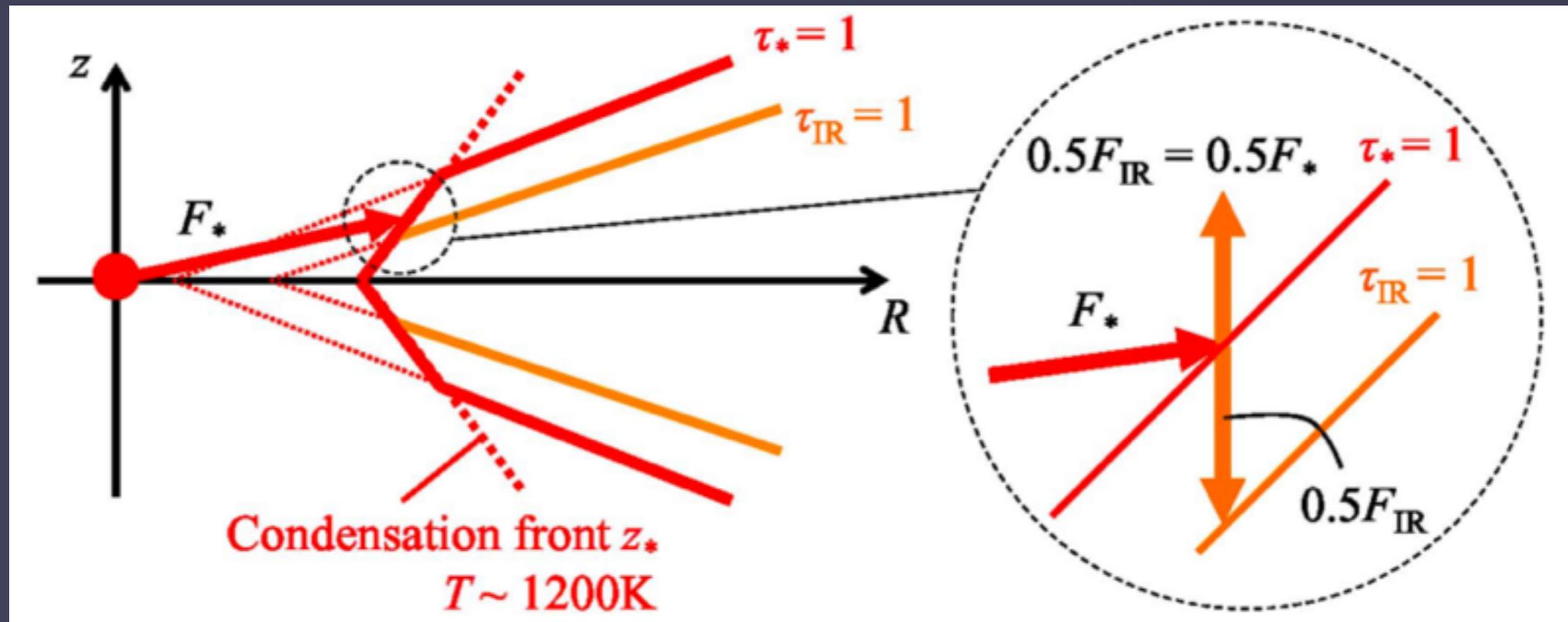
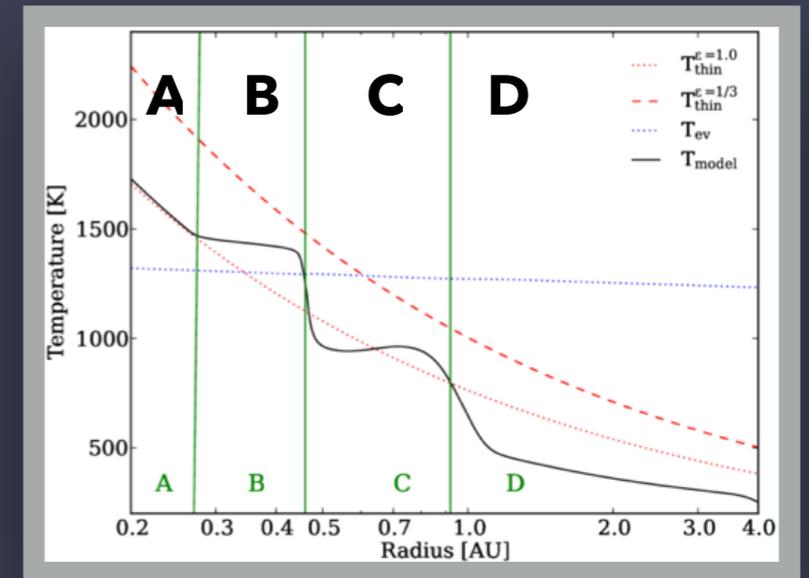
ダストガス比



光学的に厚い外側領域 C, D

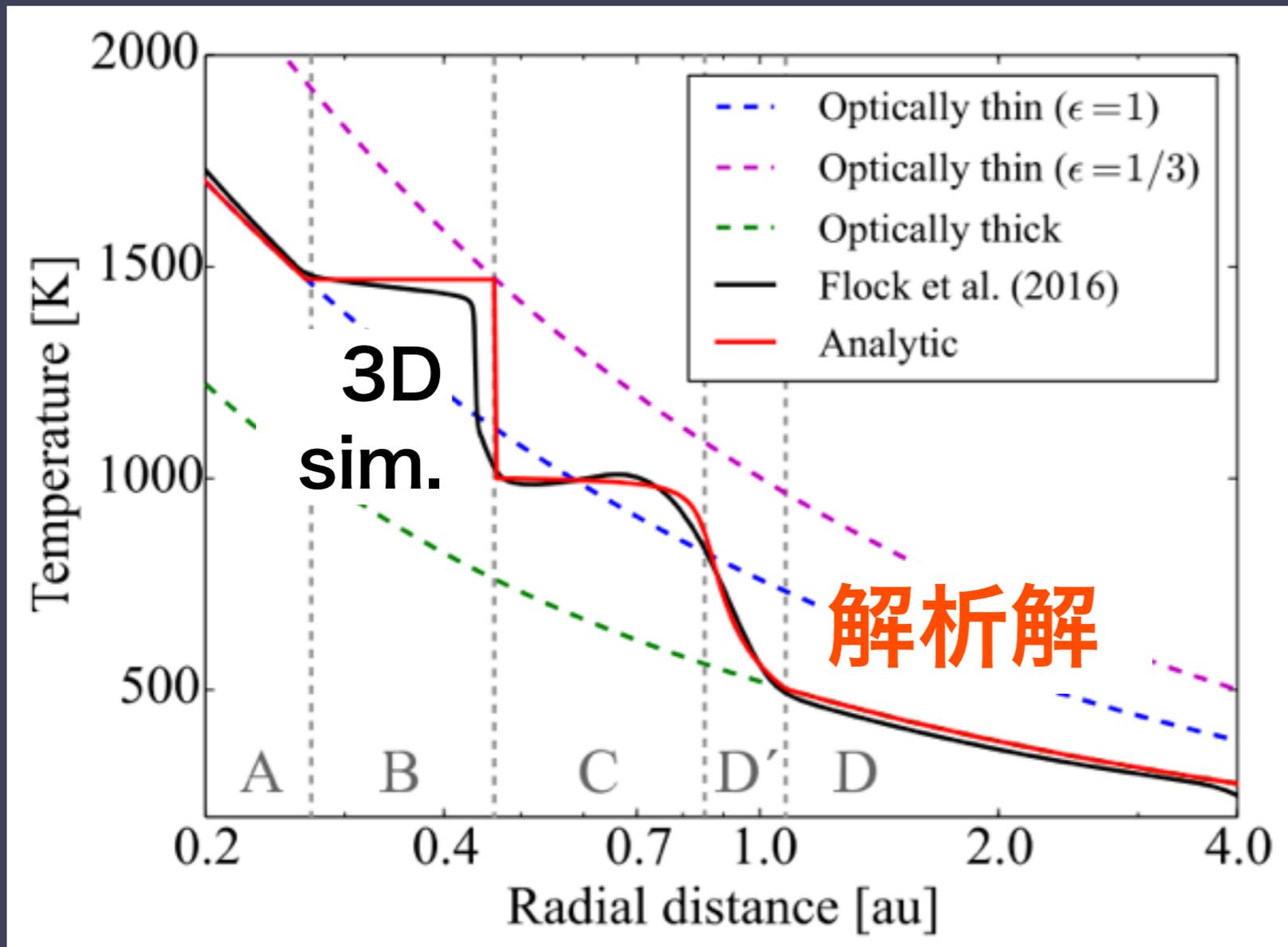
光学的に厚い外側領域では、中心星輻射に対する $\tau=1$ 面への照射エネルギーの半分が、熱放射として下層に伝わる。

(二層モデル, e.g, Chiang & Goldreich 1997)



- 領域Cでは、 $\tau=1$ 面はダストが完全に凝縮する面で決まり急勾配になる → エネルギーフラックスが大きくなり高温になる

内縁の赤道面温度分布



- 領域CとDの境界がデッドゾーン内側境界

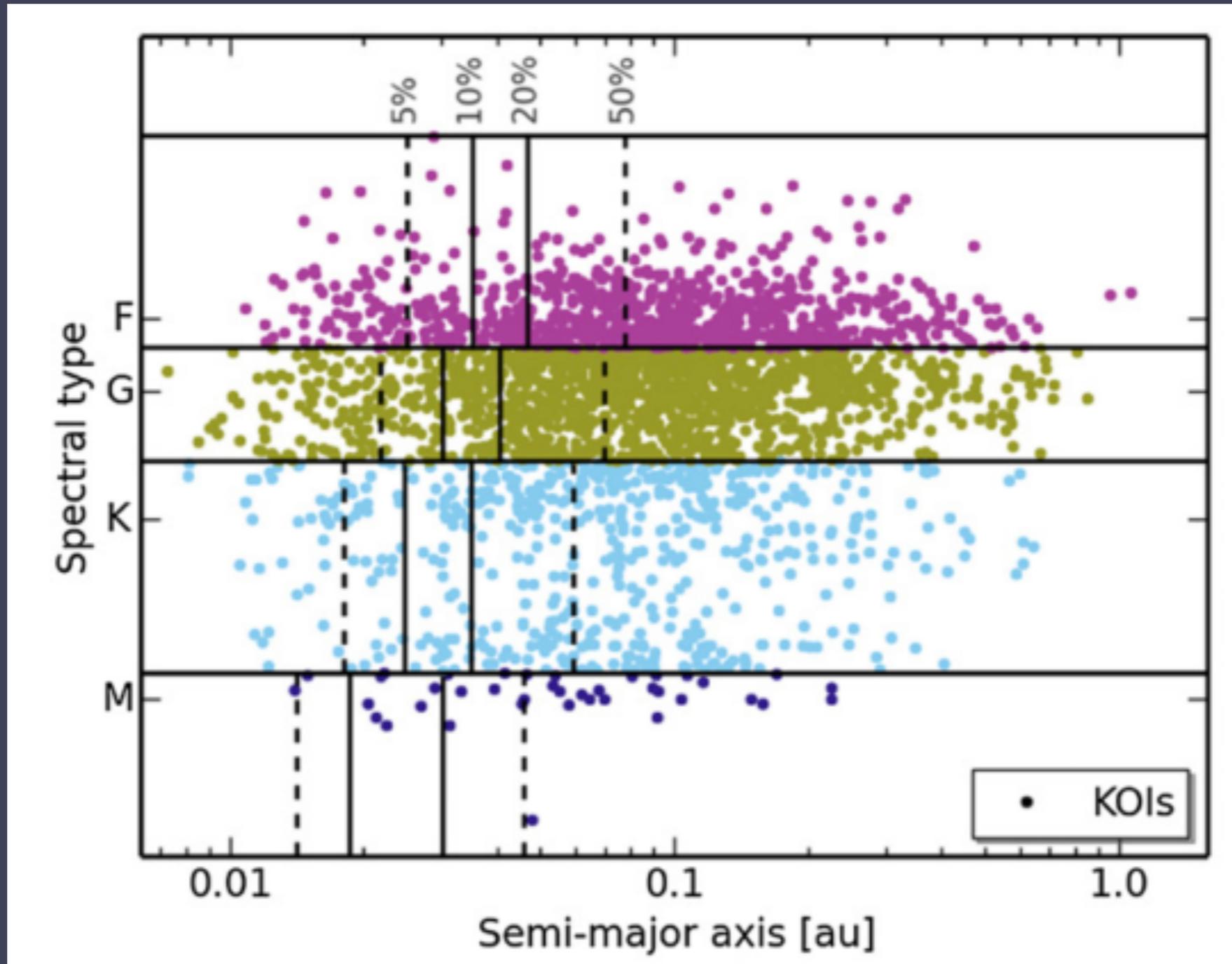
0.9 au for $56L_{\text{sun}}$,
0.1 au for $1L_{\text{sun}}$

古典的な光学的に厚い円盤での位置よりも2-3倍外側

- 領域B,C,Dの境界は惑星のmigration trapとして働きうる

詳細は Ueda+2017 ApJ

Inner planets discovered by *Kepler*



Mulders+
2015

領域C, Dの境界で惑星トラップとして働いてる可能性

Outline

1. 原始惑星系円盤の内縁領域とデッドゾーン内側境界

2. 内縁モデルの構築

2.1. 中心星輻射が支配的な場合

- Ueda, Okuzumi, & Flock 2017 in ApJ

2.2. 粘性加熱円盤でのデッドゾーン内側境界への
ダスト濃集

3. まとめ

粘性加熱円盤の内縁構造

円盤の質量降着率が大きい段階では、粘性加熱が支配的

- 粘性加熱を考慮するとデッドゾーン内側境界は、中心星輻射の場合と比べてかなり遠方に存在しうる
- 粘性加熱ではローカルなダスト面密度が重要

粘性加熱由来
の赤道面温度

$$T^4 \approx \left(1 + \frac{3}{8} \kappa_d \Sigma_d \right) \frac{9\nu \Sigma_g \Omega_K^2}{8\sigma}$$

e.g., Nakamoto & Nakagawa 1994

鉛直方向の光学的厚み

厚み10倍→温度1.8倍



円盤構造進化とダストの移流・サイズ進化を同時に
解くことが重要

計算モデル

動径方向1次元のガス円盤進化とダストの移流拡散・成長方程式を同時に解く

- ガスの粘性進化

$$\frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ 3r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Sigma_g \nu r^{1/2} \right) \right\}$$

- ダストの移流拡散

$$\frac{\partial \Sigma_d}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \Sigma_d v_d - \frac{\nu}{1 + \text{St}^2} r \Sigma_g \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\Sigma_d}{\Sigma_g} \right) \right\}$$

- ダストのサイズ進化

代表サイズのみ計算
(Sato+2016)

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} + v_d \frac{\partial m_p}{\partial r} = \epsilon_{\text{frag}} \frac{2\sqrt{\pi} a^2 \Delta v_{\text{pp}} \Sigma_d}{h_d}$$

Sticking efficiency ϵ_{frag} : $\Delta v_{\text{pp}} > 8\text{m/s}$ で負
(Wada+2013, Okuzumi+2016)

- 乱流モデル $T > T_{\text{MRI}} = 1000\text{K}$ で $\alpha = 10^{-2}$ 、 $T < T_{\text{MRI}}$ で $\alpha = 10^{-3}$

- オパシティ

$$\kappa = \kappa_g + \frac{\Sigma_d}{\Sigma_g} \kappa_d$$

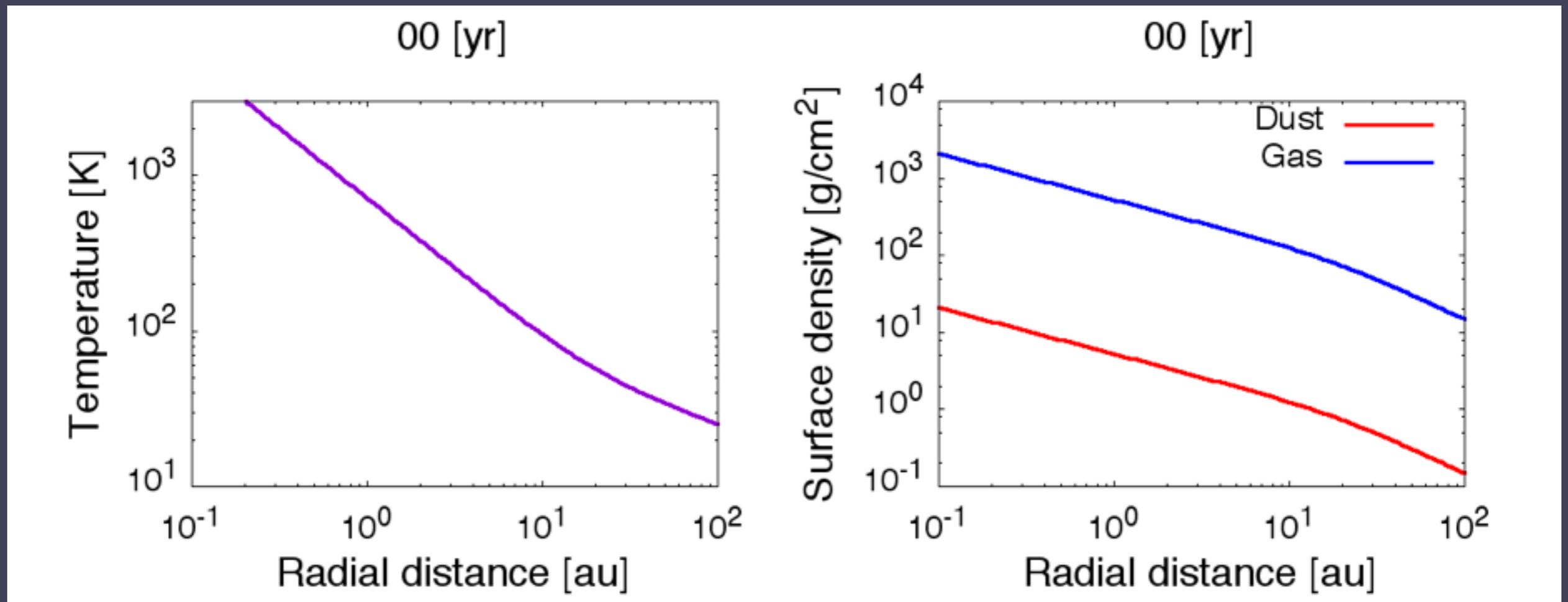
ダストオパシティはサイズによらず固定 $\kappa_d = 250\text{cm}^2/\text{g}$

粘性加熱円盤内縁での円盤進化：結果

初期条件: 質量降着率 $10^{-8} M_{\text{sun}}/\text{yr}$, $\alpha = 10^{-3}$

半径 $0.1 \mu\text{m}$ のダストがダスト-ガス比 0.01 で分布

ダストの昇華は無視



- ダストの濃集によって、 $T=T_{\text{MRI}}$ となる領域が外に広がる
- **ダスト濃集領域の外側で不安定**によってダストリングが形成

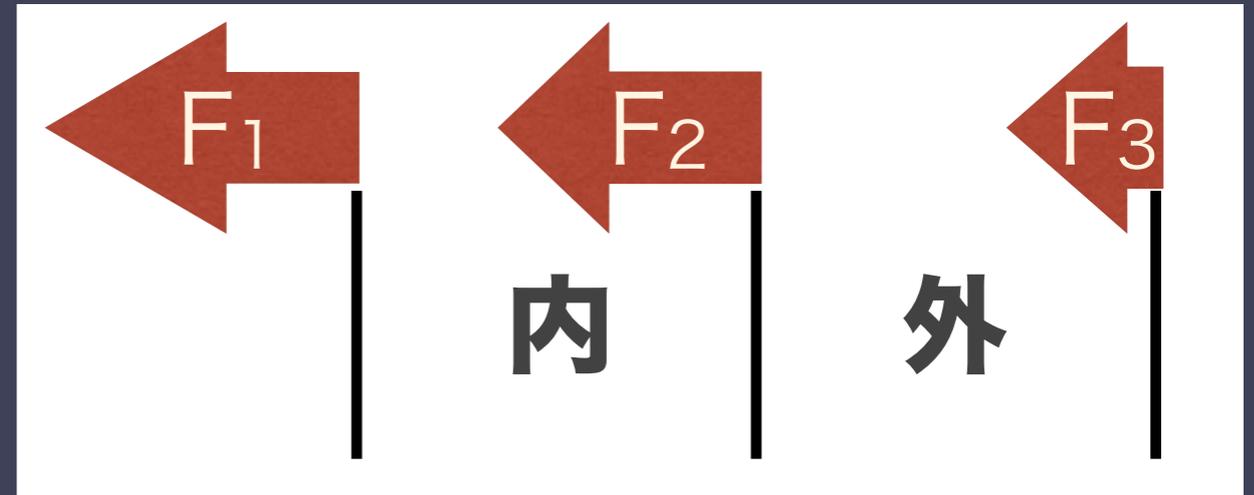
オパシティ勾配によって駆動される不安定

不安定は数値的なものではなく物理不安定か？

☑ 内側ほどダストフラックス大

→ 各領域でダスト量減少

→ 温度低下



☑ 外側ほどダストフラックスの微分が大

→ 外側ほどダスト減少速度大 → 外側ほど早く温度低下

→ 圧力勾配(温度勾配)がより急に → **ダスト落下を加速**

粘性加熱円盤におけるダストの連続の式

負の拡散項

$$\frac{\partial \Sigma_d}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{r \Sigma_d v_K \text{St}}{1 + \text{St}^2} \left(\frac{c_s}{v_K} \right)^2 \left(\frac{\partial \ln p_0}{\partial \ln r} + \frac{1}{6} \frac{\partial \ln \Sigma_d}{\partial \ln r} \right) \right\}$$

まとめ

- **中心星輻射**が支配的な原始惑星系円盤の温度構造の**解析公式**を導出した
 - ・ 解析解から予想されるデッドゾーン内側境界は、**古典的な光学的に厚い円盤よりも2-3倍外**に位置する
- **粘性加熱**が支配的な円盤における、**デッドゾーン内側境界へのダスト濃集計算**を行った
 - ・ ダストの濃集によって、 **$T=T_{MRI}$ で保たれる領域**が形成
 - ・ ダスト濃集が進むと、**オパシティ勾配に起因する不安定**が発生し、ダストリングが形成
- 不安定の詳細な解析およびダスト分布への影響は今後の課題