

# Class 0/I 段階でのペブル集積による 巨大惑星の形成可能性

+ 今後の計画  
(巨大ガス惑星の形成モデルについて)

田中 佑希 (東京工業大学)

→ 6月から東北大学に移ります

2019/3/18

新学術領域A02/B02 合同キックオフミーティング at 茨城大学

# Class 0/I 段階でのペブル集積による 巨大惑星の形成可能性

田中 佑希 (東京工業大学)

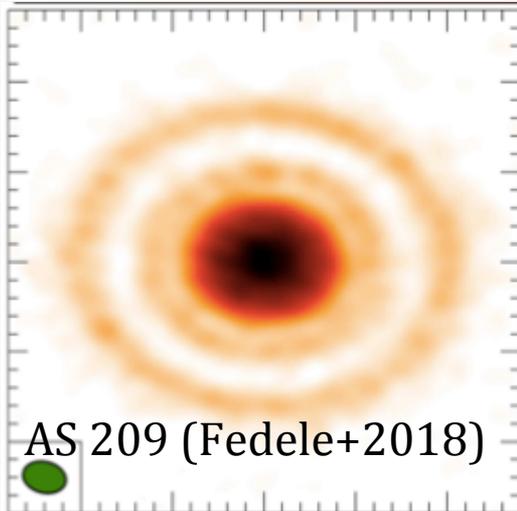
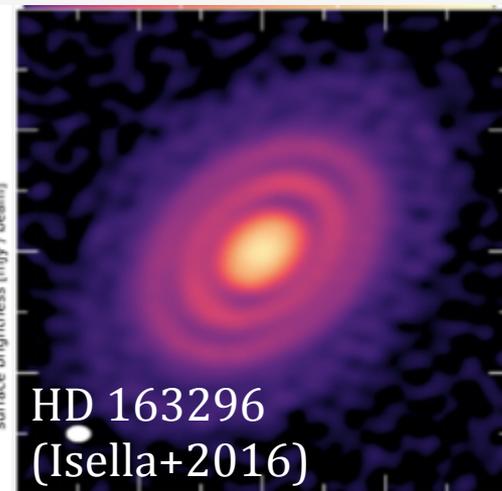
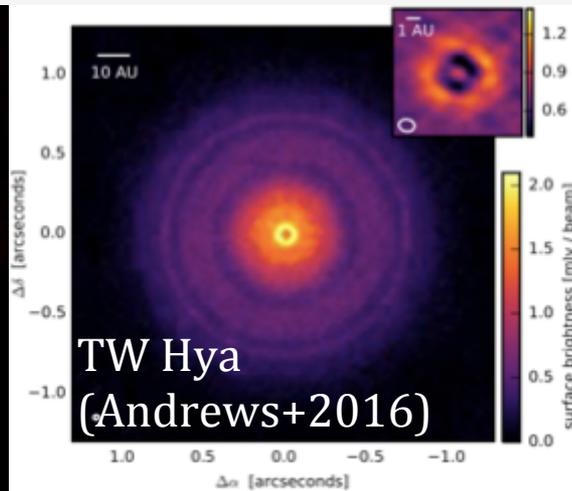
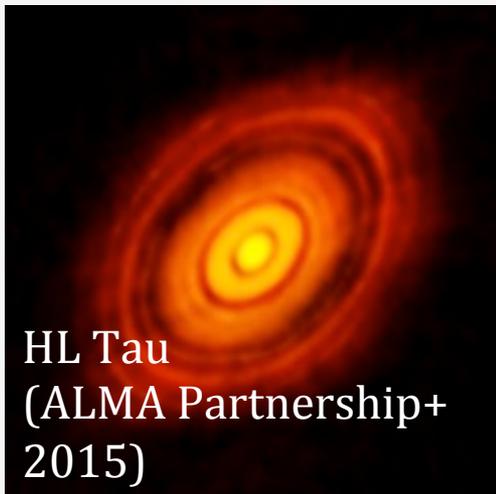
共同研究者: 塚本 裕介 (鹿児島大学)

2019/3/18

新学術領域A02/B02 合同キックオフミーティング at 茨城大学

# ALMA による多重リング構造の発見

## ➤ 原始惑星系円盤中の多様なリング・ギャップ構造



- ALMA による観測で多数の円盤中にダストのリング・ギャップ構造が発見
- 半径  $\geq 10$  au と比較的遠方

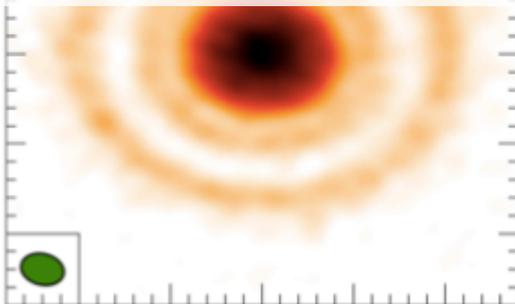
これらの構造の起源は？

# リング・ギャップ構造の起源

## ➤ 原始惑星系円盤中の多様なリング・ギャップ構造

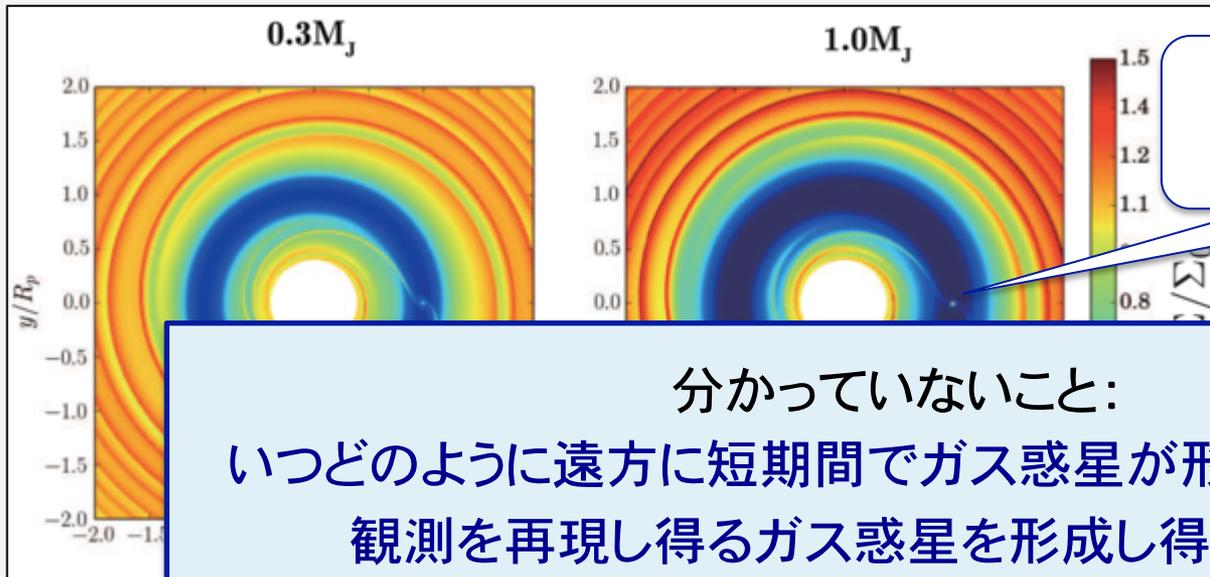


- ✓ 磁気回転不安定性 (Johansen+2009, Uribe+2011)
- ✓ 永年重力不安定性 (Youdin 2011, Takahashi & Inutsuka 2014)
- ✓ 傾圧不安定性 (Kretke & Lin 2007, Dzyurkevich+2010, Flock+2015)
- ✓ ダスト焼結 (Okuzumi+2016)
- ✓ 光蒸発 (Ercolano+2017)
- ✓ **惑星-円盤相互作用** (e.g., Goldreich & Tremaine 1980, Lin & Papaloizou 1986)



# 惑星による円盤ギャップ形成

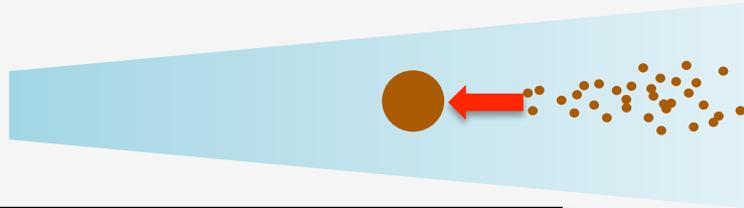
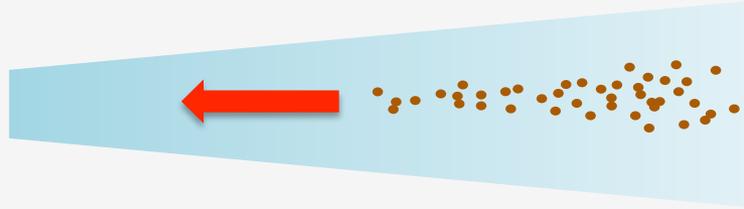
## ➤ 流体シミュレーションによるギャップ形成の再現



ガス惑星が円盤に  
ギャップを開ける

- ✓ 円盤内のガス惑星で HL Tau などのギャップ構造を再現可能  
(e.g., Dipierro+2015, Dong+2015, Kanagawa+2015, 2016)
- ? 従来のコア降着モデルでは遠方 ( $\geq 10$  au) での早期惑星形成困難  
(e.g., Dodson-Robinson+2009)
- ? 重力不安定性で遠方惑星形成可能だが、質量が大きくなりすぎる  
(Kratter+2010)

# ペブル集積による惑星形成



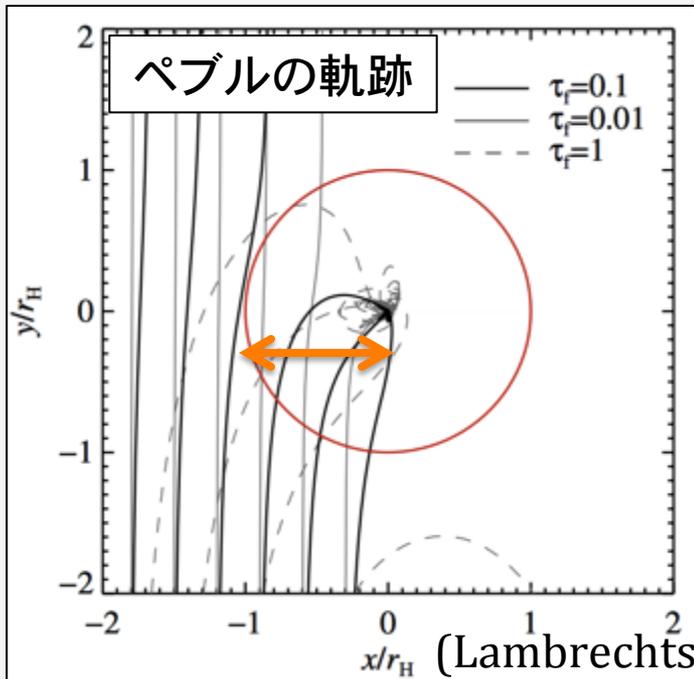
円盤内でダスト ( $\sim 0.1 \mu\text{m}$ ) が  
cm サイズの“ペブル”に成長



成長したペブルはガス抵抗を受け  
中心星へ落下



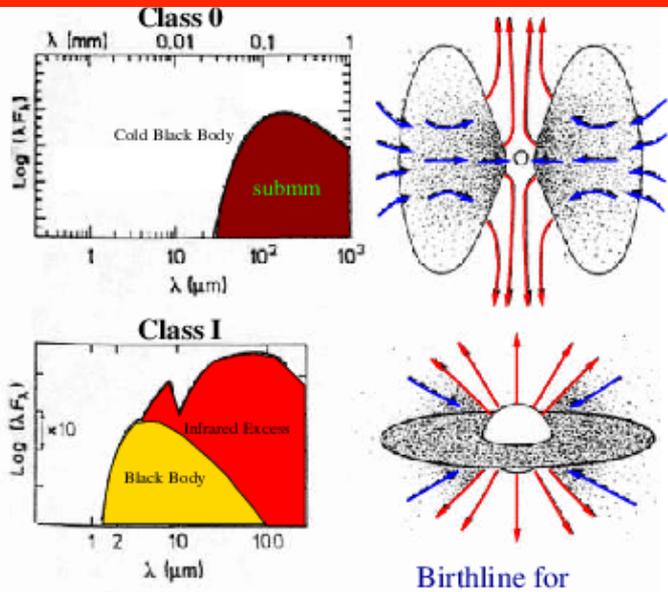
円盤内に大きな微惑星/原始惑星が  
形成されていた場合、ペブルが集積し  
成長を促進 (e.g., Ormel & Klahr 2010)



円盤進化の初期段階 & 遠方で  
ペブル集積による惑星形成が働く可能性?  
(cf. Tsukamoto+2017)

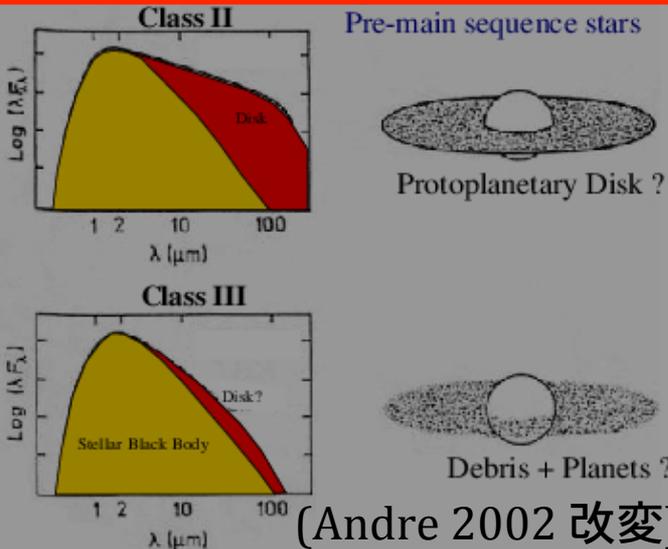
# クラス 0/I 段階での惑星形成

Protostellar Phase



- ギャップを持つ円盤のいくつかは非常に若い
  - HL Tau:  $\lesssim 1$  Myr
  - AS 209:  $\sim 0.5-1$  Myr
  - Elias 2-24:  $\sim 0.4$  Myr
 → 早い段階での惑星形成が必要
- Class 0/I 段階でのペブル集積によるガス惑星形成は可能か？
  - この段階でもダストの成長に伴うペブル流束が期待できる  
(Tsukamoto+2017)
  - 降着率が多い (材料が多い)
  - $\sim 0.5$  Myr 以内

Pre-Main Sequence Phase



コンセプト:  
Class 0/I YSO 円盤でのペブル集積のタイムスケールを導出する

# モデル

- Class 0/I YSOs 円盤構造の解析モデル (Tsukamoto+2017)
  - 重力的に marginally unstable なガス円盤 ( $Q=2$ ) を想定
  - シミュレーションを再現する解析的なガス・ダスト円盤構造
    - 定常降着円盤を仮定, ダスト合体成長を考慮
  - Class 0/I YSOs 中でもダスト成長によるペブル流束が期待できる
  
- ペブル降着タイムスケールの解析モデル (e.g., Ida+2016)
  - 円盤中での微惑星/原始惑星へのペブル集積のタイムスケールを解析的に導出
  - 様々なペブル降着レジーム
    - **3D** / 2D レジーム
    - **Bondi** / Hill レジーム
    - **Epstein** / Stokes レジーム

# モデル (円盤)

## □ Class 0/I YSOs 円盤構造の解析モデル (Tsukamoto+2017)

- 重力的に marginally unstable なガス円盤 ( $Q=2$ ) を想定
- シミュレーションを再現する解析的なガス・ダスト円盤構造
  - 定常降着円盤を仮定, ダスト合体成長を考慮
- Class 0/I YSOs 中でもダスト成長によるペブル流束が期待できる

$$\Sigma_{\text{gas}} \simeq 6.7 \times 10^2 \left( \frac{M_*}{M_\odot} \right)^{1/2} \left( \frac{r}{10 \text{ au}} \right)^{-12/7} \text{ g cm}^{-2}$$

$$\alpha \simeq 3.2 \times 10^{-2} \left( \frac{\dot{M}_{\text{gas}}}{10^{-6} M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right) \left( \frac{r}{10 \text{ au}} \right)^{9/14}$$

$$a_{\text{dust}} \simeq 3.8 \times 10^2 \left( \frac{r}{10 \text{ au}} \right)^{-47/28} \left( \frac{\dot{M}_{\text{gas}}}{10^{-6} M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)^{1/2} \left( \frac{M_*}{M_\odot} \right) \left( \frac{\rho_{\text{int}}}{0.1 \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-1} \text{ cm}$$

$$\text{St} \simeq 8.9 \times 10^{-2} \left( \frac{M_*}{M_\odot} \right)^{1/2} \left( \frac{\dot{M}_{\text{gas}}}{10^{-6} M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)^{1/2} \left( \frac{r}{10 \text{ au}} \right)^{1/28}$$

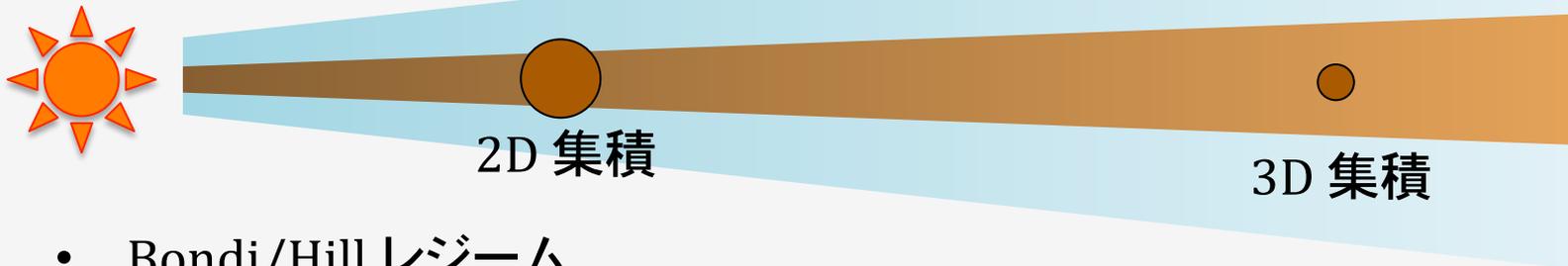
(エプスタイン則の場合)

# モデル (ペブル集積)

□ ペブル降着タイムスケールの解析モデル (e.g., Ida+2016)

✓ ペブル集積の表式は様々なモードによって変化する

- 3D/2D 集積モード



- Bondi/Hill レジーム
- ストークス/エプスタインレジーム
  - 粒子のガス抵抗則によって変化

✓ 今回注目するパラメータ領域 ( $\geq 10$  au) では,  
ペブル集積モードは 3D, Bondi, エプスタインレジーム

# ペブル集積のタイムスケール

## ➤ Class 0/I YSOs におけるペブル集積のタイムスケール

$$t_{\text{acc}} \simeq 9.4 \times 10^5 \kappa^{-2} \left( \frac{M_*}{M_\odot} \right)^{-3/4} \left( \frac{\dot{M}_{\text{dust}}}{10^{-4} M_\oplus \text{ yr}^{-1}} \right)^{-1} \left( \frac{\dot{M}_{\text{gas}}}{10^{-6} M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)^{1/4} \left( \frac{r}{10 \text{ au}} \right)^{65/56} \text{ yr}$$

(Tanaka & Tsukamoto 2019)

Reduction factor:  $\kappa = \exp \left( - \left( \frac{\text{St}}{\min(2, \text{St}^*)} \right)^{0.65} \right)$  (Ormel & Kobayashi 2012)

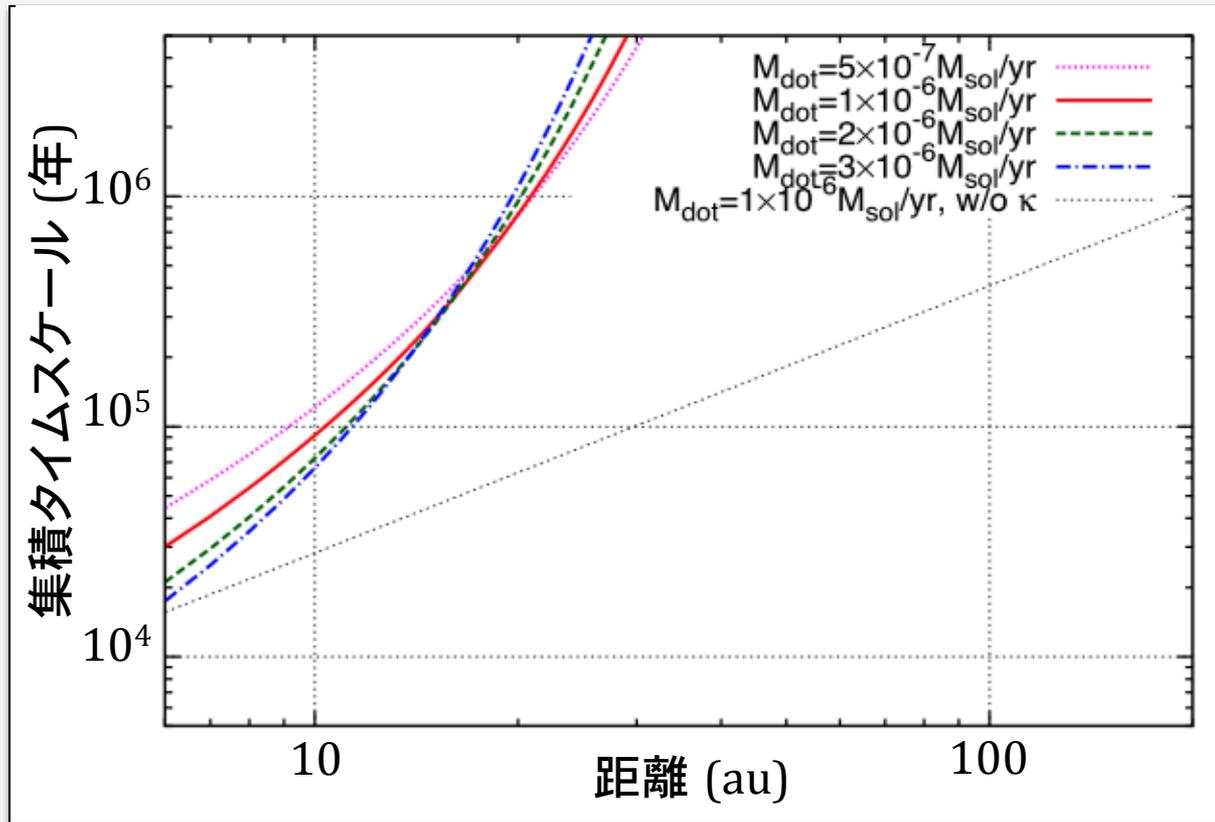
$$\text{St}^* = 4 \left( \frac{M}{M_*} \right) \frac{1}{\eta^3} \quad \eta = -\frac{1}{2} \left( \frac{c_s}{v_K} \right)^2 \frac{d \ln P}{d \ln r}$$

例として,  $\dot{M}_{\text{dust}} = f \dot{M}_{\text{gas}}$ , ダスト・ガス比  $f = 0.01$ ,  $\dot{M}_{\text{gas}} = 10^{-6} M_\odot \text{ yr}^{-1}$  とすると, タイムスケールは

$$t_{\text{acc}} \simeq 2.8 \times 10^4 \kappa^{-2} \left( \frac{M_*}{M_\odot} \right)^{-3/4} \left( \frac{r}{10 \text{ au}} \right)^{65/56} \text{ yr}$$

# ペブル集積のタイムスケール

## ➤ 半径・ガス降着率への依存性



中心星：太陽質量

$$\dot{M}_{\text{dust}} = f \dot{M}_{\text{gas}}$$

$$f = 0.01$$

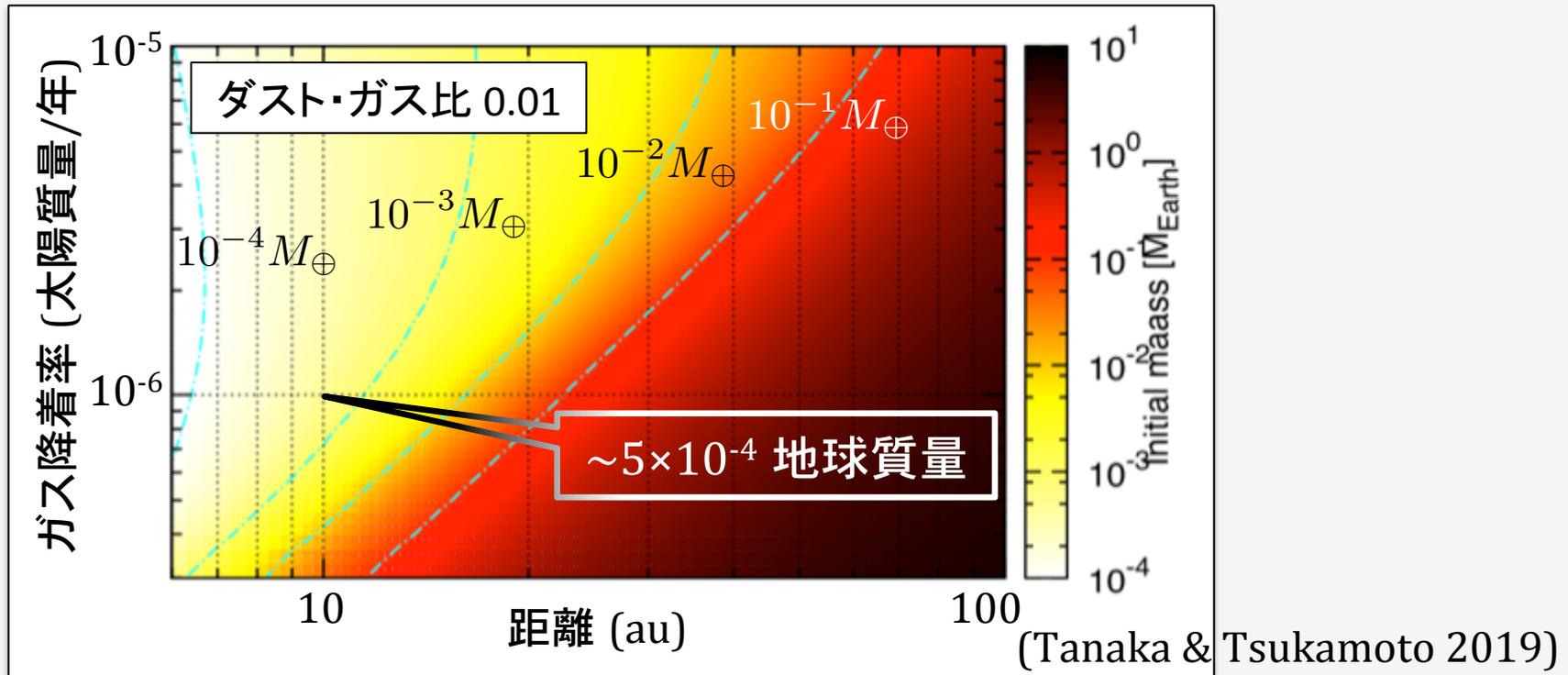
$$M_{\text{core}} = 10^{-3} M_{\oplus}$$

(Tanaka & Tsukamoto 2019)

- 遠方でタイムスケール急激に増加
- 内側ではガス降着率増でタイムスケール減, 外側で逆転

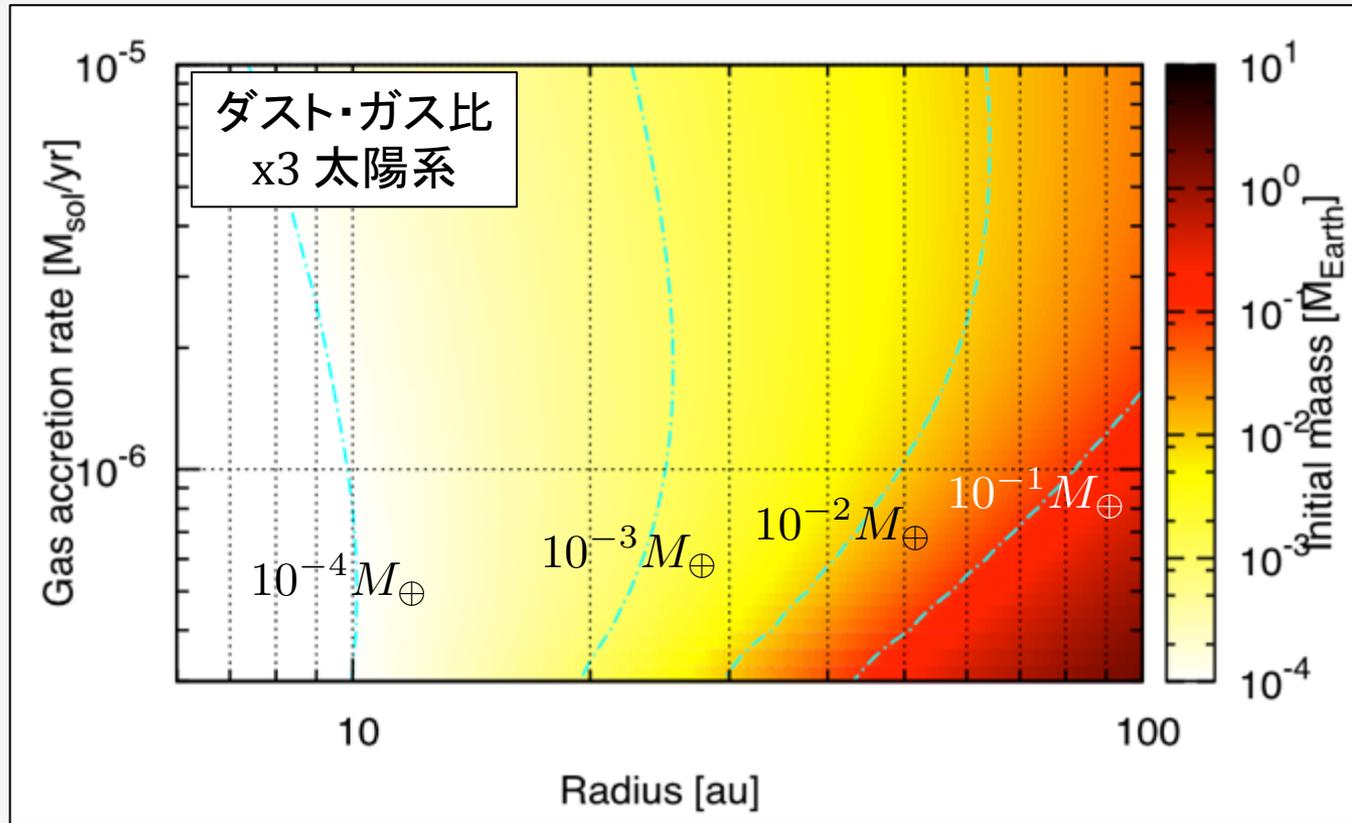
# ガス惑星形成に必要な初期質量

- Class 0/I 段階中 (0.5 Myr) にガス惑星のコア (10地球質量) を形成可能な初期質量を計算



- ガス降着率増加で初期質量は減少する傾向があるが、ある程度の降着率ではペブル集積効率が低下、初期質量が増加 → ペブルのストークス数が大きくなり、 $\kappa$  の効果増大のため

# ガス惑星形成に必要な初期質量



- ~10 au では比較的小さい初期質量でガス惑星のコアへ成長可
- ダスト・ガス比が大きい場合, 初期質量は減少

# 考察

## ➤ Class 0/I YSOs におけるペブル集積のタイムスケール

$$t_{\text{acc}} \simeq 9.4 \times 10^5 \kappa^{-2} \left( \frac{M_*}{M_\odot} \right)^{-3/4} \left( \frac{\dot{M}_{\text{dust}}}{10^{-4} M_\oplus \text{ yr}^{-1}} \right)^{-1} \left( \frac{\dot{M}_{\text{gas}}}{10^{-6} M_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)^{1/4} \left( \frac{r}{10 \text{ au}} \right)^{65/56} \text{ yr}$$

- Class II 段階よりガス降着率大 → ペブル集積タイムスケールも短い
- ただし 3D 降着モードのため集積効率は低い
  - 降着率大で  $\alpha$  が大きくなるため
  - ダスト円盤の構造によってタイムスケールが大きく変わる可能性
- ガス降着率が大きくなると集積タイムスケールが長くなる場合も

## ➤ 必要な初期質量は？

- $5 \times 10^{-4} M_{\text{Earth}}$  の天体が Class 0/I 期間中に  $10 M_{\text{Earth}}$  に成長可 (f=0.01, at 10 au の場合)
- ダスト・ガス比が  $3 \times f_{\text{solar}}$  の場合は  $10^{-4}$  地球質量

# まとめ

## ➤ Class 0/I YSOs でのペブル集積による惑星形成の可能性を考察

- Class 0/I YSOs の円盤構造およびペブル集積の解析モデルからペブル集積のタイムスケールを導出
- ペブル集積のタイムスケールは Class II 円盤と比べて短くなる
- ただしガス降着率増加で集積タイムスケールが長くなる場合も

## ➤ Class 0/I 段階中に巨大惑星のコアを形成するための条件は？

- $\sim 10^{-6} M_{\text{sun}}/\text{yr}$ ,  $f=0.01$ , 10 au で  $5 \times 10^{-4} M_{\text{Earth}}$
  - $\sim 10^{-6} M_{\text{sun}}/\text{yr}$ ,  $f=3f_{\text{solar}}$ , 10 au で  $10^{-4} M_{\text{Earth}}$
- の初期質量で 0.5 Myr の間にペブル集積で  $10 M_{\text{Earth}}$  に成長可能

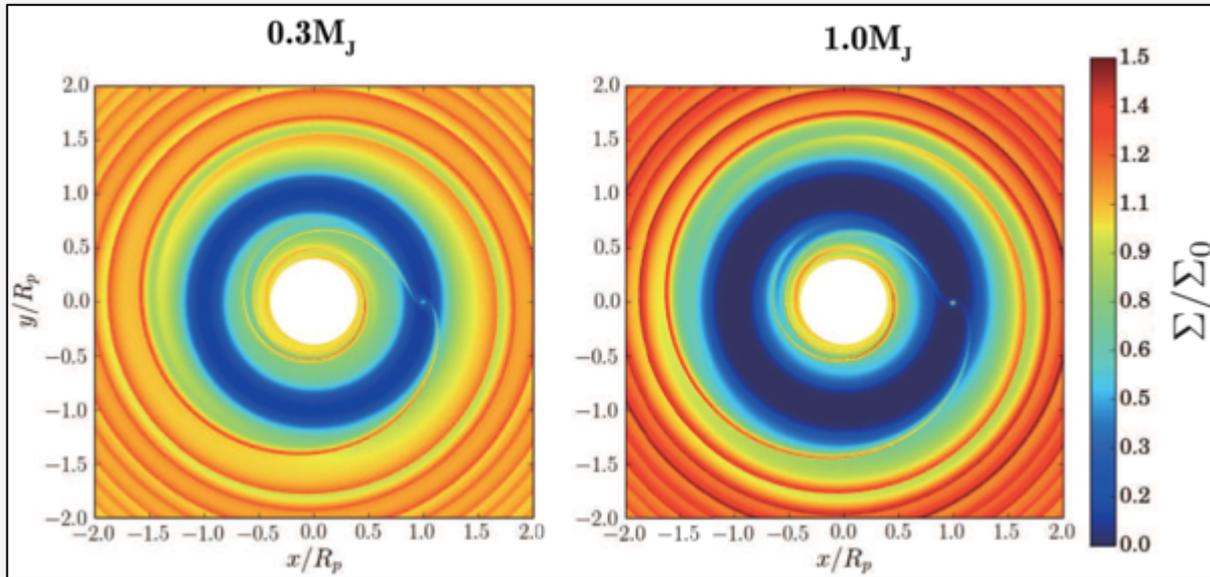
## ➤ 今後の検討事項

- Class 0/I 段階でどの程度の微惑星/原始惑星が形成可能か？  
ALMA の観測はガス惑星の早期形成で説明できるか？
- Class II 移行後の円盤・惑星進化とのつながり
- 円盤構造 (特にダスト円盤) のアップデート

+ 今後の計画  
(巨大ガス惑星の形成モデルについて)

# 巨大ガス惑星の形成モデル

## ➤ 惑星による円盤へのギャップ形成とその進化



(Kanagawa+2016)

これまでにあまり考慮されていないこと:

- 惑星への降着 (吸い込み) を考慮した円盤・ギャップの進化
- 降着による惑星質量の進化
- 広い惑星質量範囲での進化の違い

# 惑星への降着の影響 (1)

- 円盤内の惑星にガスが降着することで円盤・ギャップ構造に変化
  - Dürmann & Kley (2015) ではロッシュローブ内のガスの一定量を除去することで惑星への降着を模擬
  - ただし惑星質量は変化させず
- 惑星への降着や惑星質量の変化を考慮したシミュレーションは少なくとも網羅的には行われていない

## 惑星への降着の影響 (2)

- 惑星が開けるギャップの深さ

$$\Sigma_{\text{gap}} = \frac{\Sigma_{\text{out}}}{1 + 0.04K} \quad K = \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 \left(\frac{h_p}{r_p}\right)^{-5} \alpha^{-1} \quad (\text{e.g., Kanagawa+2015})$$

- ガス降着による惑星の成長率 (惑星質量が大きい場合)

$$\begin{aligned} \dot{M}_p &= 0.29 \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^{4/3} \left(\frac{h_p}{r_p}\right)^{-2} r_p^2 \Omega_p \Sigma_{\text{gap}} \\ &= 8.5 \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^{-2/3} \left(\frac{h_p}{r_p}\right) \Sigma_{\text{out}} \nu_p \end{aligned} \quad (\text{Tanigawa \& Watanabe 2002, Tanigawa \& Tanaka 2016})$$

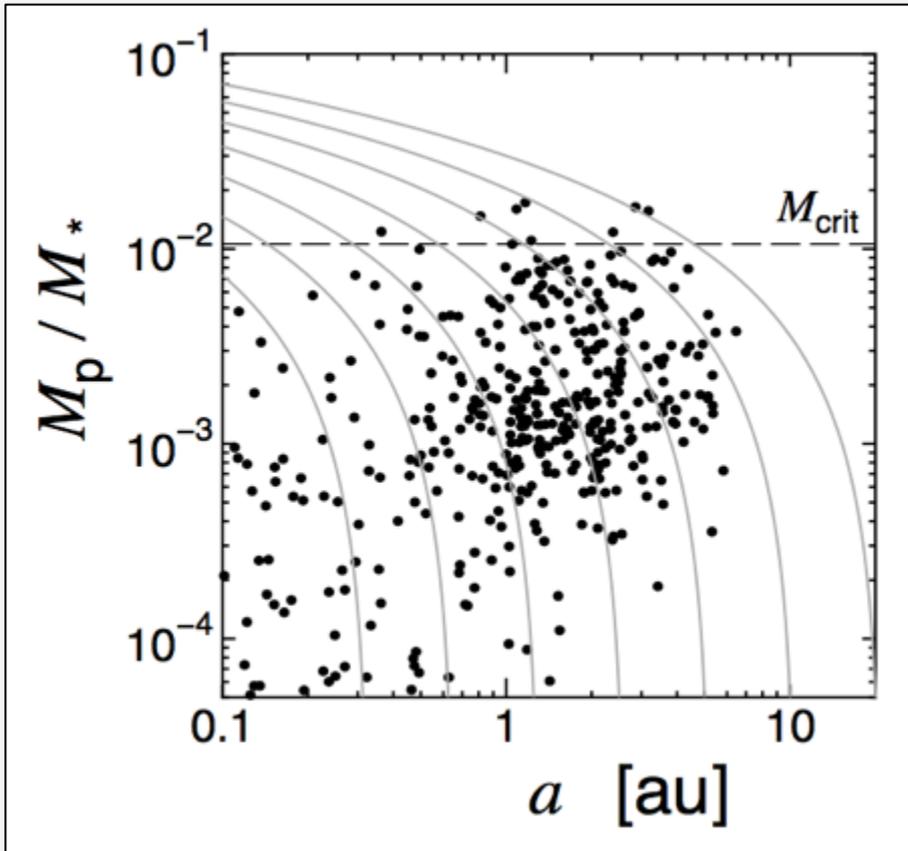
惑星への降着を考慮した場合にこれらの式は有効か？

惑星質量が大きい ( $\approx$  数木星質量) 場合は？

→ 数値シミュレーションを用いて検証する必要あり

# 系外惑星系を再現するパラメータ

➤ 惑星の質量・軌道がどのように進化するか？



$$\frac{d \ln M_p}{d \ln r_p} = \frac{0.29}{6.0} \left( \frac{M_p}{M_*} \right)^{-2/3} = \left( \frac{M_p}{M_{\text{crit}}} \right)^{-2/3}$$
$$M_{\text{crit}} = \left( \frac{0.29}{6.0} \right)^{3/2} M_* = 0.011 M_*$$

- ギャップ深さや惑星の成長率が変わると、どのような惑星系が形成されるかも変わる
  - 惑星の最終質量
  - 惑星の最終位置

# 今後の計画

- 惑星への質量降着を考慮した円盤-惑星系の2Dシミュレーション
  - 形成されるギャップの特性 (深さ, 幅)
  - 惑星への降着率
  - 惑星質量・軌道の時間進化を様々なパラメータで網羅的に計算し再検討
- 数木星質量以上の惑星を置いた場合のシミュレーション
- 系外惑星系を再現するようなパラメータは?