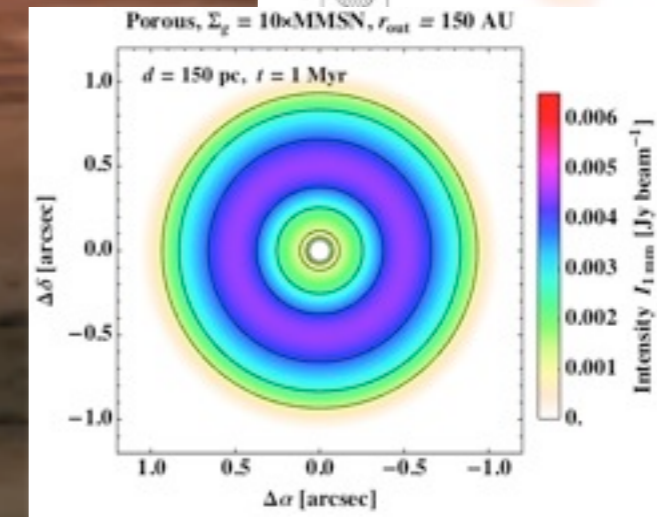
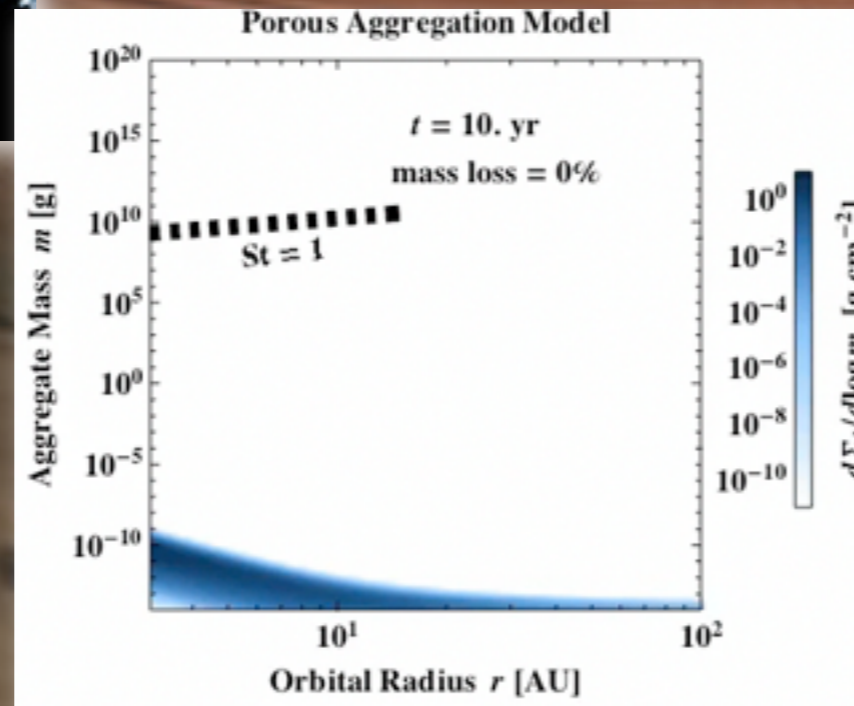
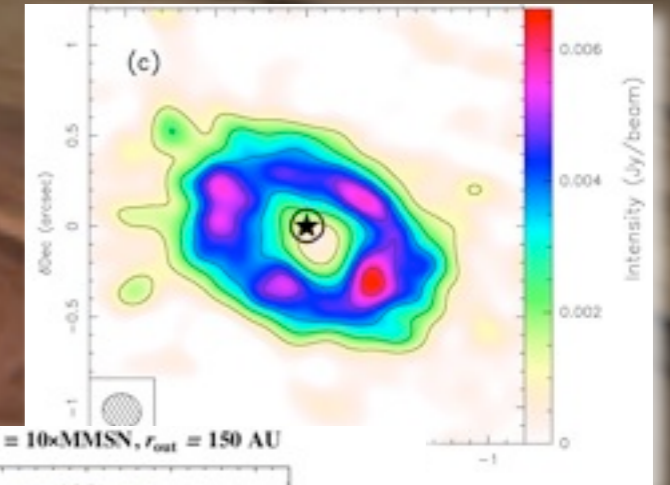
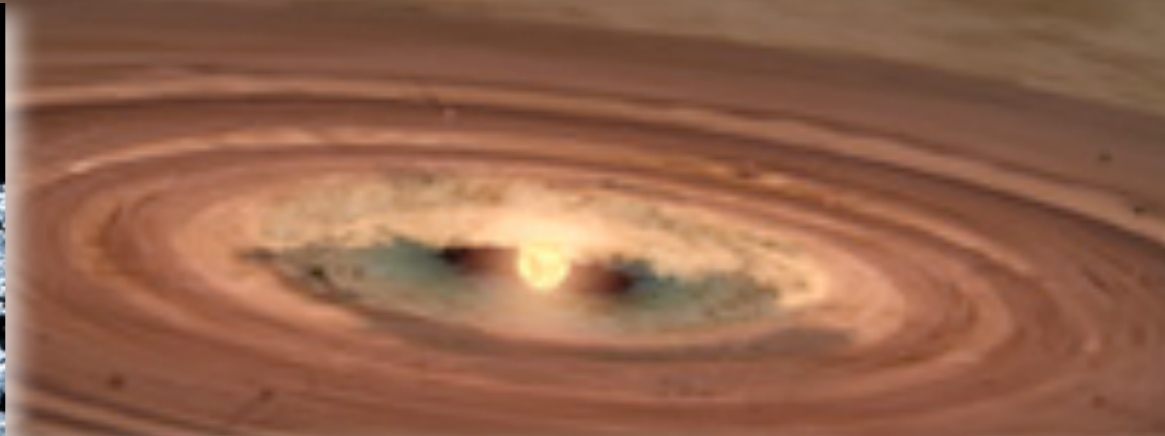
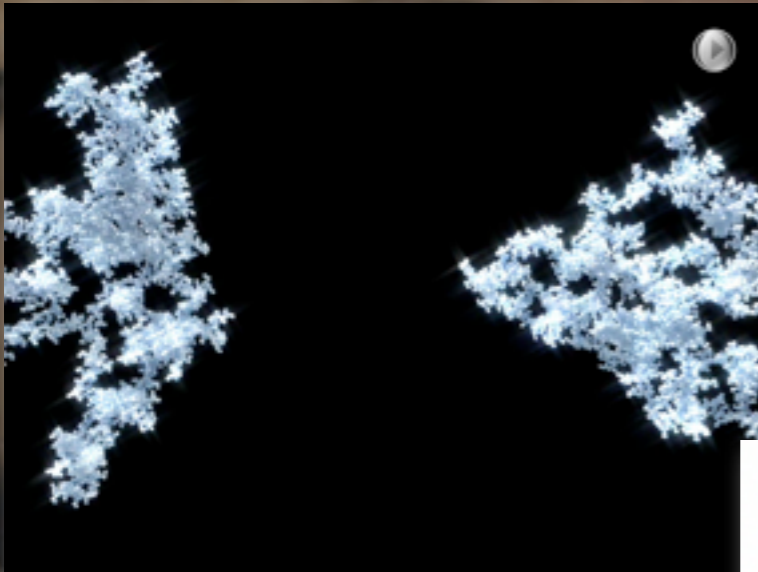


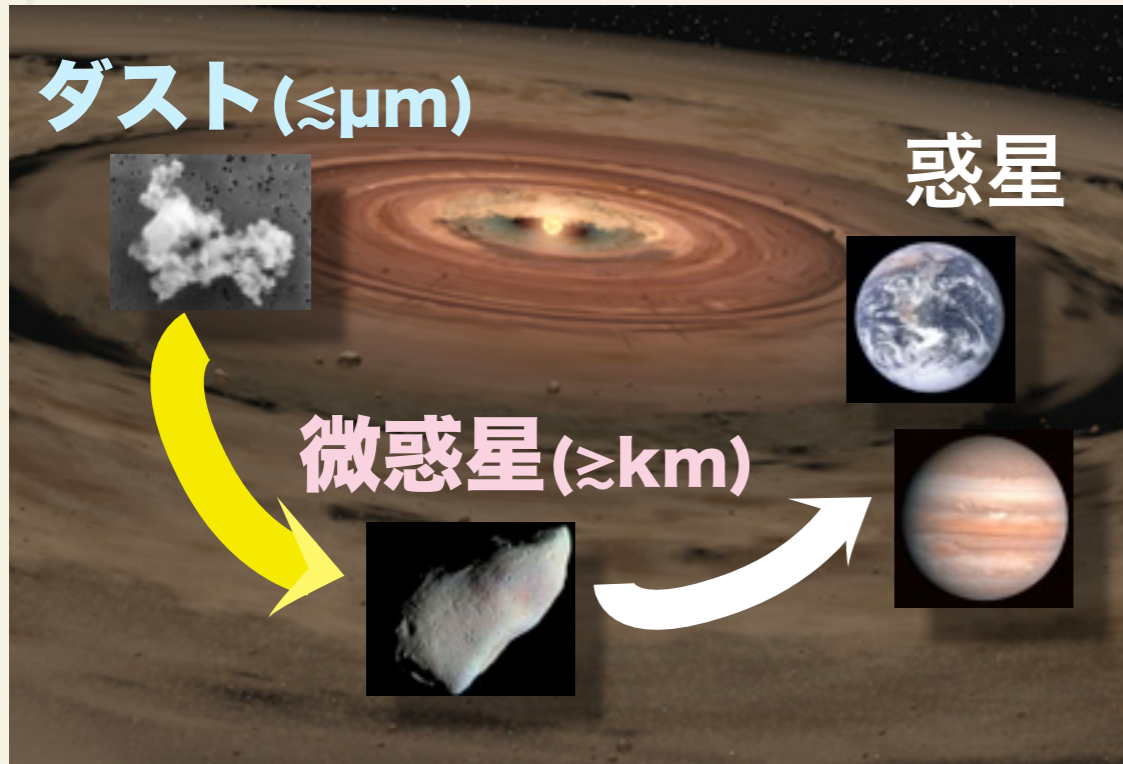
ダストの成長・内部密度進化に伴う 原始惑星系円盤のミリ波放射進化



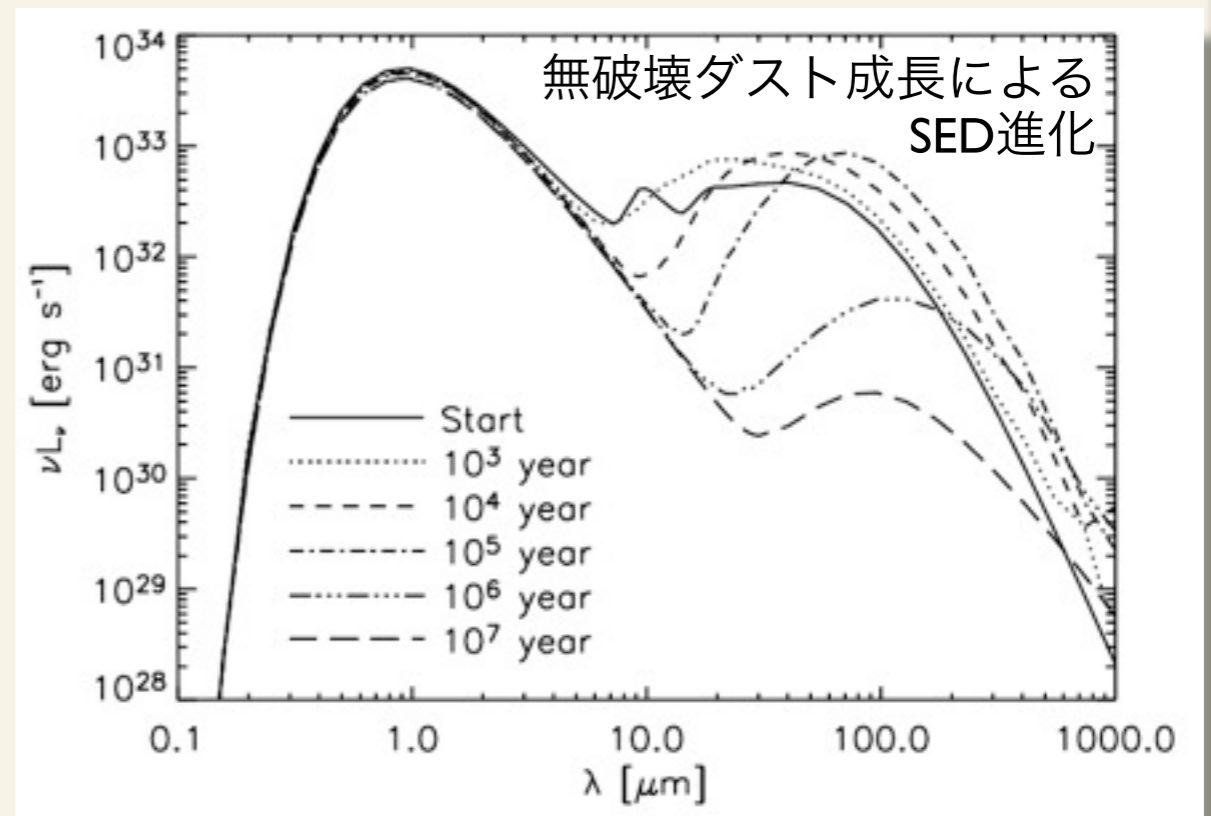
○奥住 聡 (名大理 [来年3月より東工大地惑])
田中 秀和 (北大低温研)

原始惑星系円盤でのダスト成長進化

● ダスト成長 → 惑星形成の第一歩

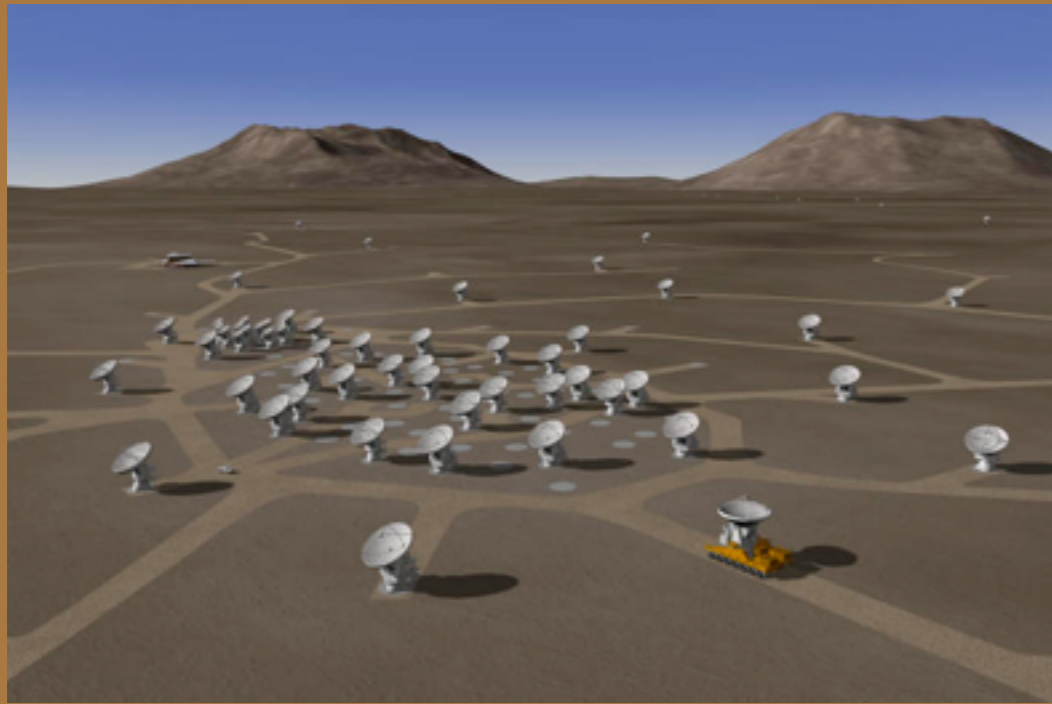


● ダスト進化 → 円盤オパシティ進化



Dullemond & Dominik (2005)

原始惑星系円盤でのダスト成長進化



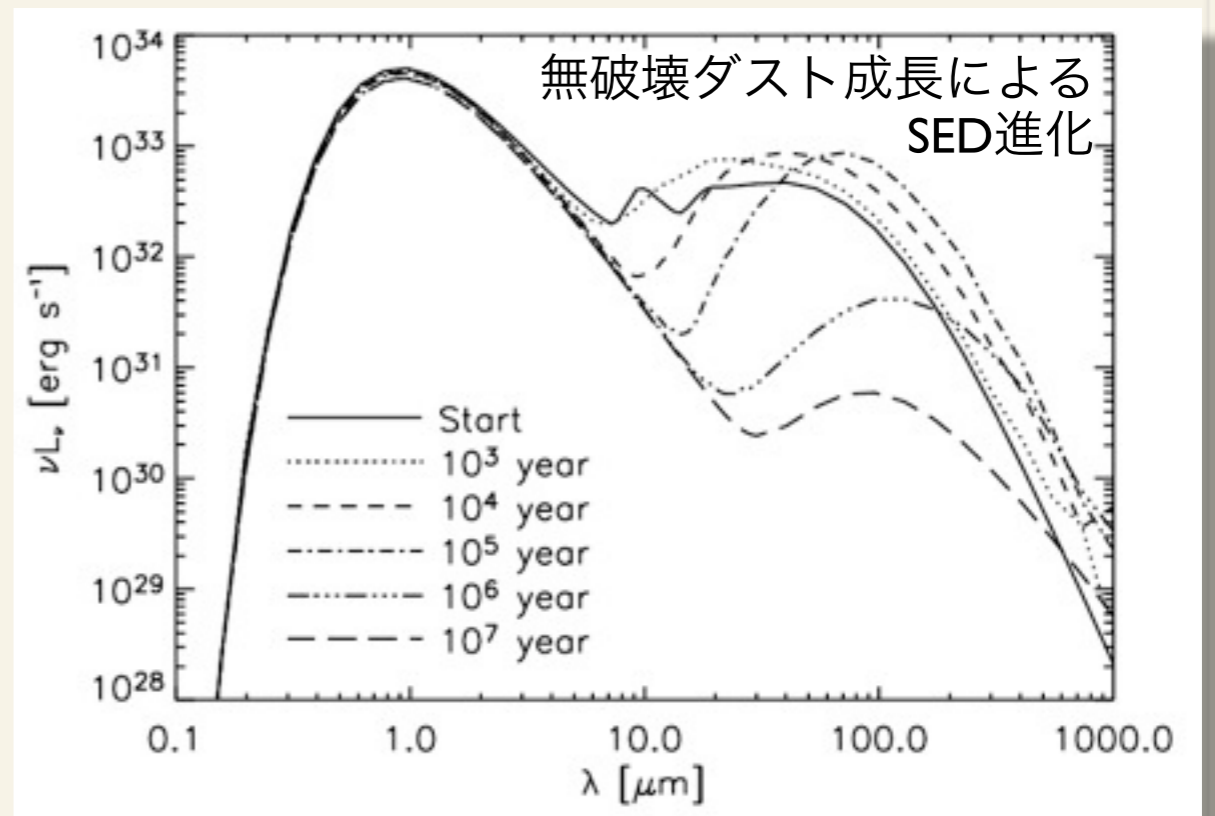
ALMAの本格運用



ダスト熱放射の空間構造が
高感度・高解像度で解明可能に



ダスト進化 → 円盤オパシティ進化

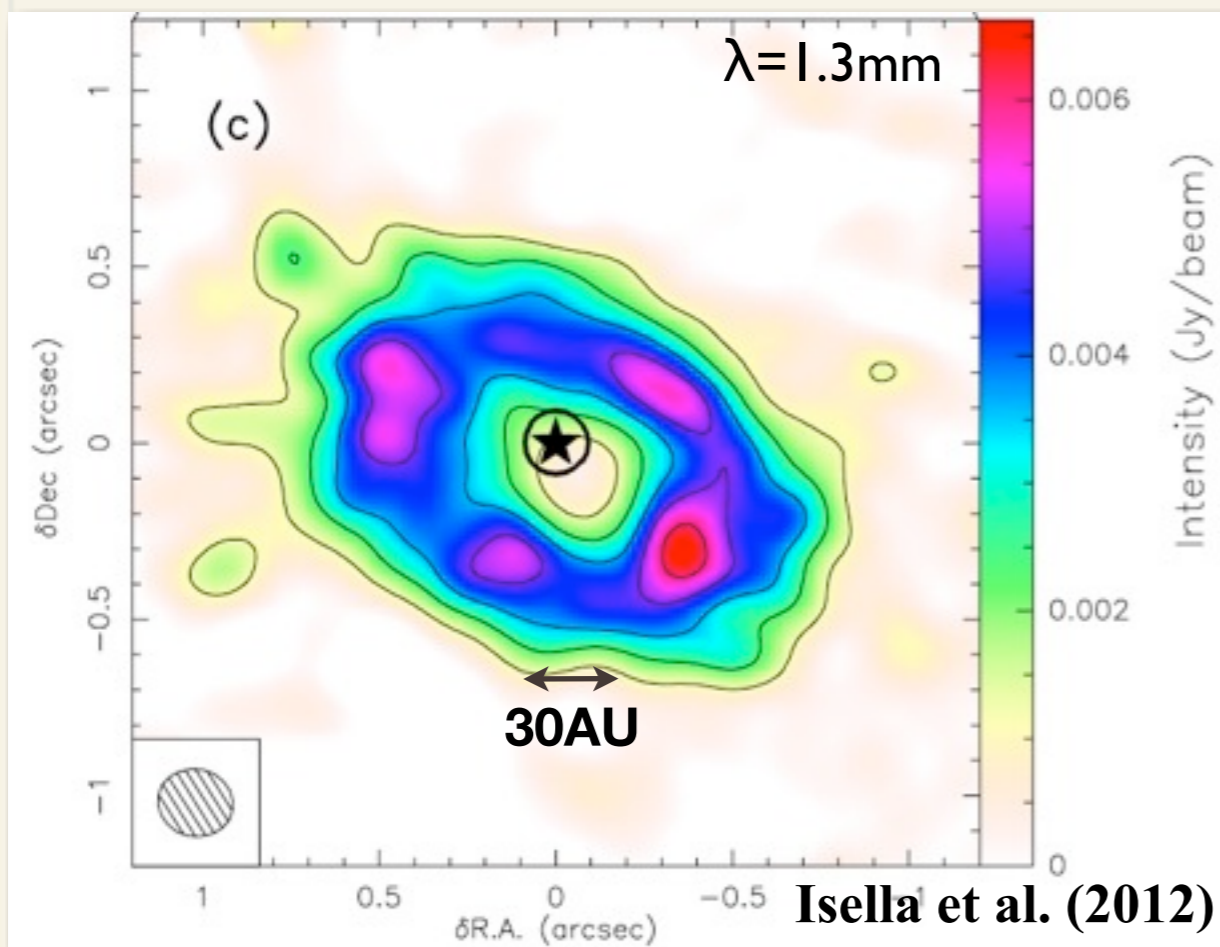


Dullemond & Dominik (2005)

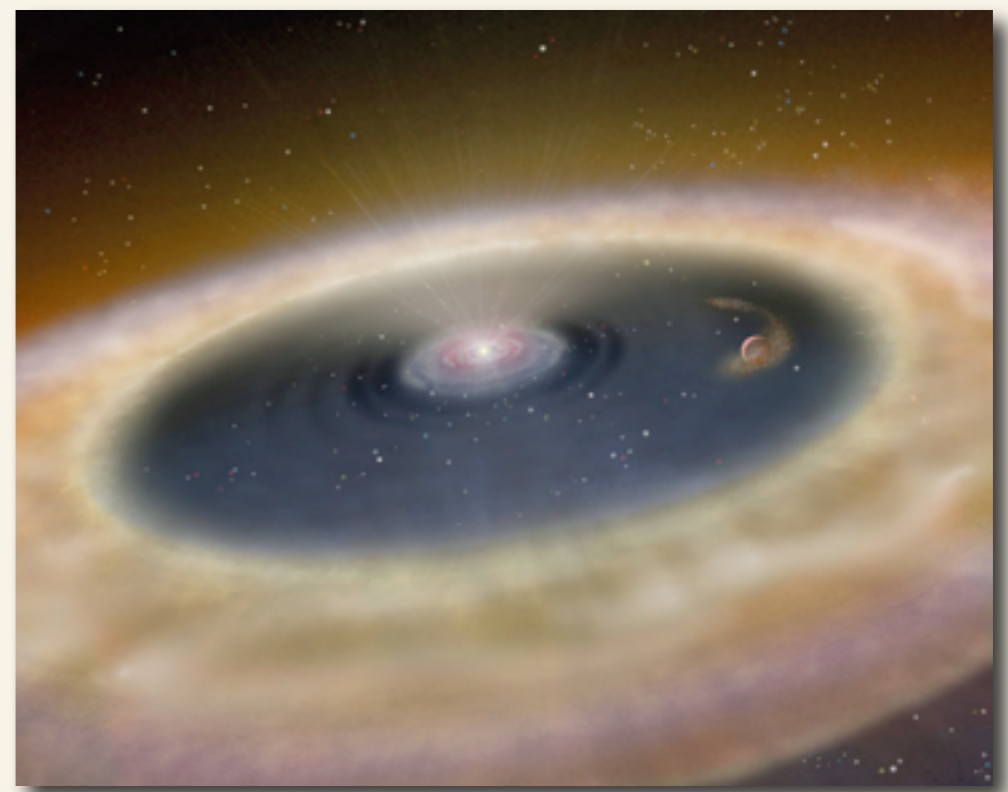
観測側の最近の進展：「ミリ波遷移円盤」

- ミリ波放射（冷たいダストの熱放射）が内側で欠損している円盤が数多く見つかっている (e.g., Pietu et al. 06; Isella et al. 10; Andrews et al. 10)
- 起源は諸説（ダスト成長、惑星の存在、ガス降着＋光蒸発、あるいはその組み合わせ？）

原始惑星系円盤LkCa 15のミリ波撮像



「惑星の存在」説の想像図

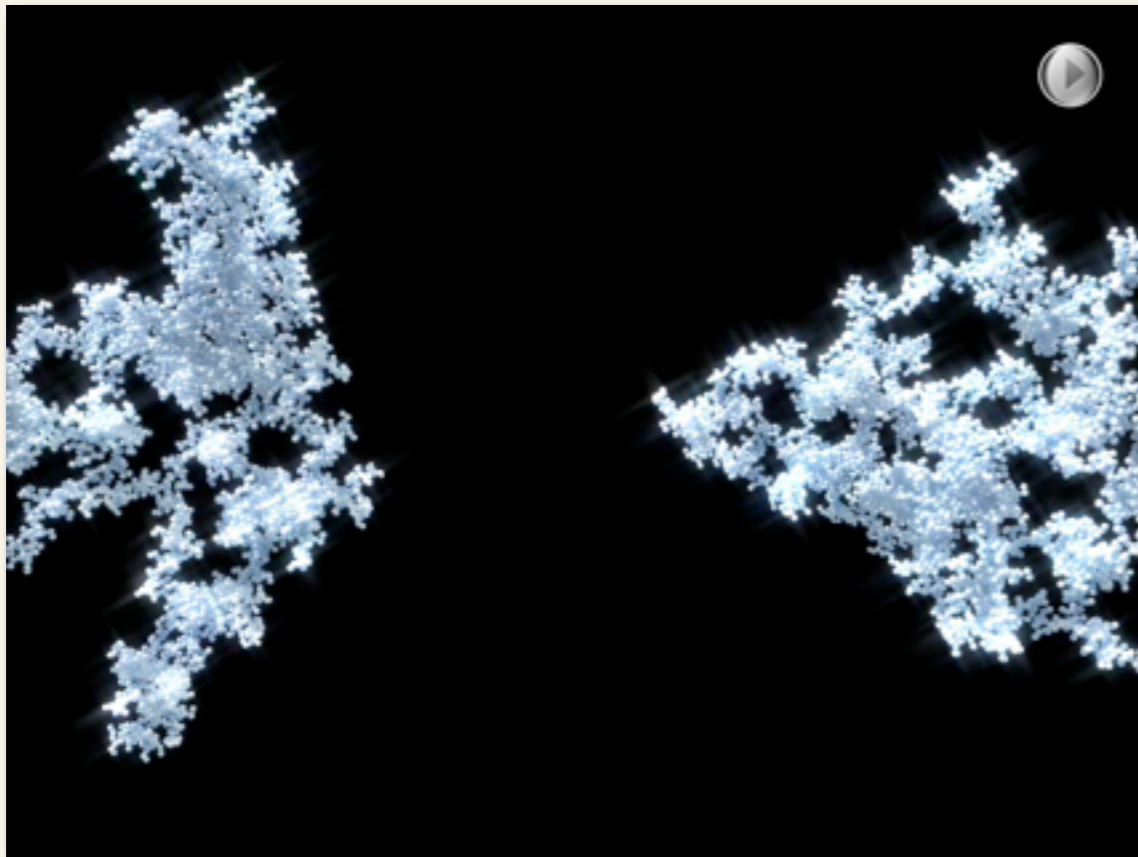


理論側の最近の進展：ダストの低内部密度化

従来のダストモデルの仮定：ダスト粒子は「コンパクト」(充填率 > 0.1)

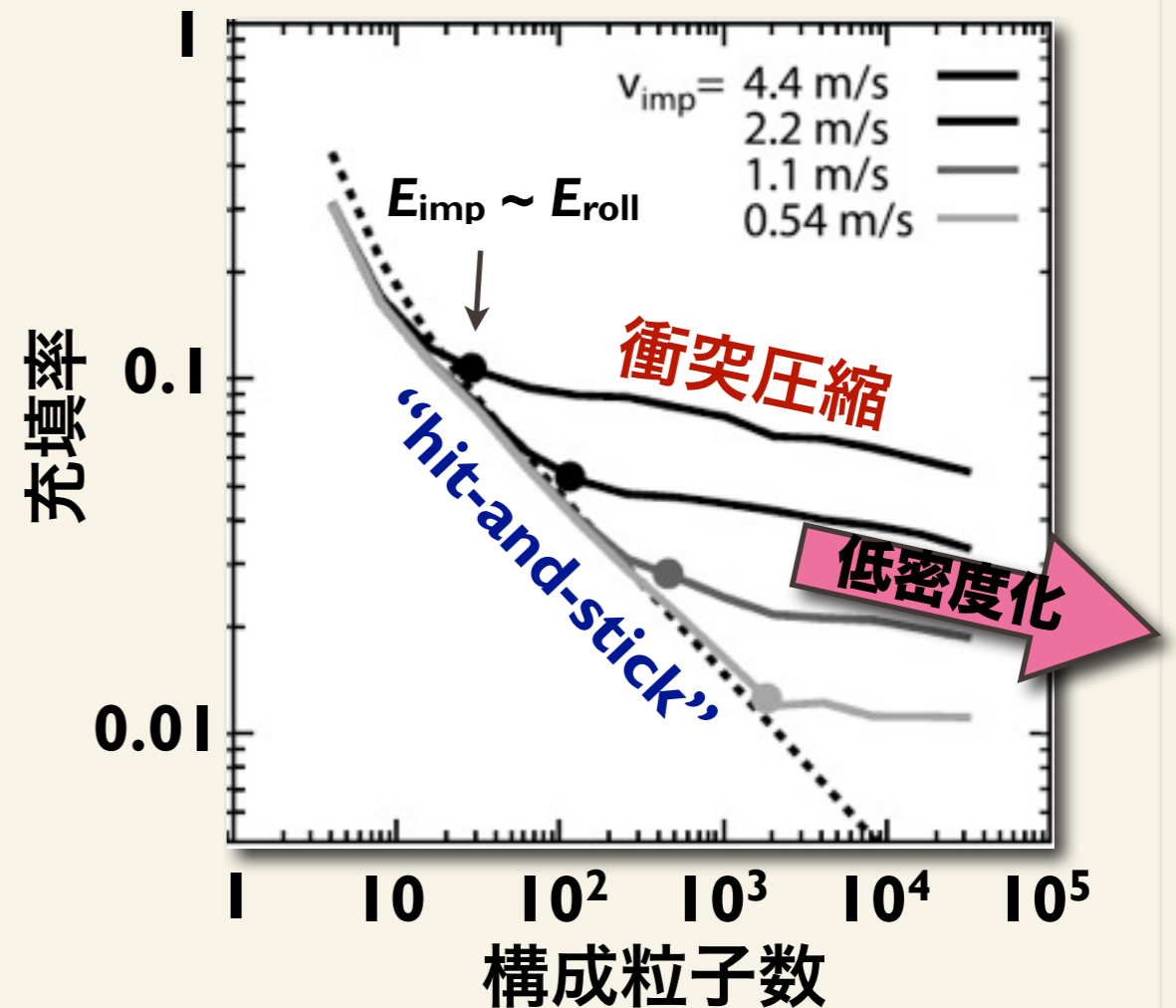


数値衝突実験 → 「合体とともに、充填率 $\ll 1$ の低密度アグリゲイトへと進化」



Suyama, Wada, & Tanaka (2008)

Suyama, Wada, Tanaka, & Okuzumi (2012)



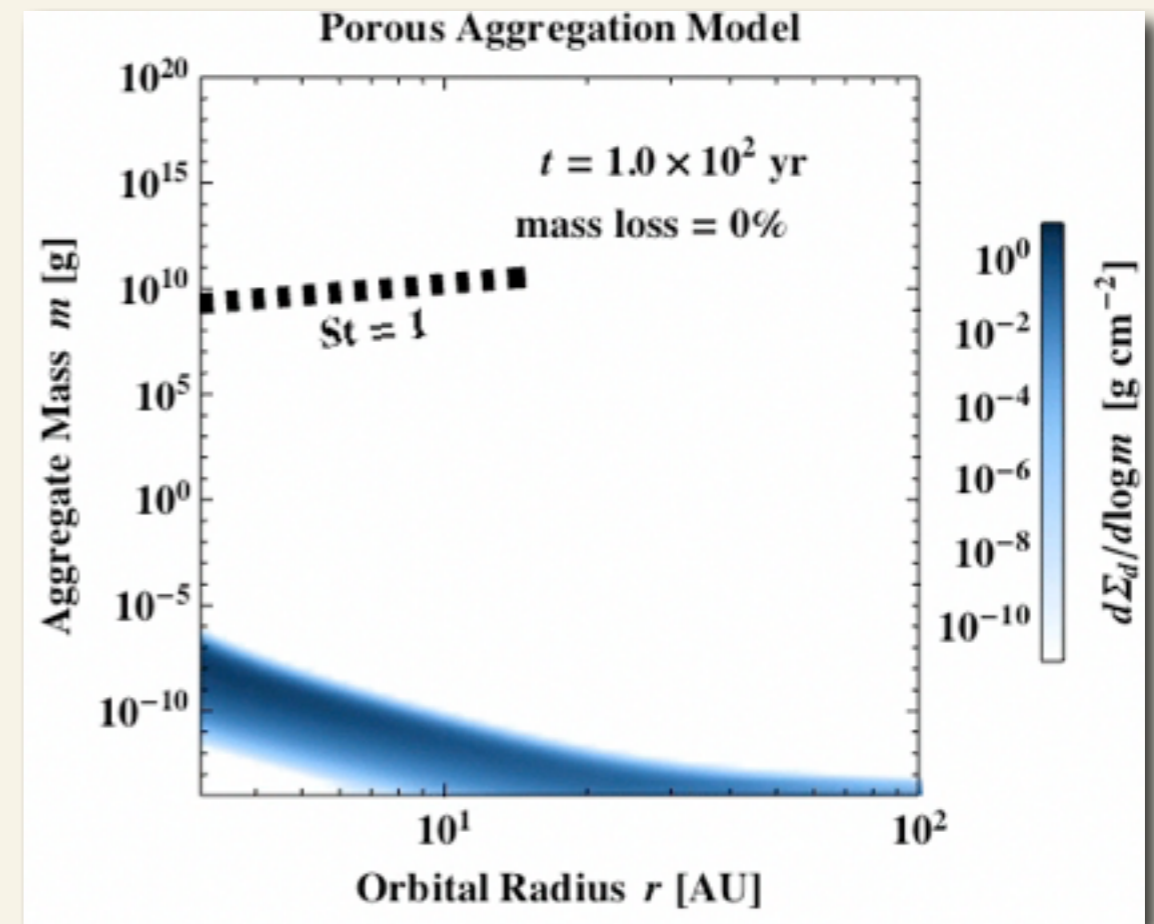
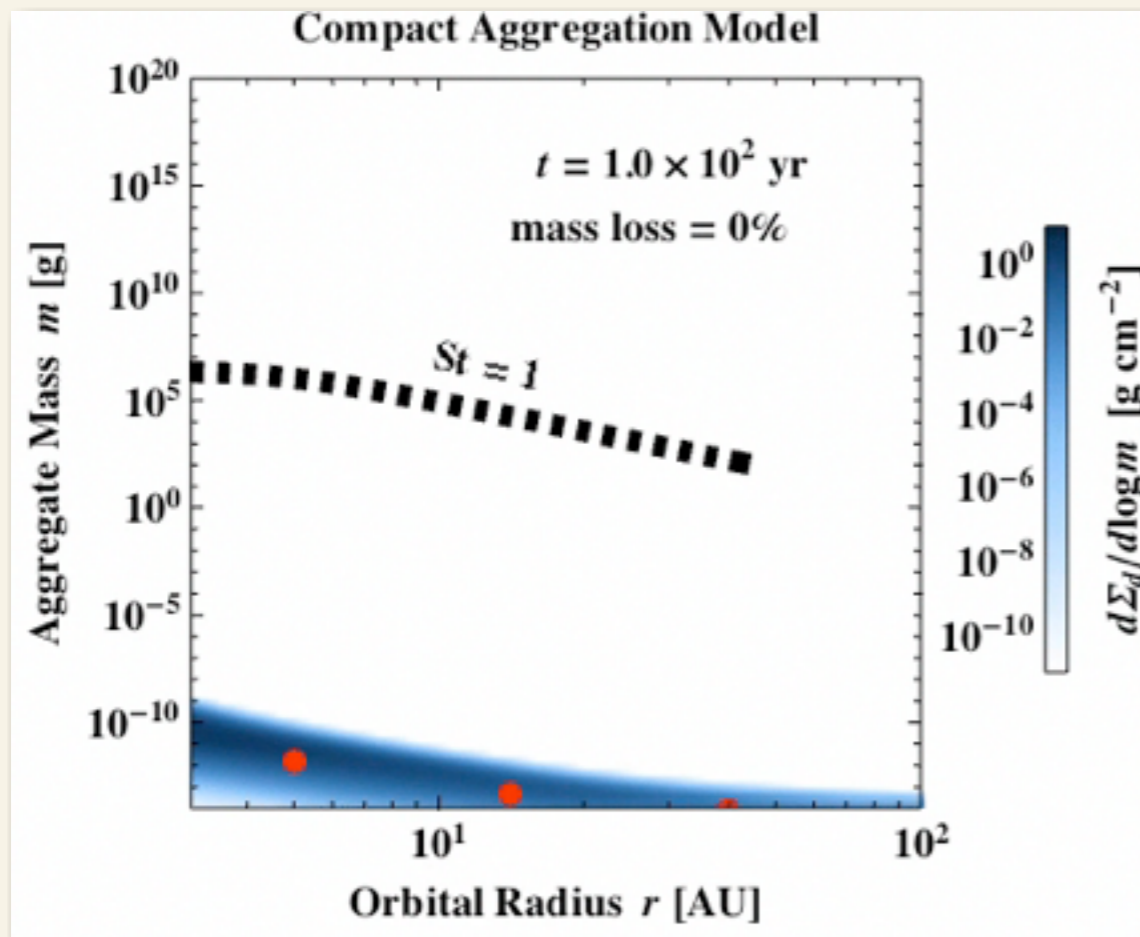
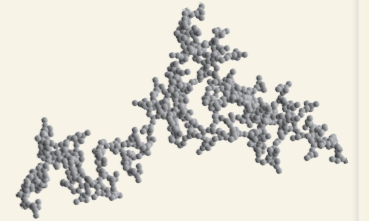
惑星形成に対する影響は？ 観測にどう反映されるか？

惑星形成におけるダスト低密度化の重要性

コンパクトモデル



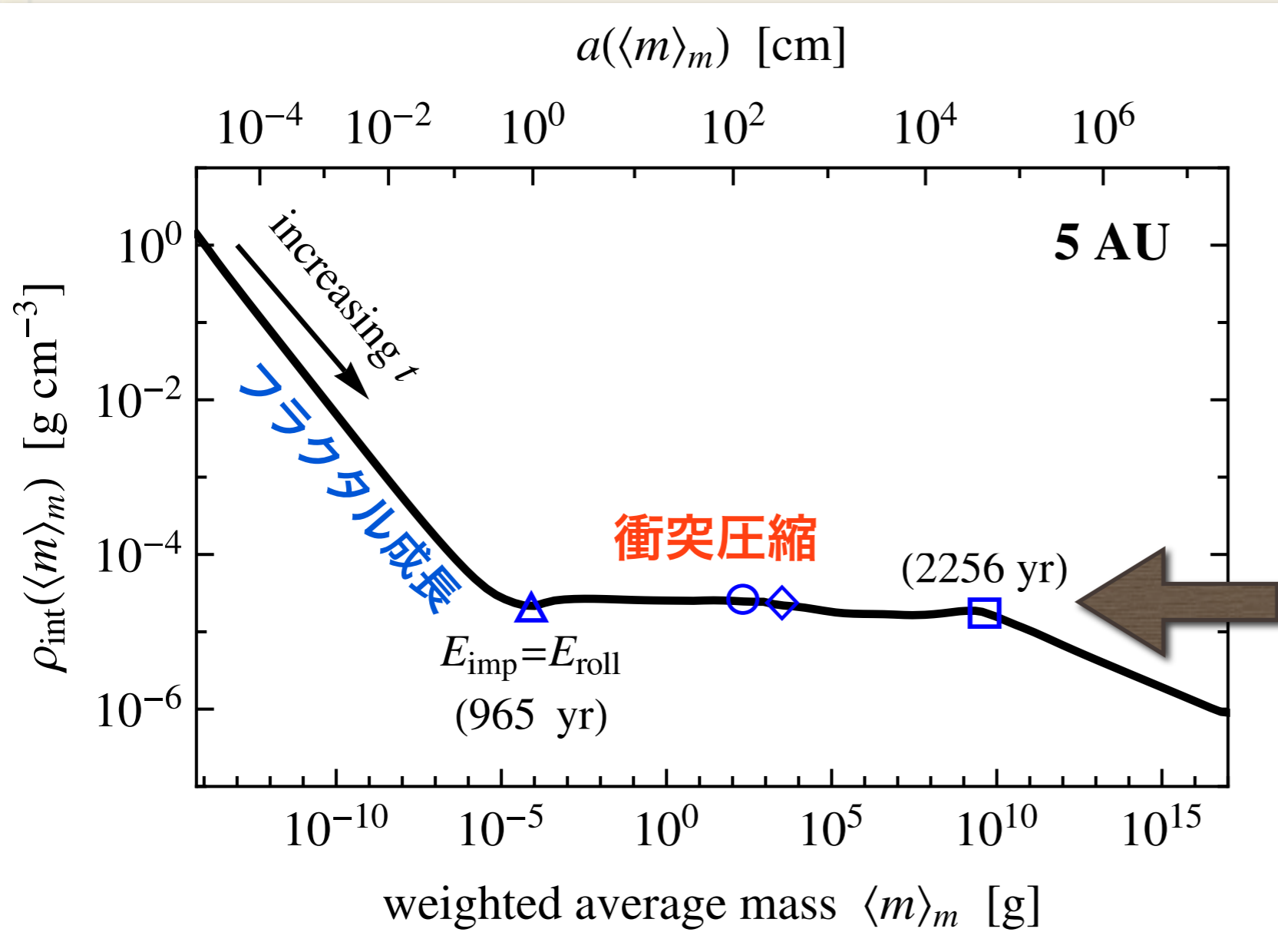
密度進化モデル



低密度化 → 惑星形成領域 (≈ 10 - 30 AU) で急速成長
→ 微惑星形成における「中心星落下問題」が解決

(Okuzumi, Tanaka, Kobayashi, & Wada 2012, ApJ, 752, 106)

ダストアグリゲイトの密度進化



10⁻⁵ g/cc !!

注：実際は、空気抵抗などによる静的圧縮で、より高密度になる (Kataoka, Tanaka, Okuzumi, & Wada, in prep.)

Okuzumi et al. (2012)

今回の研究の目的と方法

Q1. ダストの急速成長がミリ波でどのように見えるか？

Q2. 「ダスト低密度化説」の観測的検証は可能か？

→ 数値シミュレーションに基づき検討

🌐 ダスト成長・密度進化の大局的統計シミュレーション (Okuzumi et al. 2012)

→ ダストサイズ/空隙率の空間分布の時間発展データを作成

- $\Sigma_d(t,r,M)$: 軌道半径 r , 質量 M をもつダストの面密度
- $f(t,r,M)$: 軌道半径 r , 質量 M をもつダストの充填率
- 充填率 (内部密度) の衝突進化 ← 数値衝突実験に基づく公式 (Suyama et al. 2012)
- 完全合体 (破壊, 静電反発などは無視)。中心星落下は考慮。

🌐 有効媒質理論 (固体+真空) を用いた Mie 散乱計算 (Miyake & Nakagawa 1993)

→ 高空隙率ダストのミリ波オパシテイ κ_λ ($\lambda = 1\text{mm}, 3\text{mm}$) を算出

“Maxwell–Garnett Rule”

$$\frac{m_{\text{eff}}^2 - 1}{m_{\text{eff}}^2 + 2} = f \frac{m_{\text{mat}}^2 - 1}{m_{\text{mat}}^2 + 2}$$

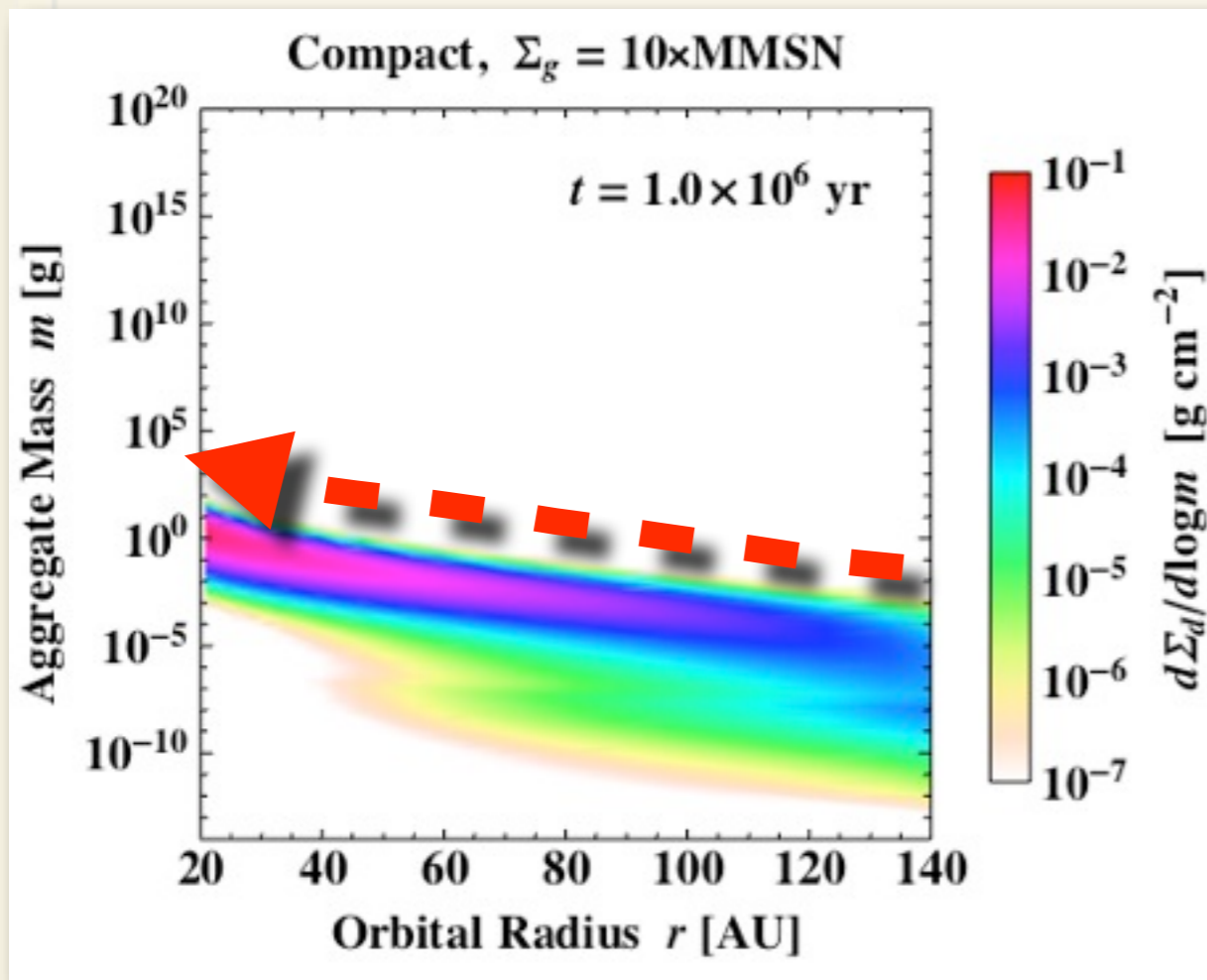
m_{eff} : アグリゲイトの実効複素屈折率

m_{mat} : 構成物質の複素屈折率

f : アグリゲイトの充填率

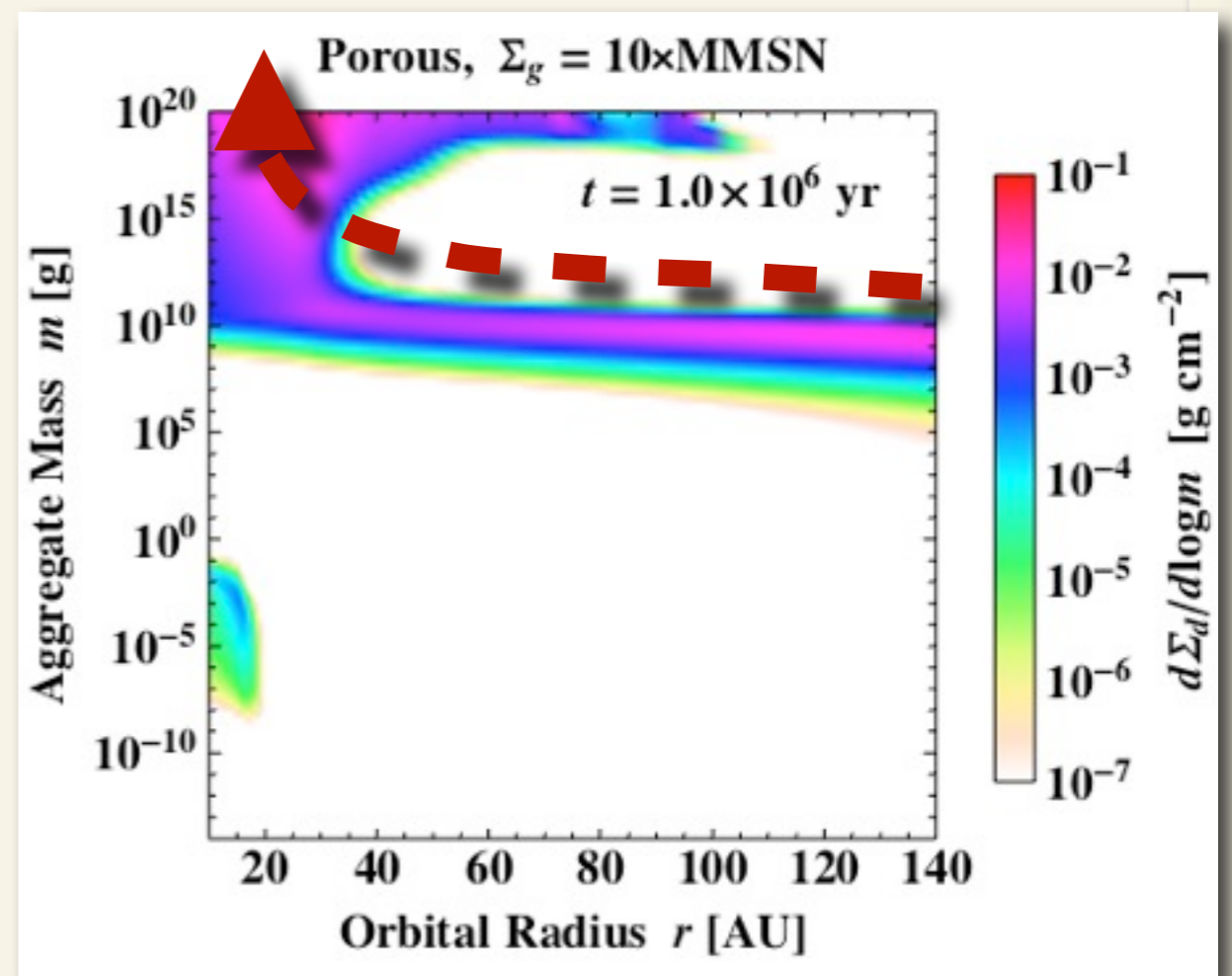
ダストサイズの動径分布

コンパクトモデル



成長しながら落下しつつづける
(いわゆる“radial drift barrier”)

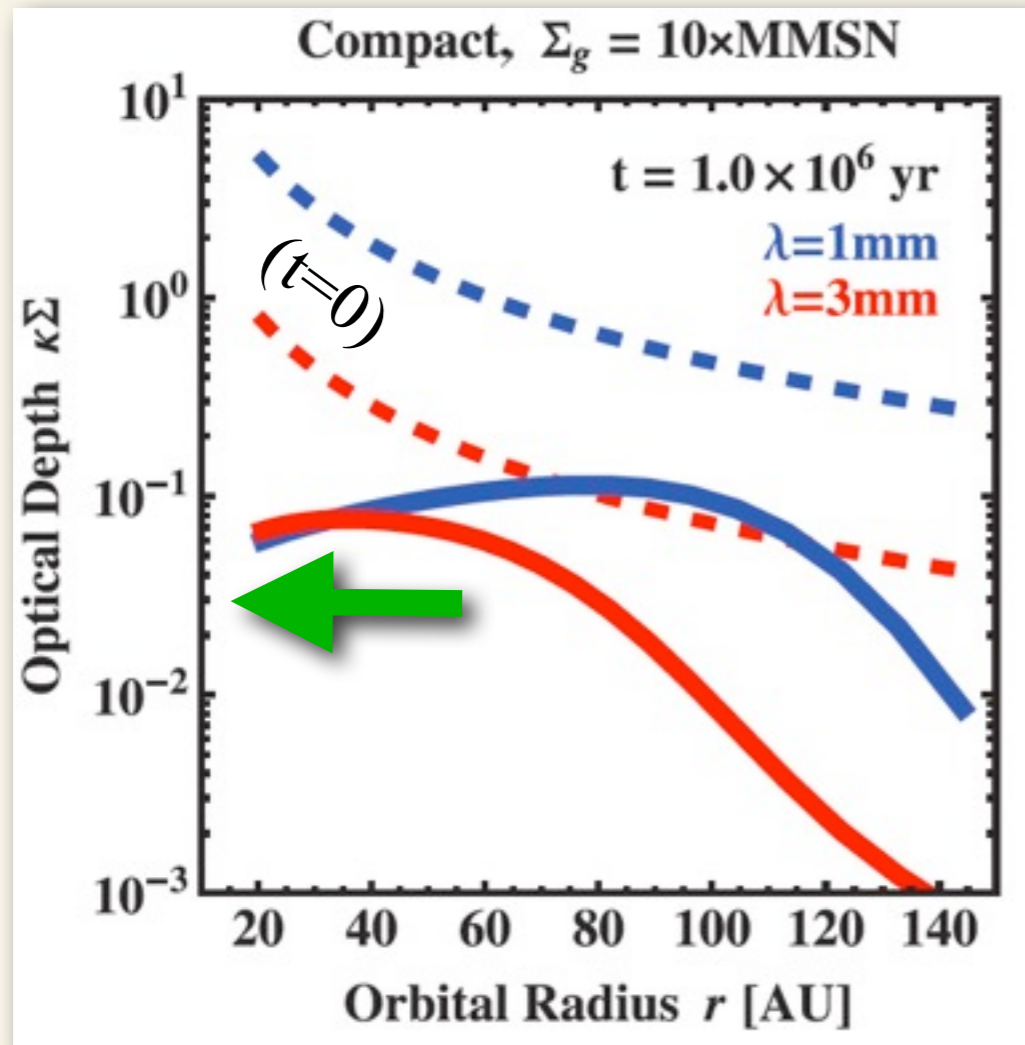
密度進化モデル



円盤内側で落下が止まる

円盤ミリ波光学的厚みの空間分布 @ 1Myr

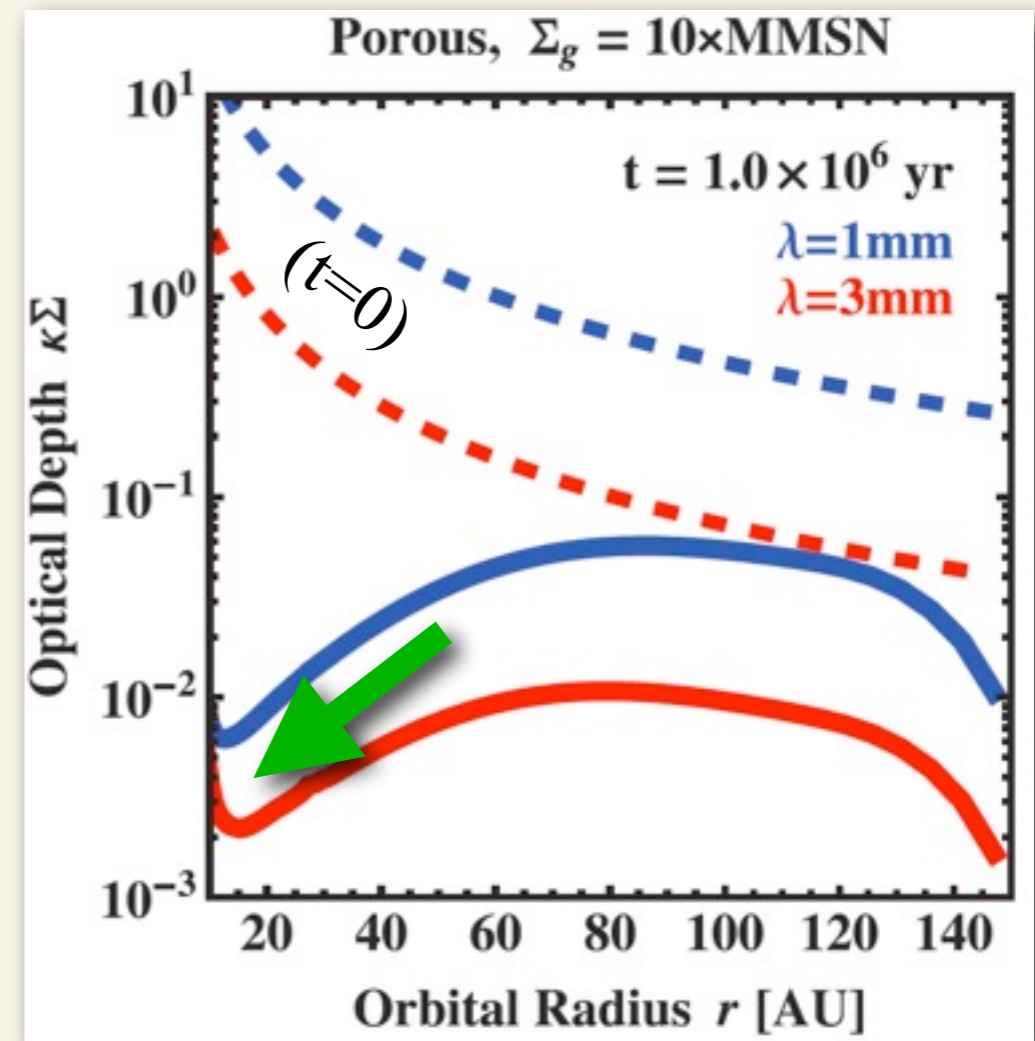
コンパクトモデル



円盤内側で平坦な光学的厚み

← 円盤外縁からのダストの落下を反映

密度進化モデル

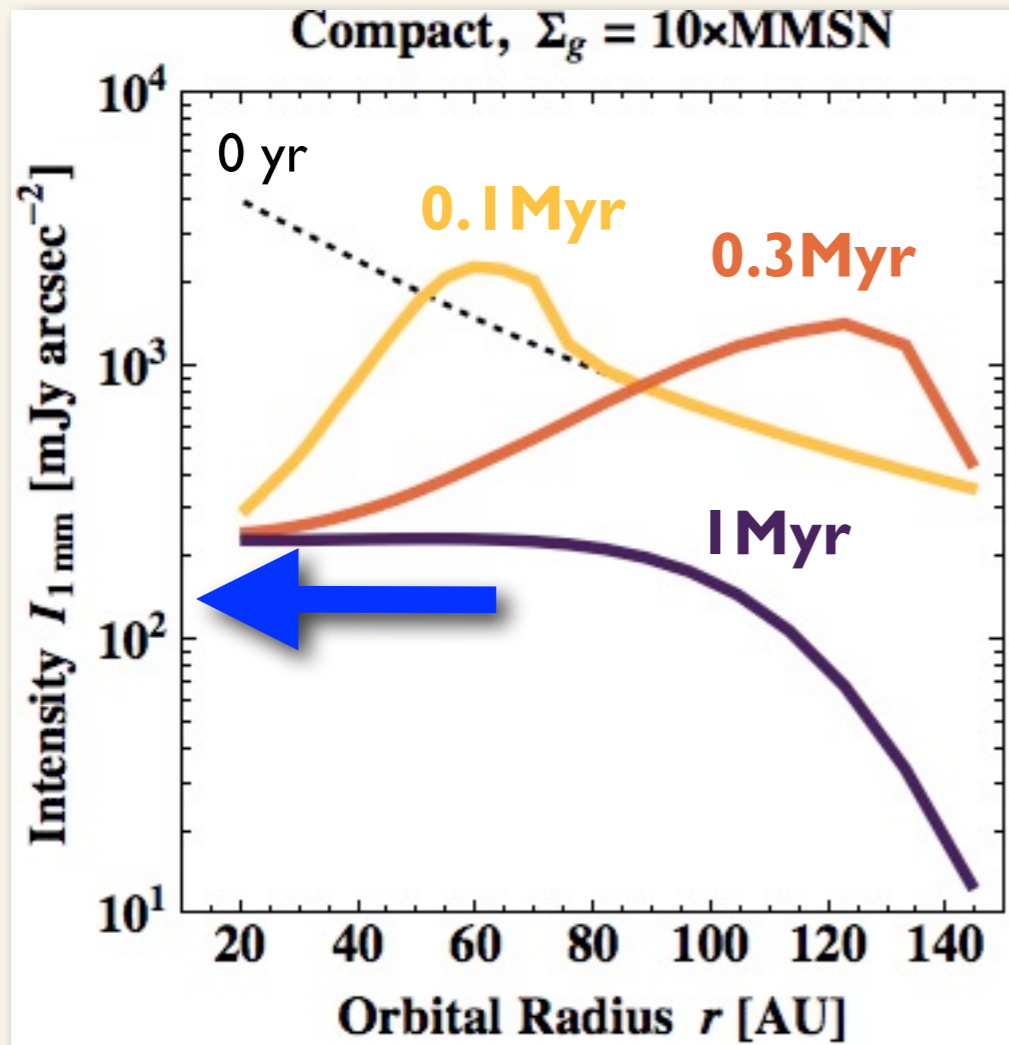


円盤内側で光学的厚みの減少

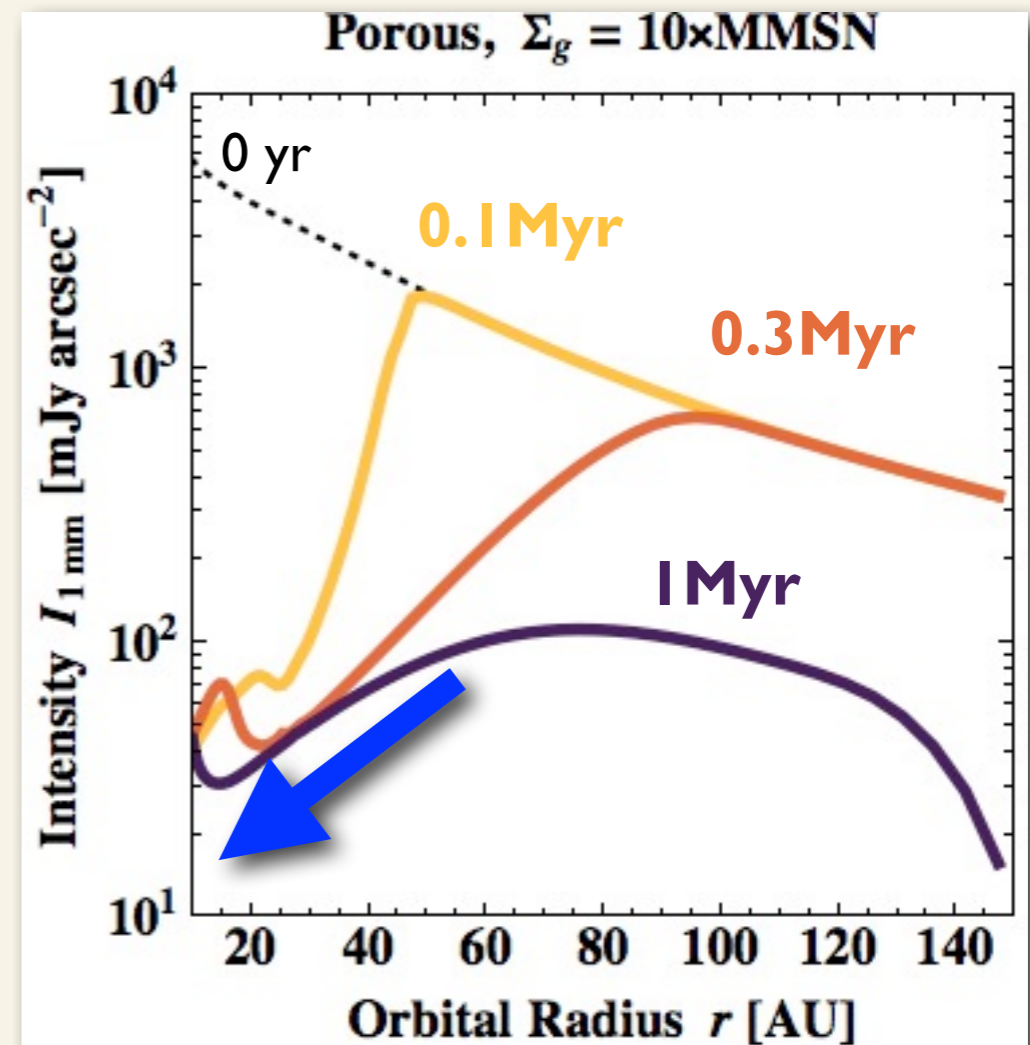
← 内側でのダストの急速な成長を反映

光学的厚みの空間分布: 時間進化

コンパクトモデル



密度進化モデル



円盤内側で平坦なミリ波放射

← 円盤外縁からのダストの落下を反映

円盤内側でミリ波放射の減少

← 内側でのダストの急速な成長を反映

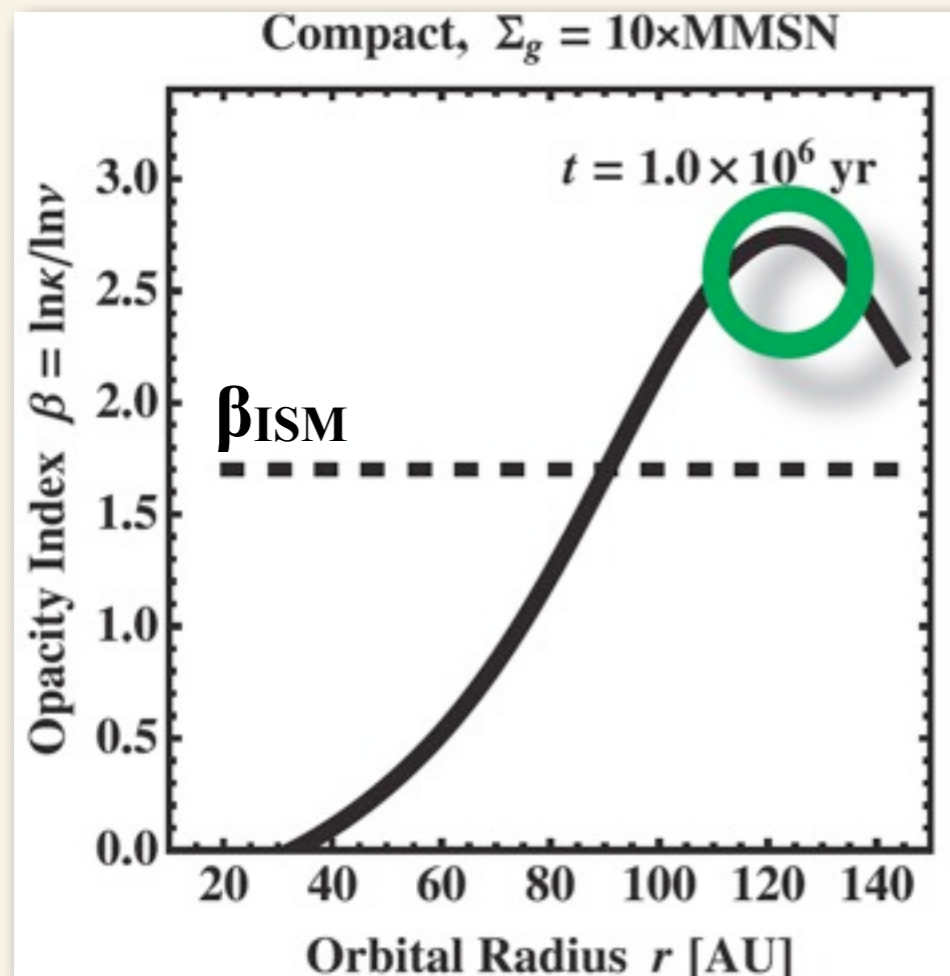
オパシティ指数の空間分布 @ 1 Myr

$\lambda=1-3\text{mm}$ におけるオパシティ指数:

$$\beta_{1-3\text{mm}} = \ln(\kappa_{1\text{mm}}/\kappa_{3\text{mm}})/\ln 3$$

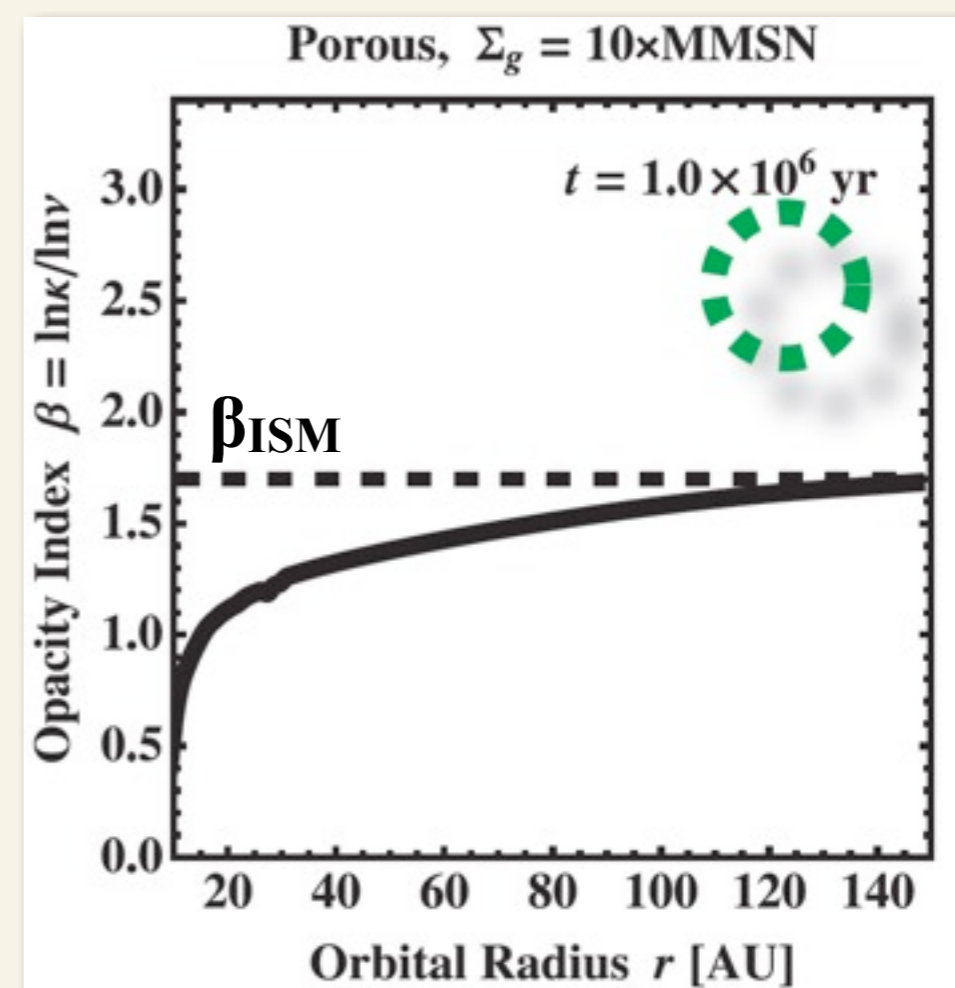
(光学的に薄い円盤 \rightarrow スペクトル指数 α から測定可能: $\beta_{1-3\text{mm}} = \alpha_{1-3\text{mm}} - 2$)

コンパクトモデル



$\beta_{1-3\text{mm}} > \beta_{\text{ISM}}$ のピークの出現

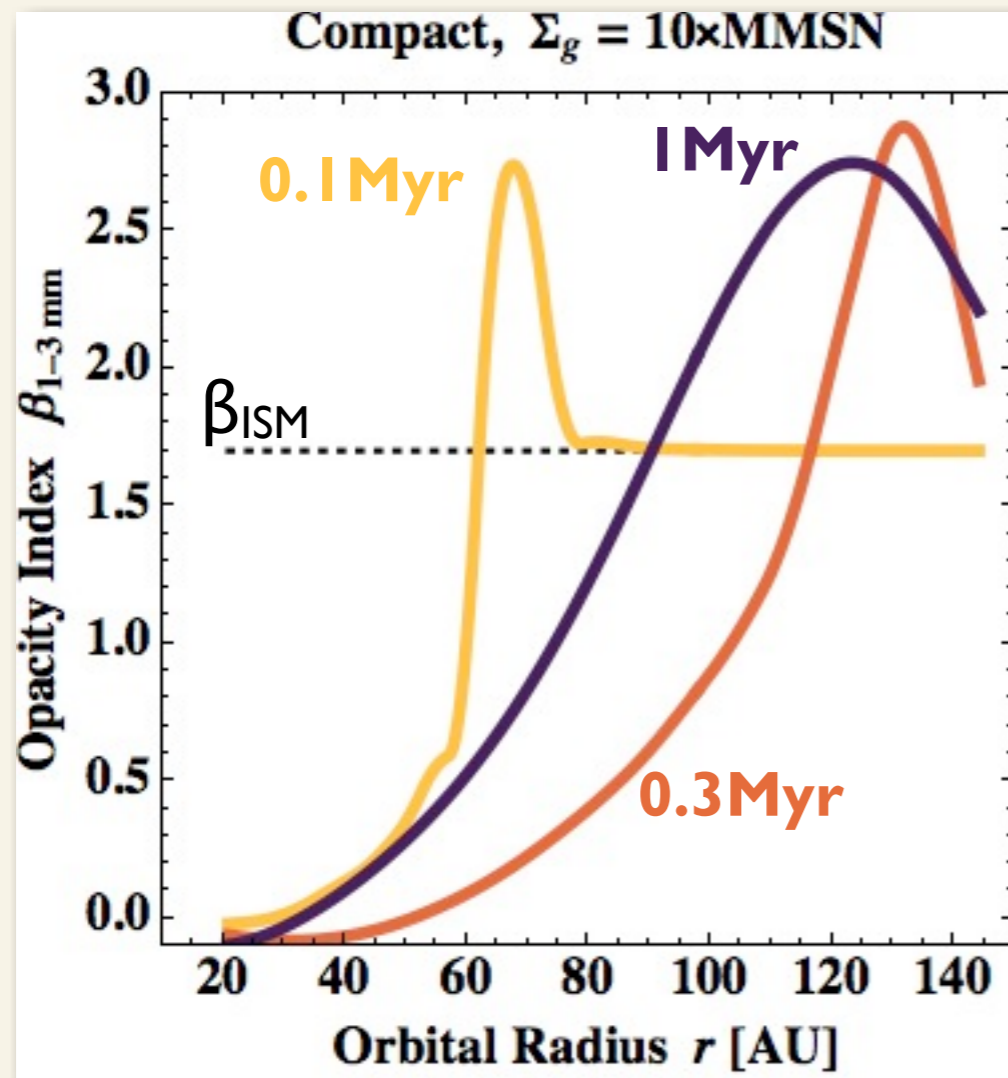
密度進化モデル



ピーク不出現

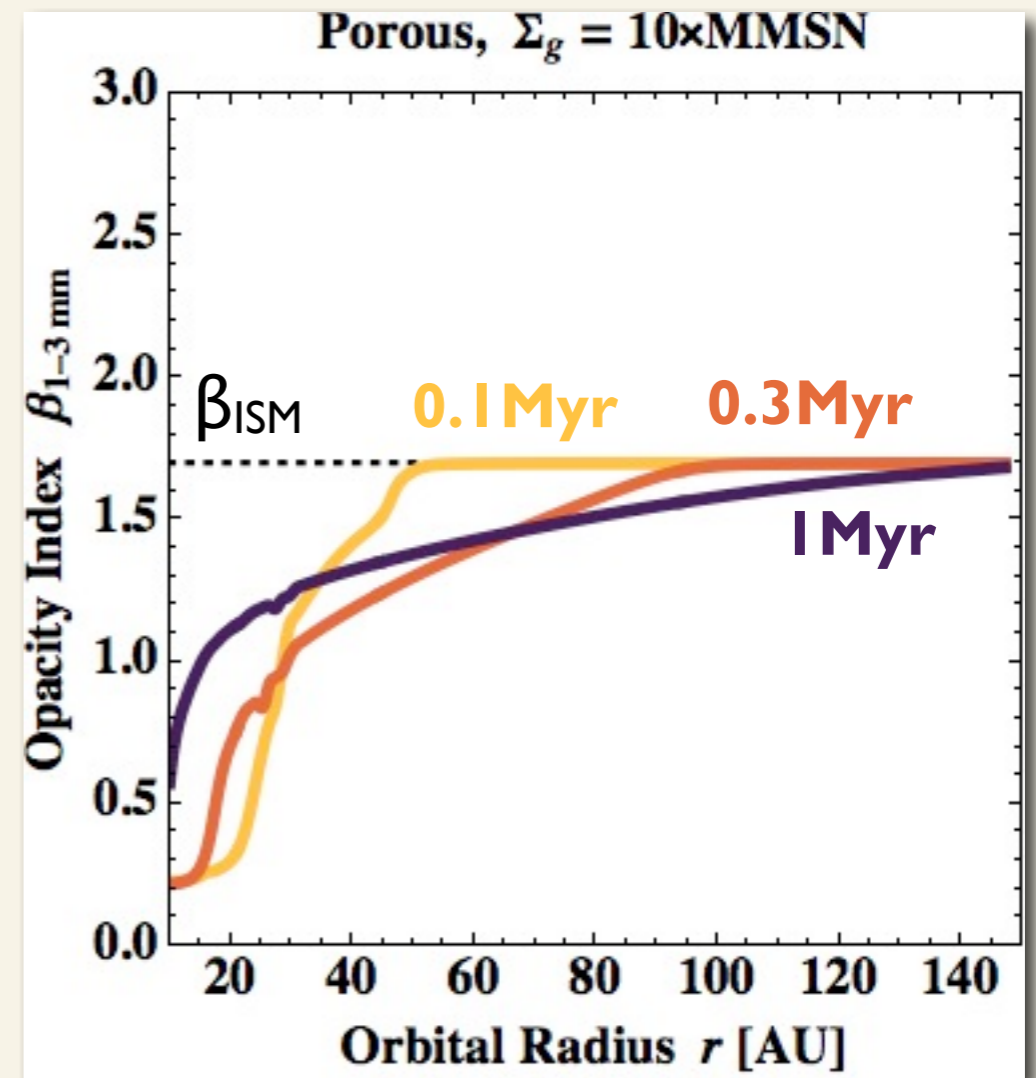
オパシティ指数の空間分布: 時間進化

コンパクト球



$\beta_{1-3\text{mm}} \sim 3$ のピークの出現

高空隙率アグリゲイト



$\beta_{1-3\text{mm}} \sim 3$ のピークなし

β のピークの出現 / 非出現の起源

β のピークは、放射体の**実効屈折率（充填率）**を反映

$$n_{\text{eff}} = \text{Re}(m_{\text{eff}})$$

$n_{\text{eff}} \approx 3$ for 充填率 = 1

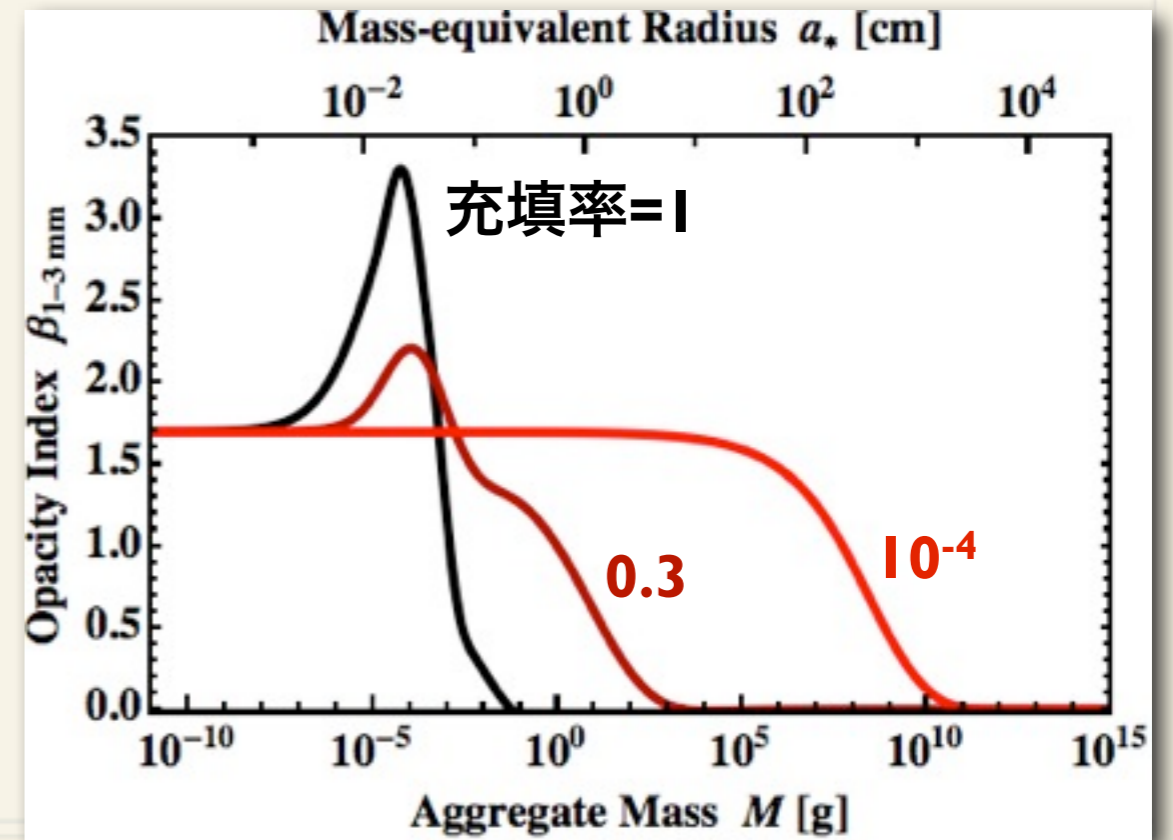
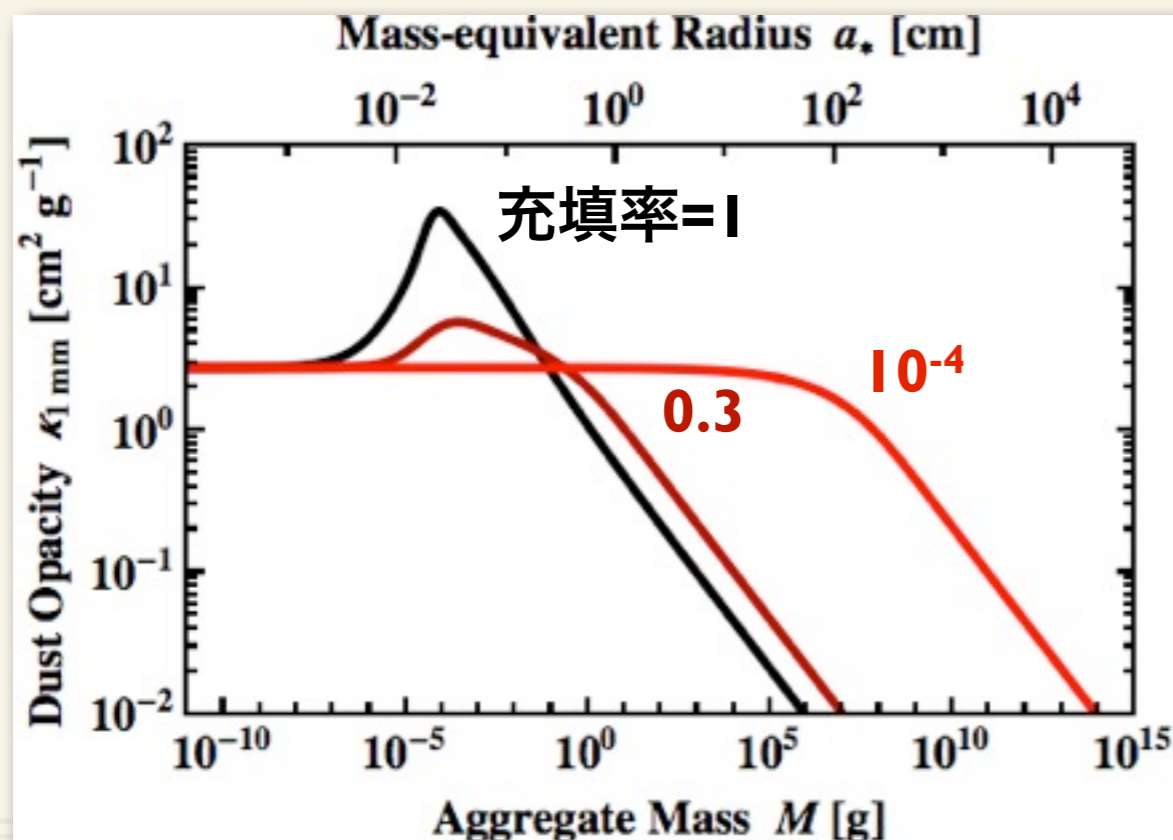
$n_{\text{eff}} \approx 1$ for 充填率 $\ll 1$

高屈折率 \rightarrow $\times \sim 1$ でオパシティが増幅

(see, e.g., Miyake & Nakagawa 1993)

オパシティの増幅 \rightarrow β の増幅

(see, e.g., Ricci et al. 2010a)



ダスト成長で「ミリ波遷移円盤」を説明できるか

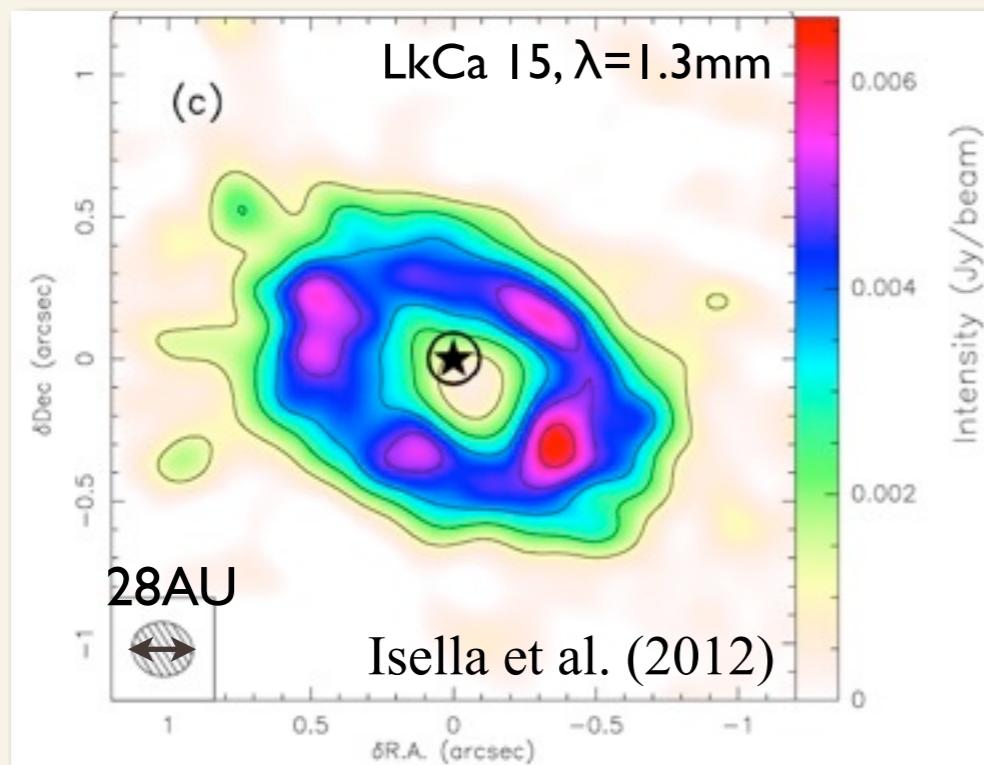
「ダスト成長+低密度化は、円盤内側においてミリ波放射の欠損をもたらす」

→ “ミリ波遷移円盤” の1つの説明？

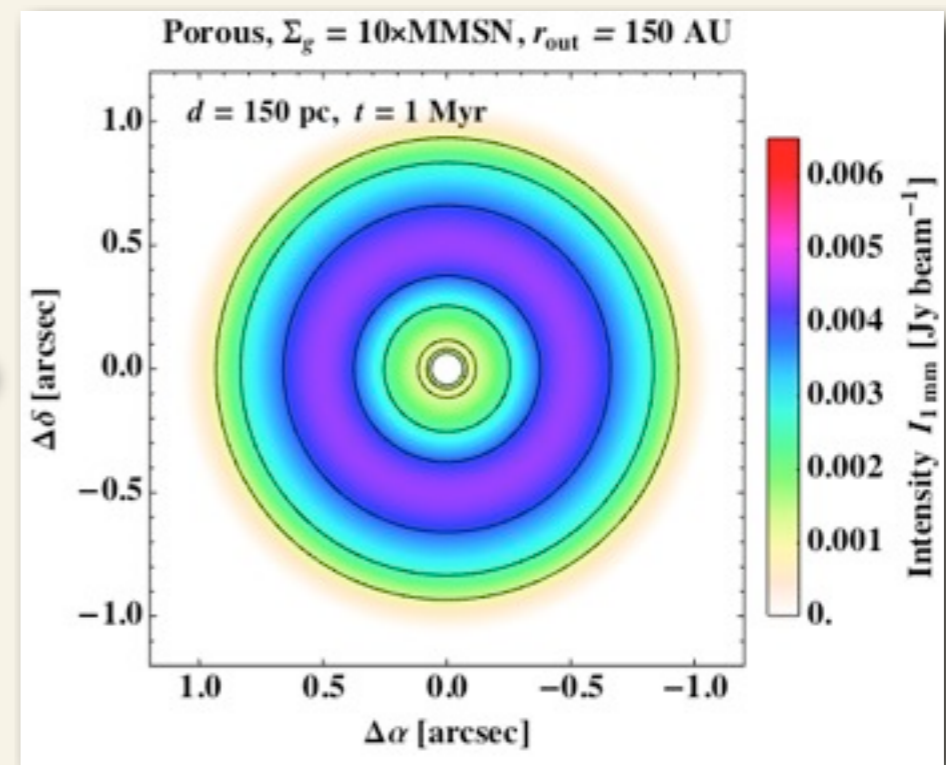
本当であれば、最近の理論的認識を覆す：

- 「ダスト成長だけではミリ波遷移円盤は説明できない」 (Birnstiel et al. 2012b)
- 「円盤ガスの欠損（惑星によるギャップなど）が必要」 (Pinilla et al. 2012b)

ミリ波撮像の例(CARMA)



本研究の理論計算の例



定量的によく類似（だがedgeがわずかに滑らか）
より体系的に比較検討する必要(価値)あり

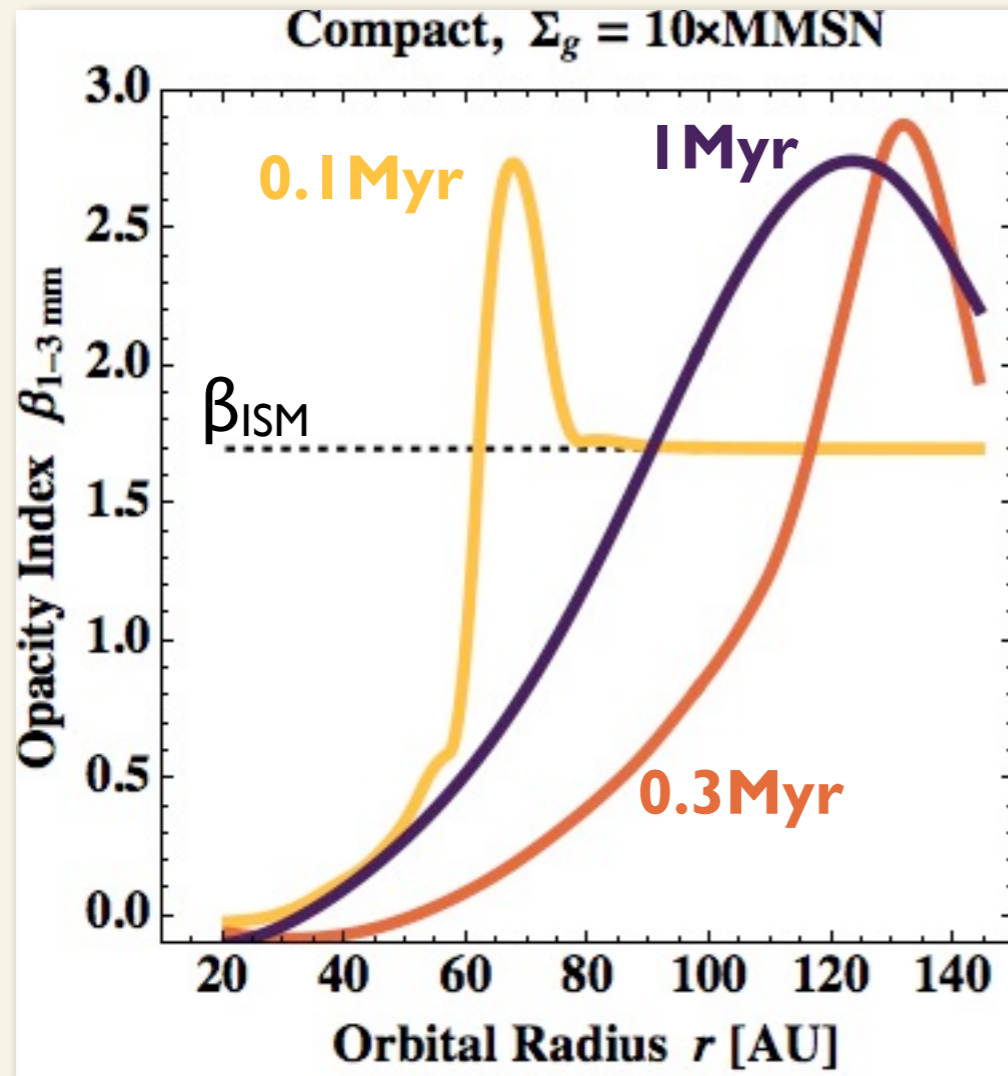
まとめ

- 内部密度進化を考慮したダスト進化計算から、原始惑星円盤のミリ波オパシティの進化の予測を行った。
- 従来の「コンパクトダスト成長」と定性的に異なる振る舞いを発見
 - (1) **円盤内側でのミリ波光学的厚みの減少**
(← 低内部密度ダストの急速成長に由来)
 - (2) **ミリ波オパシティ指数 β のピークの不存在**
(← 低内部密度ダストの低い実効屈折率に由来)
- 今後の発展（観測との関連）
 - (1) → ミリ波遷移円盤との関連が期待
 - (2) → ダスト低密度化説の観測的検証のための重要な指標

オパシティ指数の空間分布

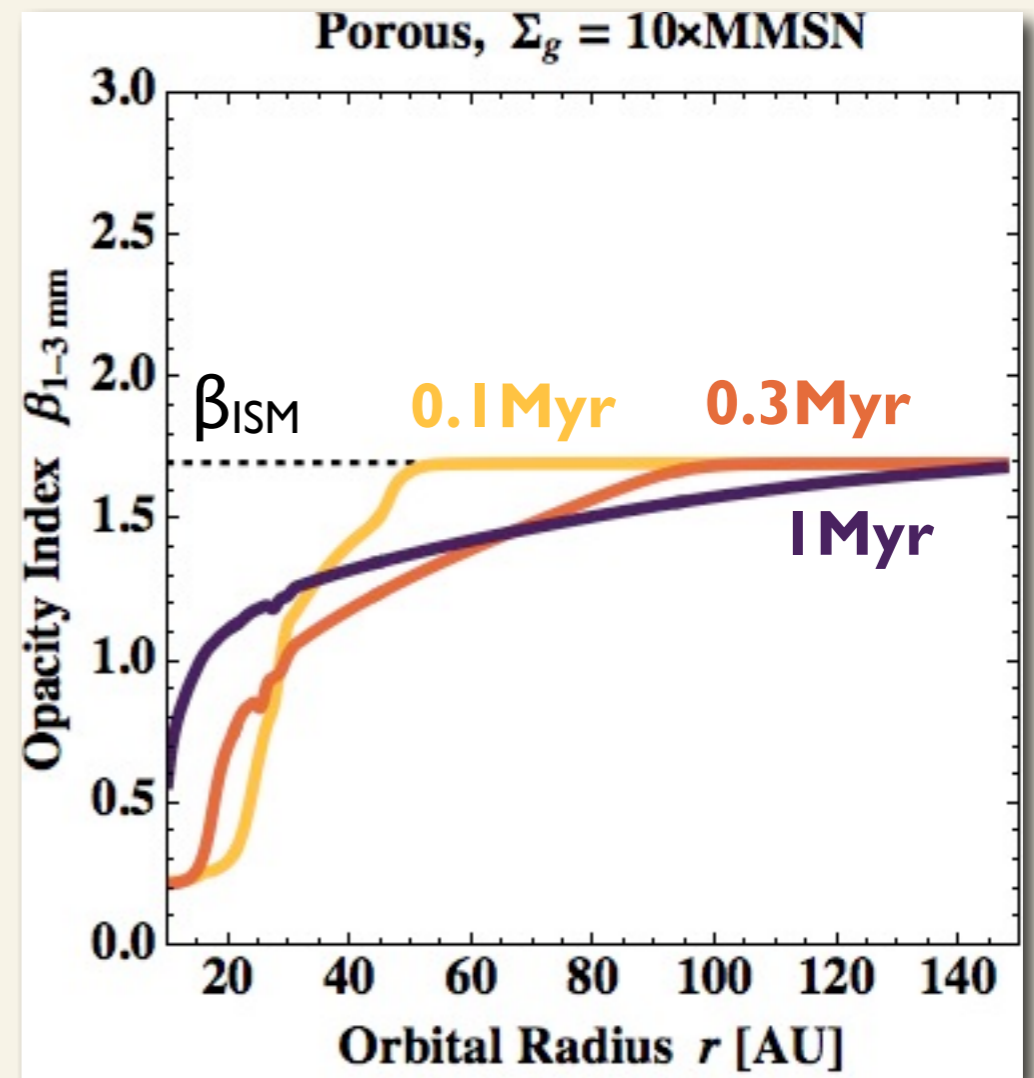
$$\beta_{1-3\text{mm}} = \ln(\kappa_{1\text{mm}}/\kappa_{3\text{mm}})/\ln 3$$

コンパクト球



$\beta_{1-3\text{mm}} \sim 3$ のピークの出現

高空隙率アグリゲイト



$\beta_{1-3\text{mm}} \sim 3$ のピークなし