

ミリ波・サブミリ波で検証する 原始惑星系円盤TW HyaとHD 163296のダスト分布モデル

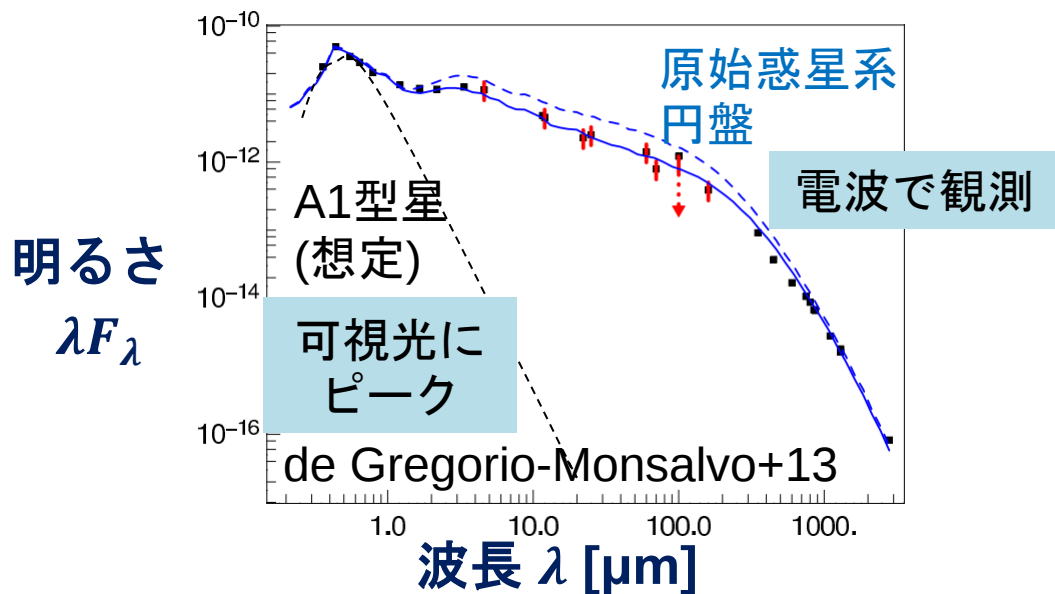
宇宙物理学研究室 千葉めぐみ

発表の概要

- ・ 研究背景・目的（原始惑星系円盤、電波観測）
- ・ 計算方法（輻射輸送方程式、円盤モデル）
- ・ 結果（3波長での輝度分布、観測との比較）
- ・ 考察（分布を決める条件）
- ・ まとめ

研究背景・目的

A1型星 HD 163296の見え方

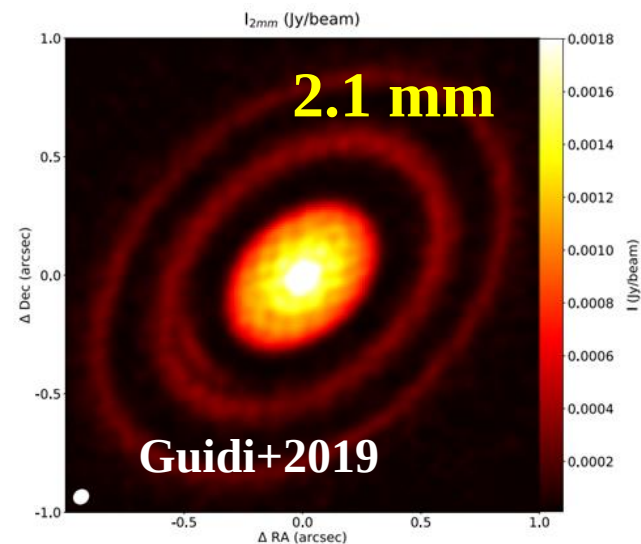
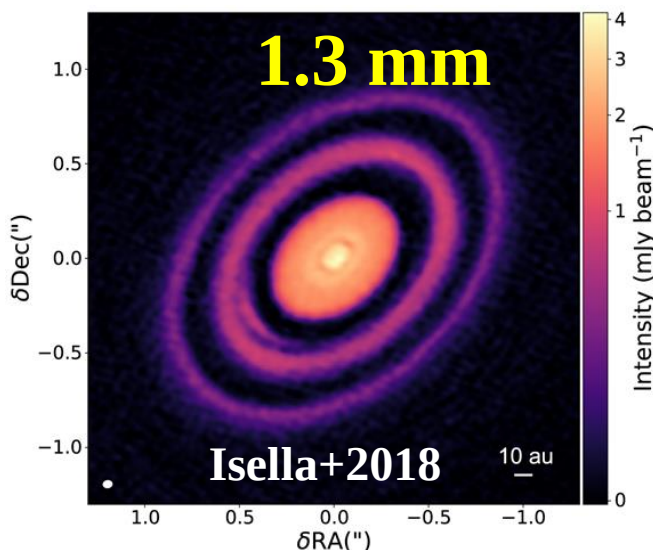
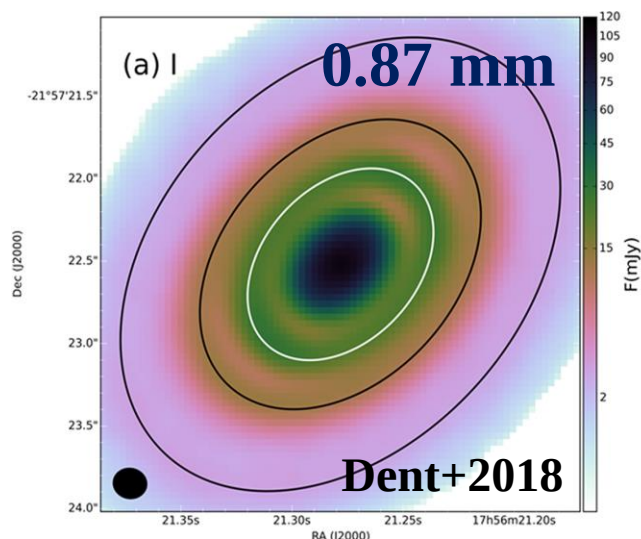


ミリ波・サブミリ波

アルマ望遠鏡で観測



ALMA



最高放射強度 $I_{\nu, \text{max}}$

3.0 Jy/as²

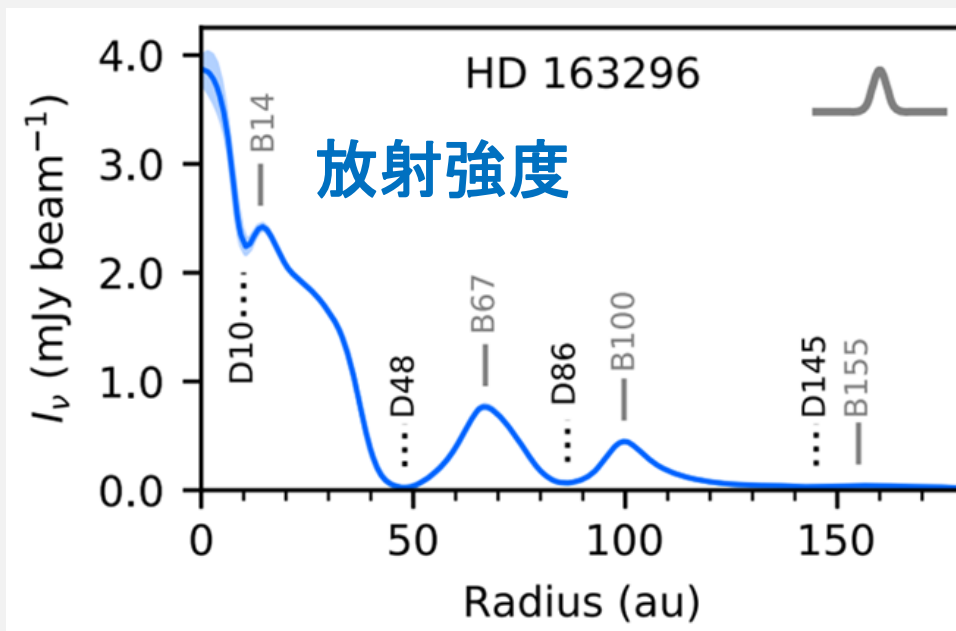
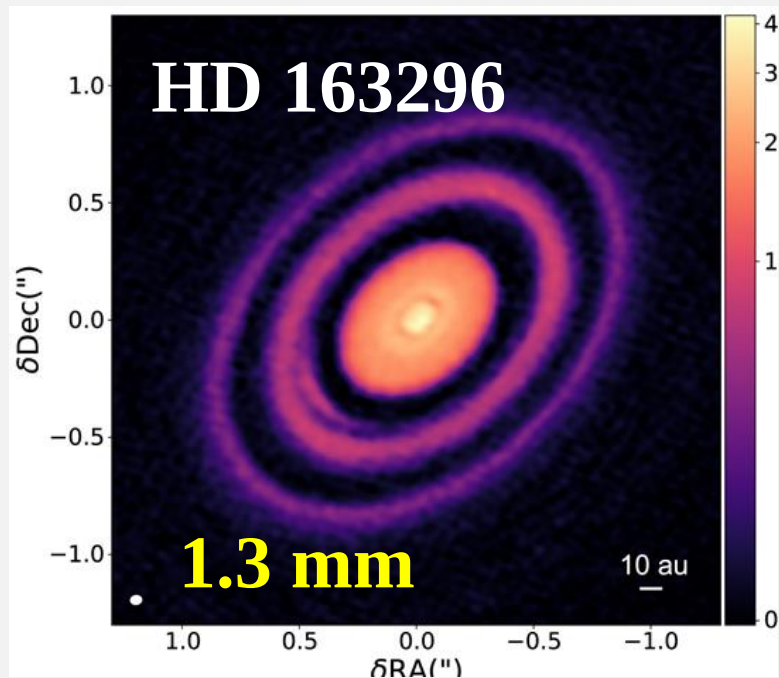
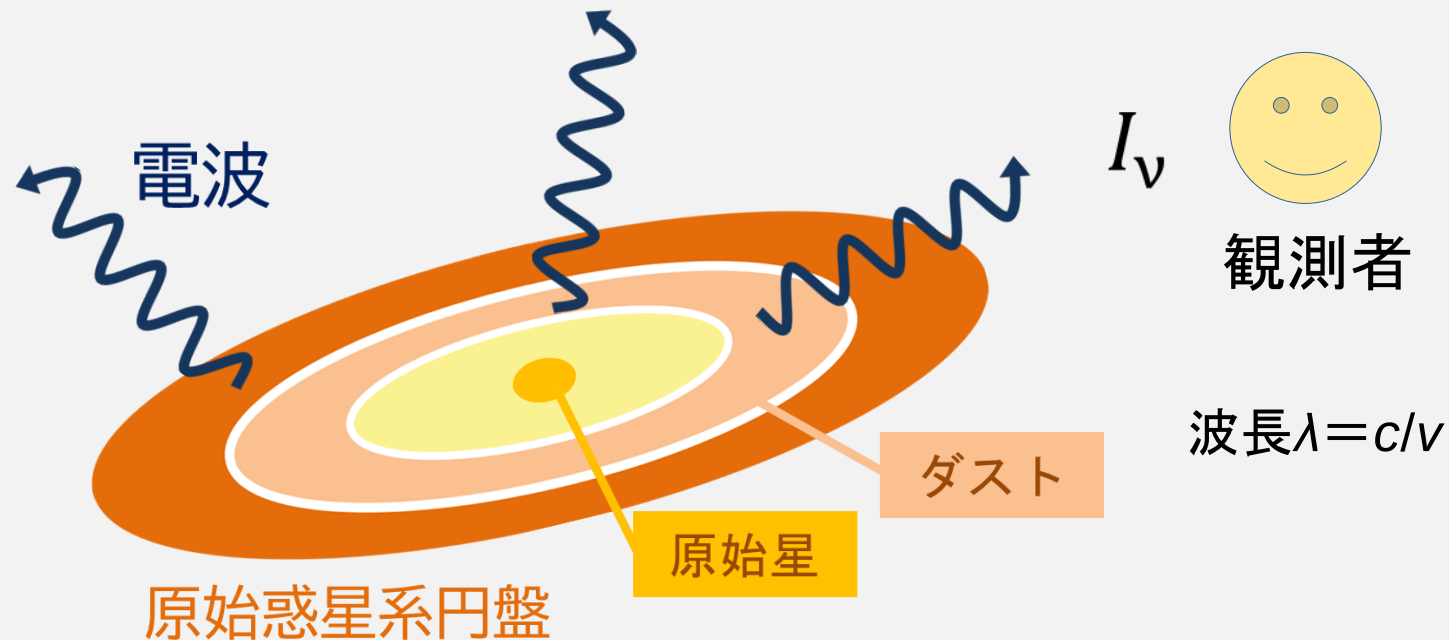
2.2 Jy/as²

0.4 Jy/as²

研究背景・目的

原始惑星系円盤

- ・ 若い恒星(原始星)の周りを回転する円盤状のガスや塵(ダスト)
- ・ 惑星の母体

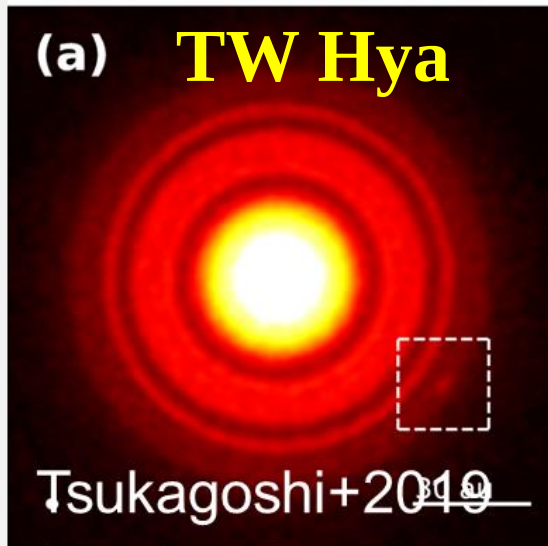
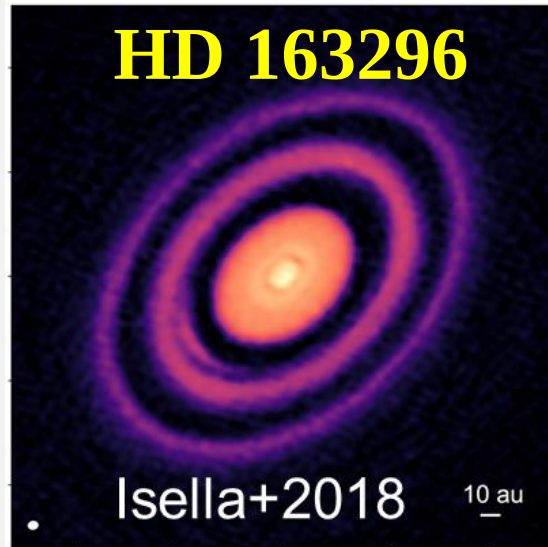


軸対称なリング構造

放射強度(I_ν)
→ 密度、温度分布

研究背景・目的

波長 1.3 mm



1波長でのダスト分布モデルが研究されている

- ・1波長で再現できるモデルは
他の波長の放射強度も再現可能か？
・ダスト分布を決める条件は？

2天体を3波長で検証

天体：TW Hya, HD 163296

波長：2.1 mm, 1.3 mm, 0.87 mm

計算方法

輻射輸送理論

観測される量(放射強度):

$$I_\nu [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}]$$

輻射輸送方程式

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\kappa_\nu \rho (I_\nu - B_\nu(T))$$

未知数

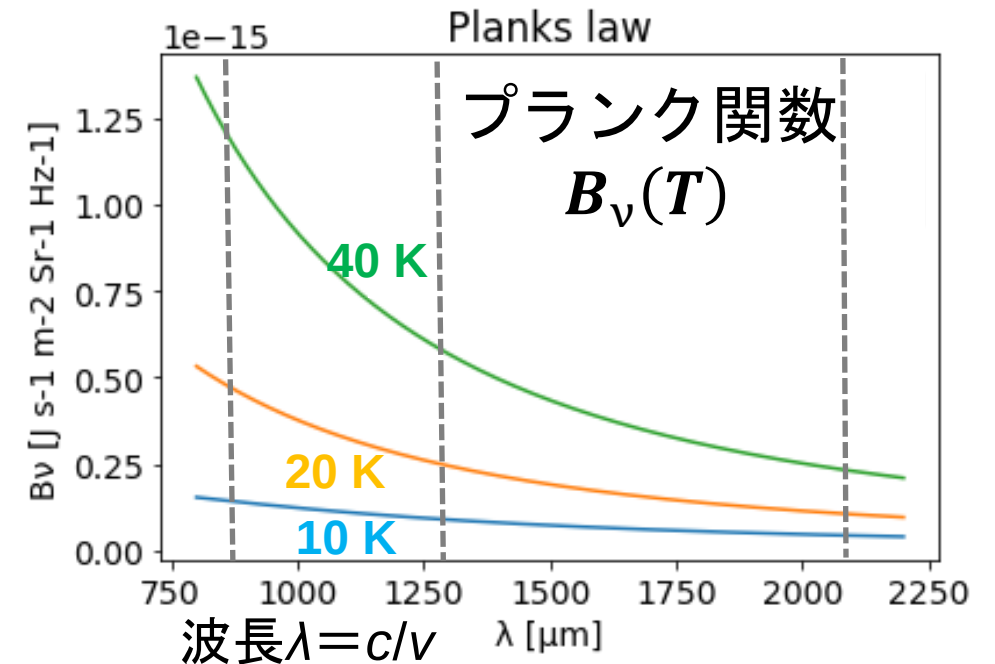
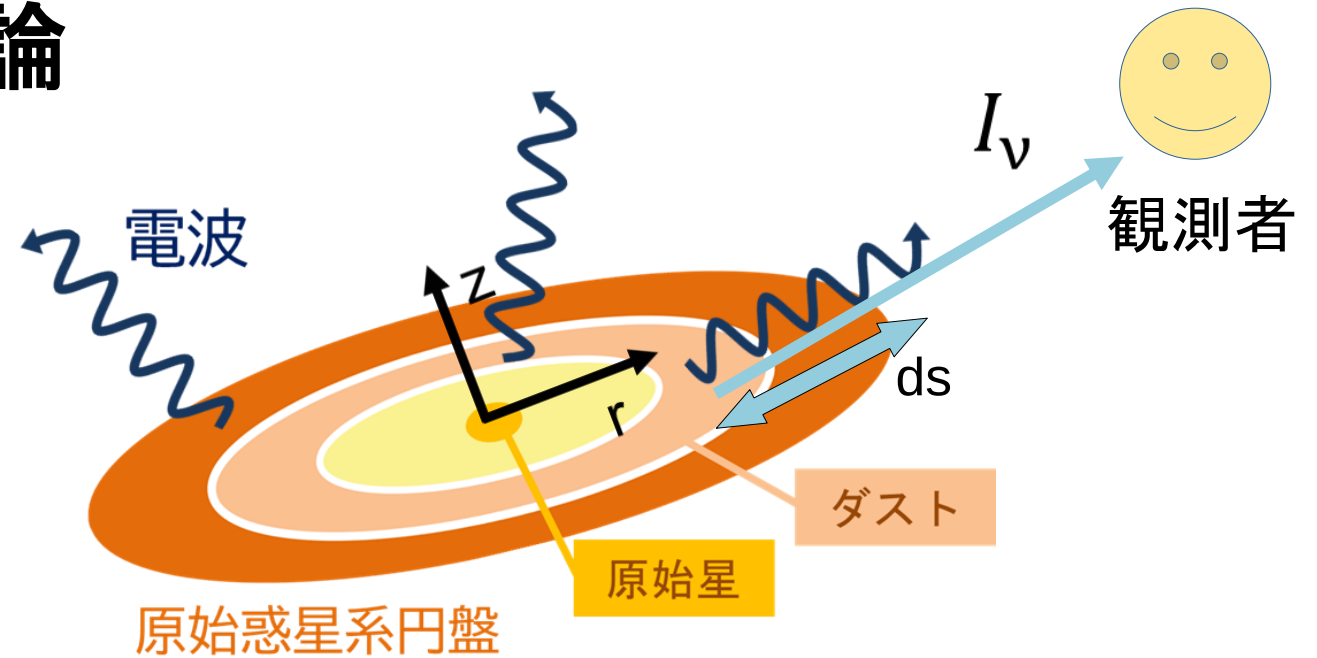
温度 $T(r, \phi, z)$

密度 $\rho(r, \phi, z)$

オパシテイ κ_ν

温度一様(散乱なし)の場合、解は

$$I_\nu = I_0 e^{-\int \kappa_\nu \rho ds} + B_\nu(T) \left\{ 1 - e^{-\int \kappa_\nu \rho ds} \right\}$$



計算方法

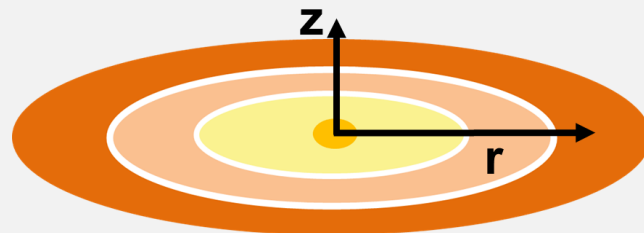
モデル名	温度 T	密度 ρ	オパシテイ κ_v
Kataoka(C)	r	r,z	carbon amorphous
Kataoka(Si)			astronomical silicates
Isella	r,z	r,z	
Gregorio (de Gregorio- Monsalvo)		r,z	

RADMC-3D

C.P. Dullemond 2020

Pythonで輻射輸送計算を行うためのソフト

図を表示



国立天文台の片岡章雅さんのホームページを参考に



密度・温度モデル
オパシティデータ
中心星の情報
望遠鏡のビームサイズ
など

計算方法

温度分布

Kataokaモデル

片岡さん、Tsukagoshi+2016より

$$T_{\text{dust}} = T_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{p_T}$$

Isellaモデル

Isella+2016より

Gregorioモデルも共通の温度を使用

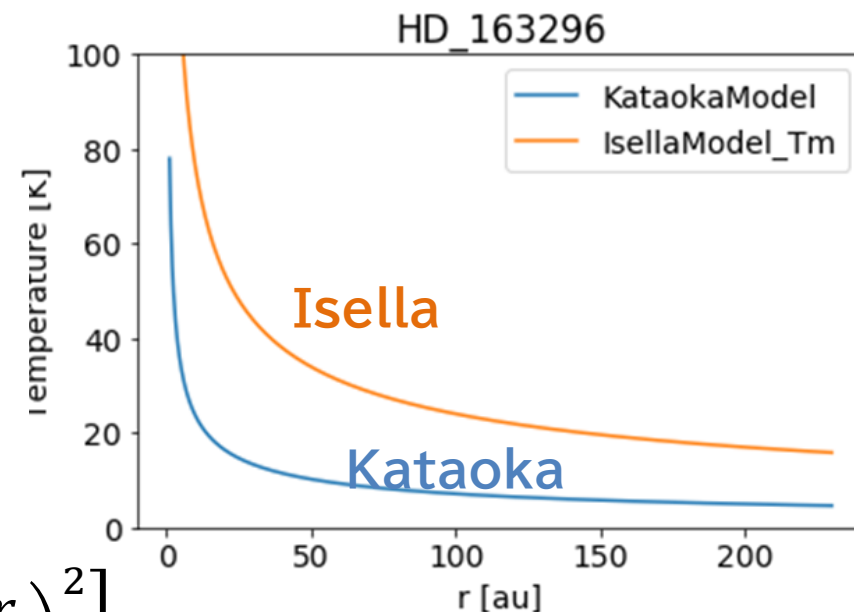
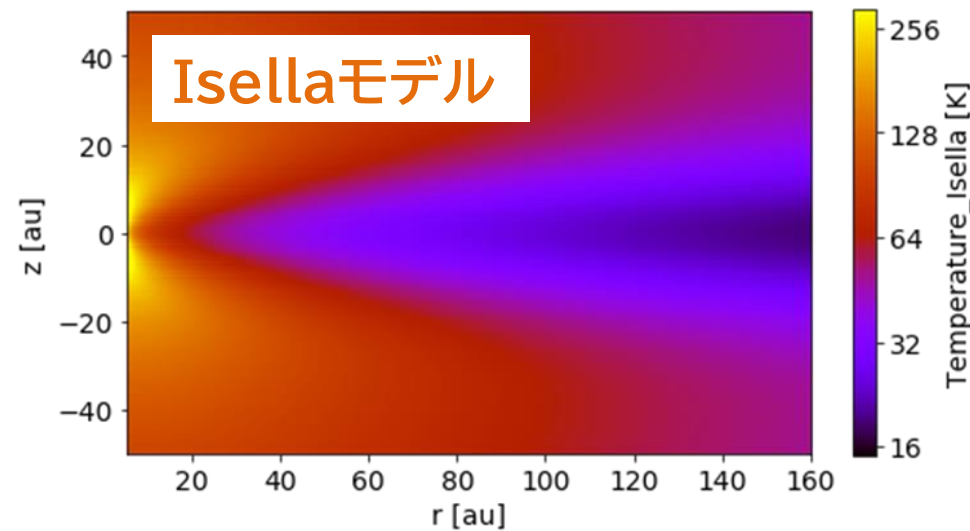
$$T_{\text{dust}}(r, z) = \begin{cases} T_a(r, z) + [T_m(r) - T_a(r, z)] \cos\left(\frac{\pi z}{2z_q(r)}\right)^{2d(r)} \\ T_a(r, z) \end{cases}$$

$$T_m(r) = T_{m,0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-q_m}$$

$$T_a(r, z) = T_{a,0} \left(\frac{\sqrt{R^2 + z^2}}{r_0} \right)^{-q_a}$$

$$z_q(r) = z_{q,1} \left(\frac{r}{r_1} \right)^{q_z} \exp \left[- \left(\frac{r}{r_2} \right)^2 \right]$$

$$d(r) = d_0(r - r_0) + C$$



計算方法

密度分布

$$\text{面密度分布}(\mathbf{r}) = \Sigma_{\text{dust}}(\mathbf{r}) + \sum_i \Sigma_{\mathbf{r},i}(\mathbf{r})$$

滑らかな分布 + ギャップやリング

滑らかな分布
(Gregorioモデルの例)

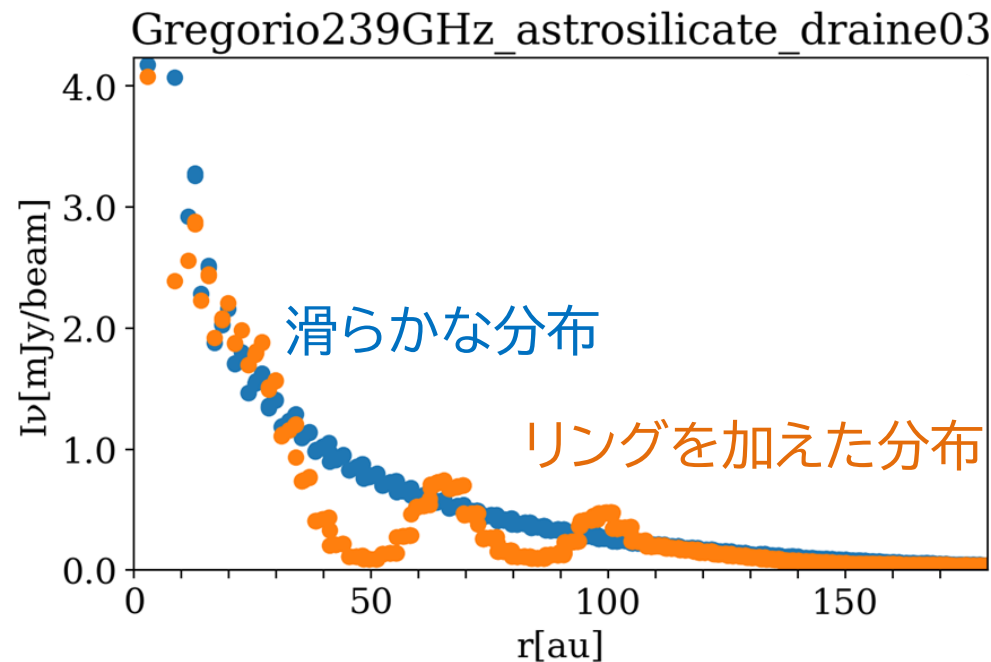
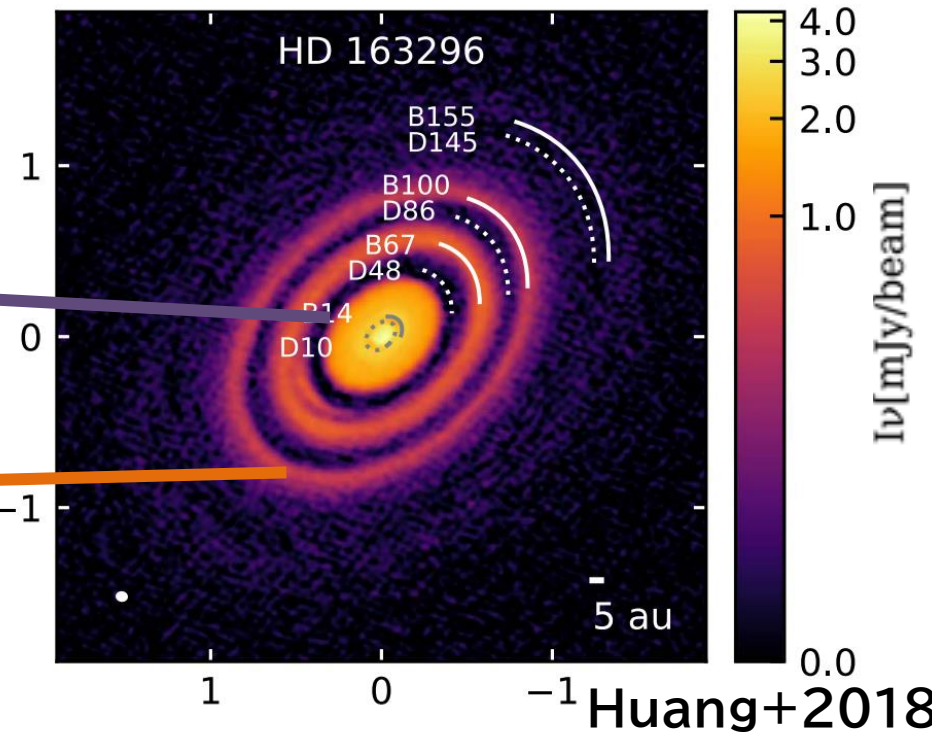
$$\Sigma_{\text{dust}}(\mathbf{r}) = \Sigma_c \left(\frac{r}{r_c} \right)^{-\gamma} \exp \left[- \left(\frac{r}{r_c} \right)^{2-\gamma} \right]$$

中心半径 r_{ci} 、幅 w_i のリング

$$\Sigma_{\mathbf{r},i}(\mathbf{r}) = \Sigma_{ci} \exp \left(- \frac{(r - r_{ci})^2}{2w_i^2} \right)$$

ギャップ

リング

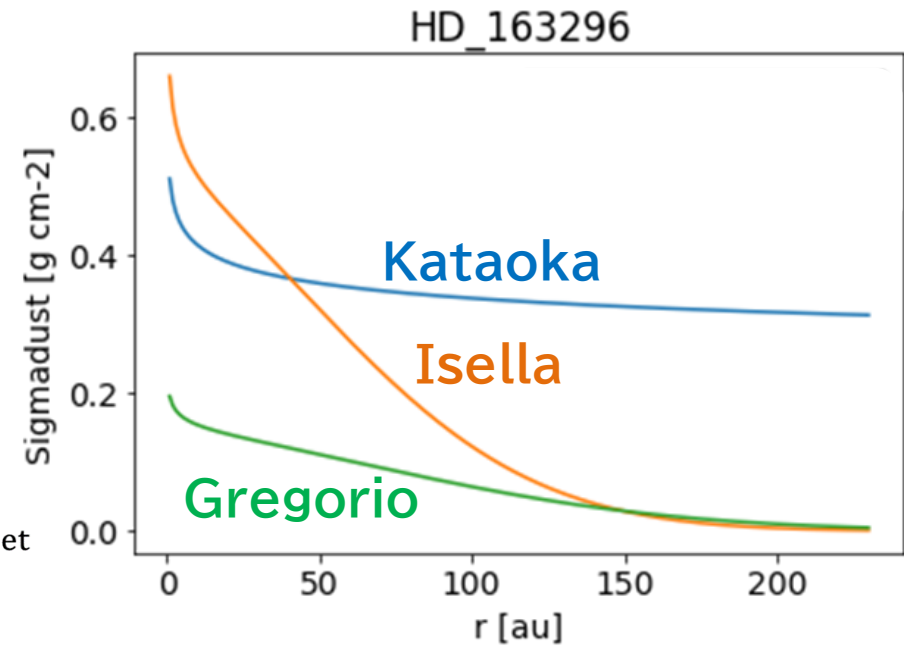


計算方法 密度分布

Kataokaモデル Dullemond & Dominik, 2005

面密度 $\Sigma_{\text{dust}}(r) = \Sigma_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-p_\Sigma}$

空間密度 $\rho_{\text{dust}} = \frac{\Sigma_{\text{dust}}(r)}{\sqrt{2\pi}h} \exp \left[-\frac{z^2}{2h^2} \right]$ $h = \sqrt{\frac{k_B T_{\text{dust}}}{m_H \cdot 2.34}} / \sqrt{\frac{G m_{\text{star}}}{r^3}} / f_{\text{set}}$
※hはスケールハイト



Isellaモデル Isella+2016より

面密度 $\Sigma_{\text{dust}}(r) = \Sigma_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha} \exp \left[-\left(\frac{r}{r_0} \right)^{2-\alpha} \right]$

空間密度はKataokaモデルと同じ形

Gregorioモデル Gregorio+2013、Andrews+2009、Lynden-Bell & Pringle 1974より

面密度はIsellaモデルと同じ形 ただし、 $\Sigma_0 = (2 - \gamma) \frac{M_d}{2\pi R_0^2}$

空間密度 $\rho_{\text{dust}}(r, \theta) = \frac{\Sigma_{\text{dust}}(r)}{\sqrt{2\pi}rh} \exp \left[-\frac{(\pi/2 - \theta)^2}{2h^2} \right]$ $h = h_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^\psi$

計算方法

オパシティ (不透明度) κ_v とは

- ・ダストの**成分と大きさ**によって異なる

- ・単位 [cm^2/g]
- ・周波数に依存する
- ・実際のダストの成分や大きさは明確に分かっていない

使用したオパシティ

無定形炭素 carbon amorphous

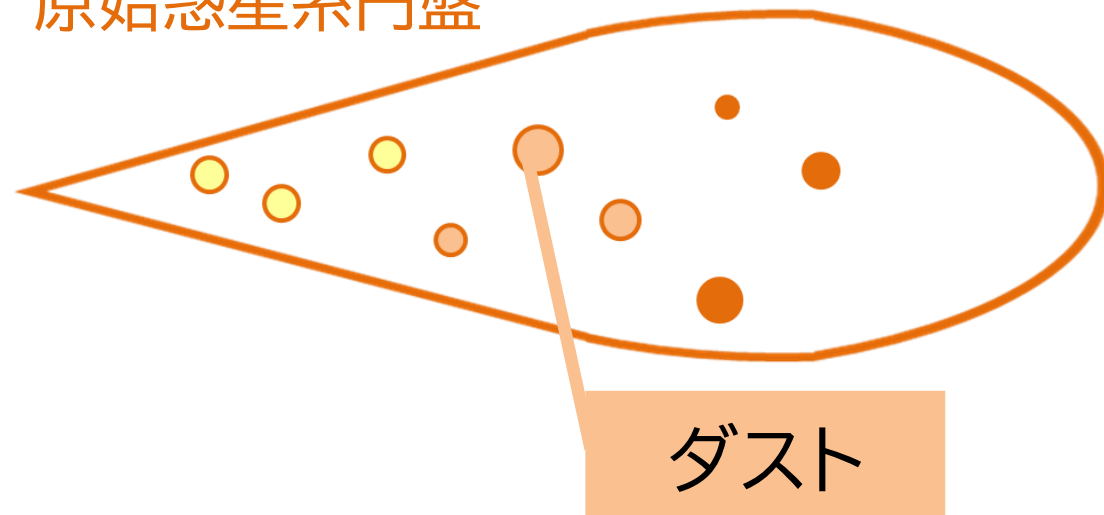
Preibisch+1993

半径1 mm の astronomical silicates

Draine +2003

Gregorio+2013にてHD 163296のモデルに使用

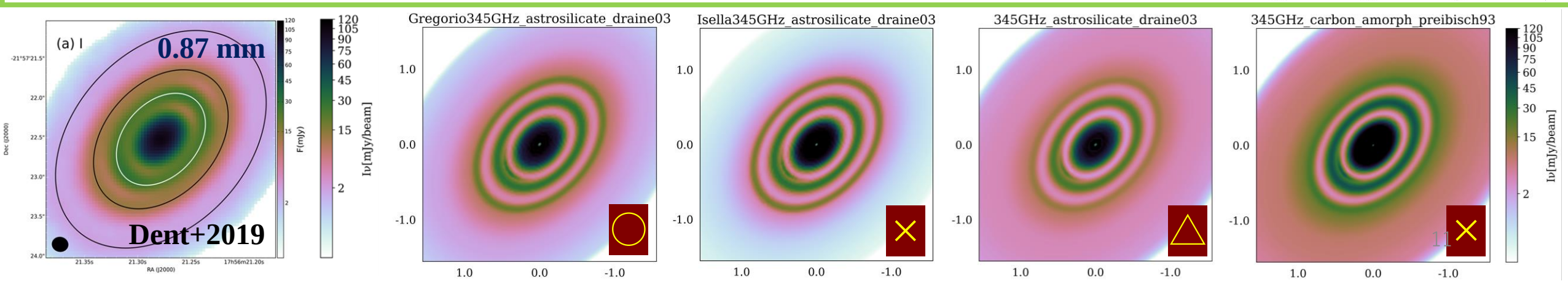
原始惑星系円盤



ダスト

Si, C などからなる
固体微粒子
最大半径
 $0.1 \mu\text{m} \sim \text{数 mm}$

Kataokaモデル(C)

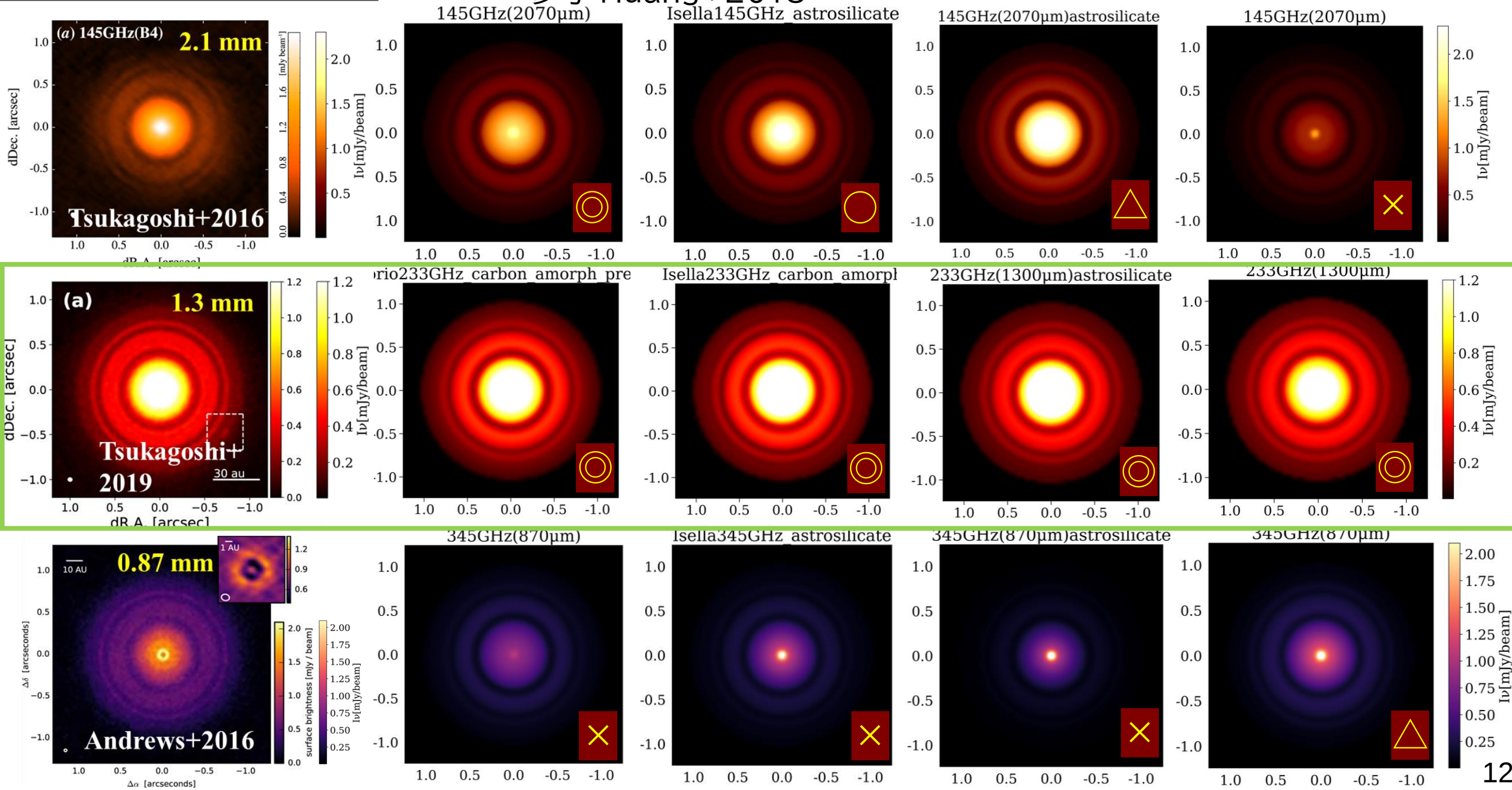


結果 TW Hya

Gregorio似モデル Isella似モデル

参考:Huang+2018

Kataokaモデル(Si) Kataokaモデル(C)



考察

円盤は不透明？

光学的厚み(透明度合いを決める量) τ_ν は、
円盤が薄いとき

$$\tau_\nu = \int \kappa_\nu \rho(r, z) ds \approx \kappa_\nu \Sigma(r) / \cos \theta_{\text{incl}}$$

波長 $\lambda = c / \nu$ $\kappa_{2.1 \text{ mm}} < \kappa_{1.3 \text{ mm}} < \kappa_{0.87 \text{ mm}}$

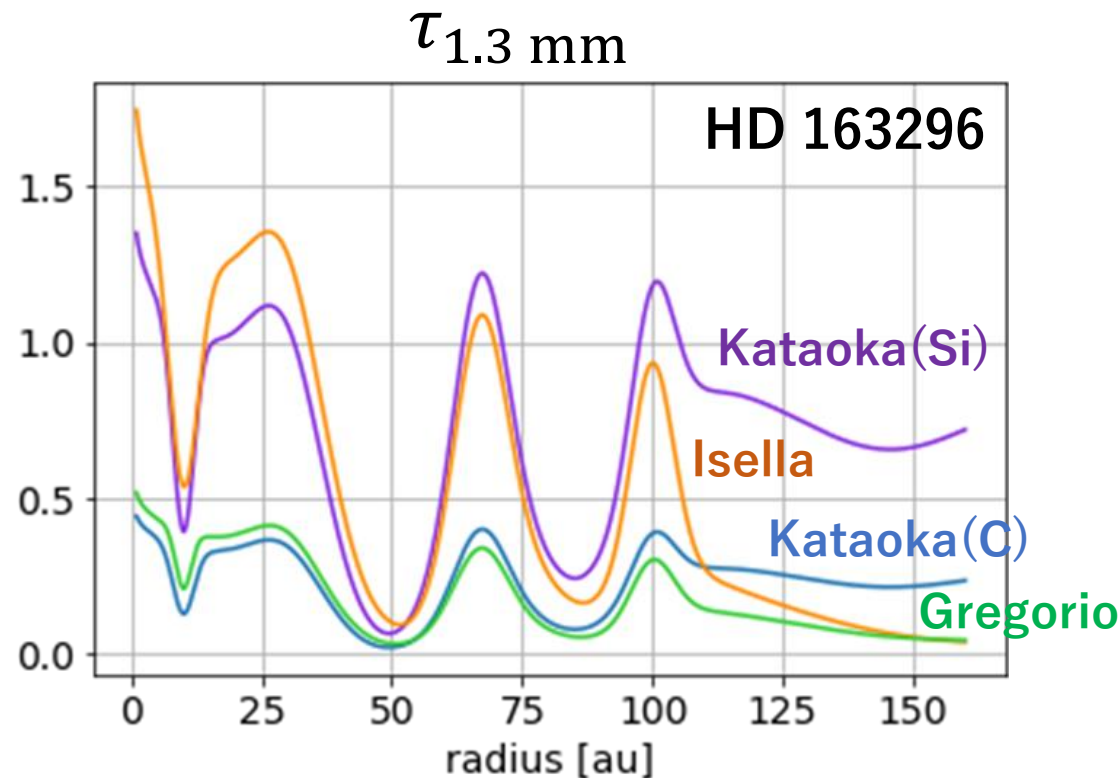
輻射輸送方程式の解は $\tau_\nu < 1$ のとき

$$\begin{aligned} I_\nu(r) &= B_\nu(T(r)) \{1 - e^{-\tau_\nu}\} \approx B_\nu(T(r)) \tau_\nu \\ &\approx B_\nu(T(r)) \kappa_\nu \Sigma(r) \end{aligned}$$

$h\nu/kT \ll 1$ のとき

$$B_\nu(T(r)) \propto \frac{1}{e^{h\nu/kT(r)} - 1} \approx \frac{kT(r)}{h\nu} \propto T(r)$$

$$I_\nu(r) \propto T(r) \cdot \Sigma(r) \cdot \kappa_\nu$$



再現可能であった
Gregorioモデルは
これらを満たす

条件

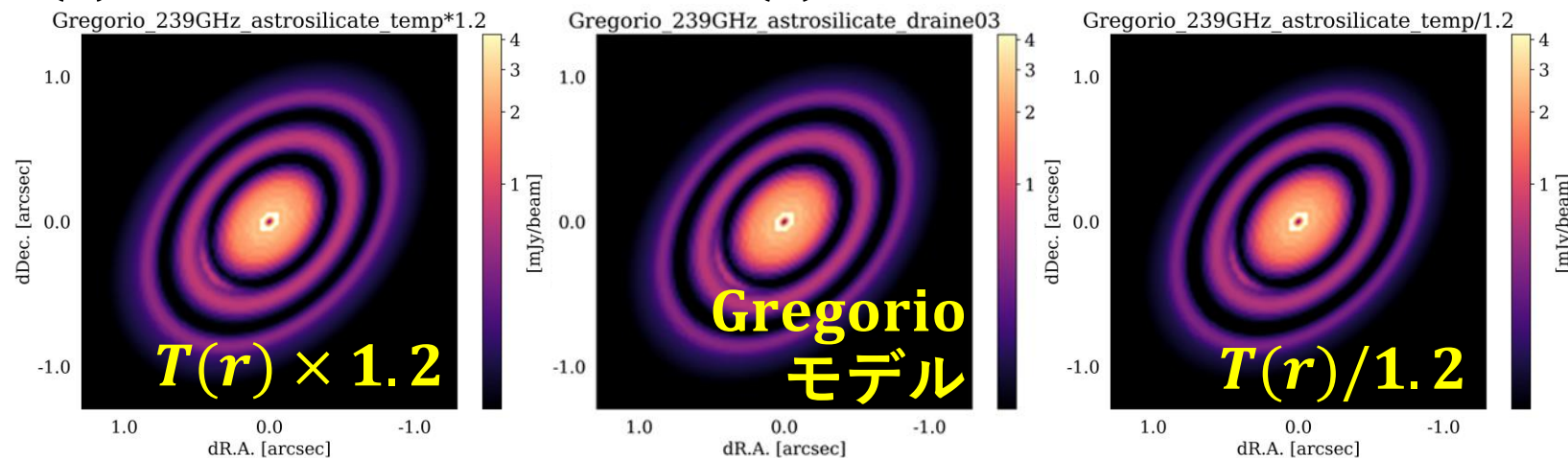
- ・円盤が薄い
- ・光学的に薄い ($\tau_\nu < 1$)
- ・十分温度が高い
($h\nu/kT \ll 1$)
 $T > 10 \sim 20 \text{ K}$

考察

$$I_\nu(r) \approx B_\nu(T(r))\kappa_\nu\Sigma(r) \propto T(r)\Sigma(r)\kappa_\nu$$

半径依存性: $T(r) \cdot \Sigma(r)$

$T(r) \cdot \Sigma(r)$ の値は変えずに $T(r)$ と $\Sigma(r)$ を変化



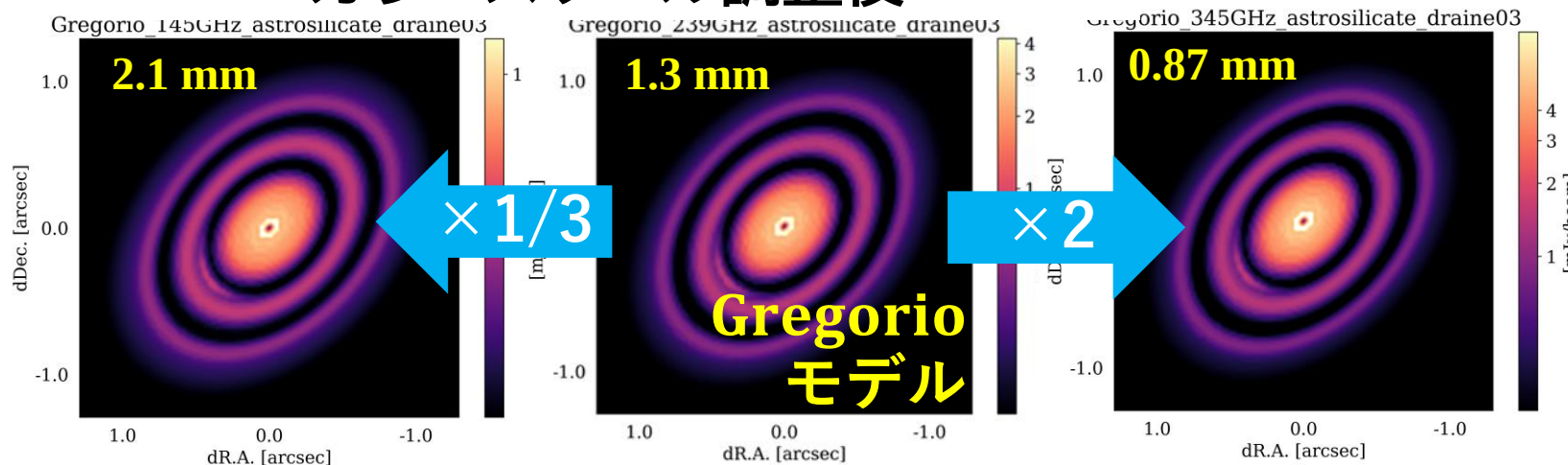
条件

- ・光学的に薄い ($\tau_\nu < 1$)
- ・十分温度が高い ($h\nu/kT \ll 1$)

$T(r)$ と $\Sigma(r)$ は
それぞれ一意に決まらず
縮退している

波長依存性(振動数): $B_\nu(T(r)) \cdot \kappa_\nu$

カラスケール調整後



相対輝度分布は波長に依
らない



オパシティの比が決まる

$$\kappa_{2.1 \text{ mm}} : \kappa_{1.3 \text{ mm}} : \kappa_{0.87 \text{ mm}} \\ = 0.8 : 1 : 1.1$$

まとめ

波長1.3 mmで原始惑星系円盤を再現するモデルは、
0.87 mmと2.1 mmで再現可能か？
再現可能な場合、どのようなダスト分布か？

4モデルの中では**Gregorioモデル**が再現可能

- ・光学的に薄い条件で、 $T(r) \cdot \Sigma(r)$ が一定

条件を満たす範囲で自由度がある

- ・オパシティの比 $\kappa_{2.1 \text{ mm}} : \kappa_{1.3 \text{ mm}} : \kappa_{0.87 \text{ mm}}$

HD 163296で 0.8 : 1 : 1.1

比は求められるが、物質の種類は決定できない
半径依存性の考慮が必要な可能性がある