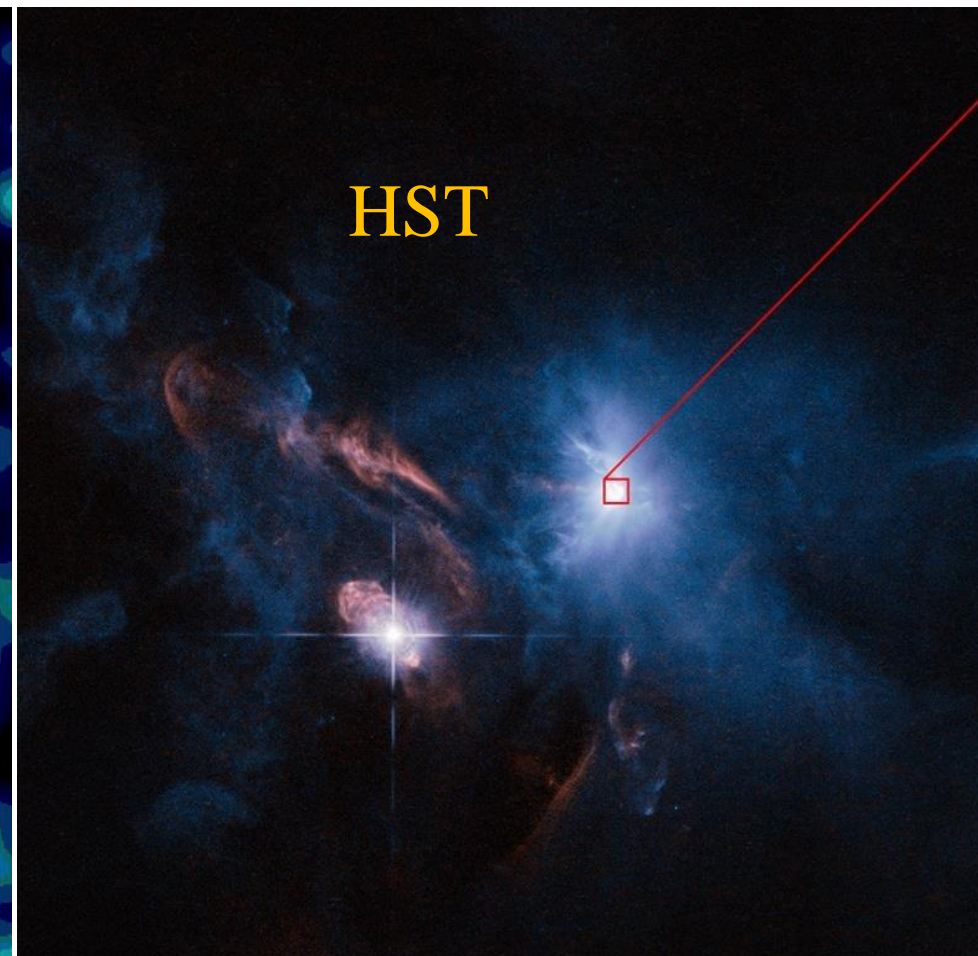
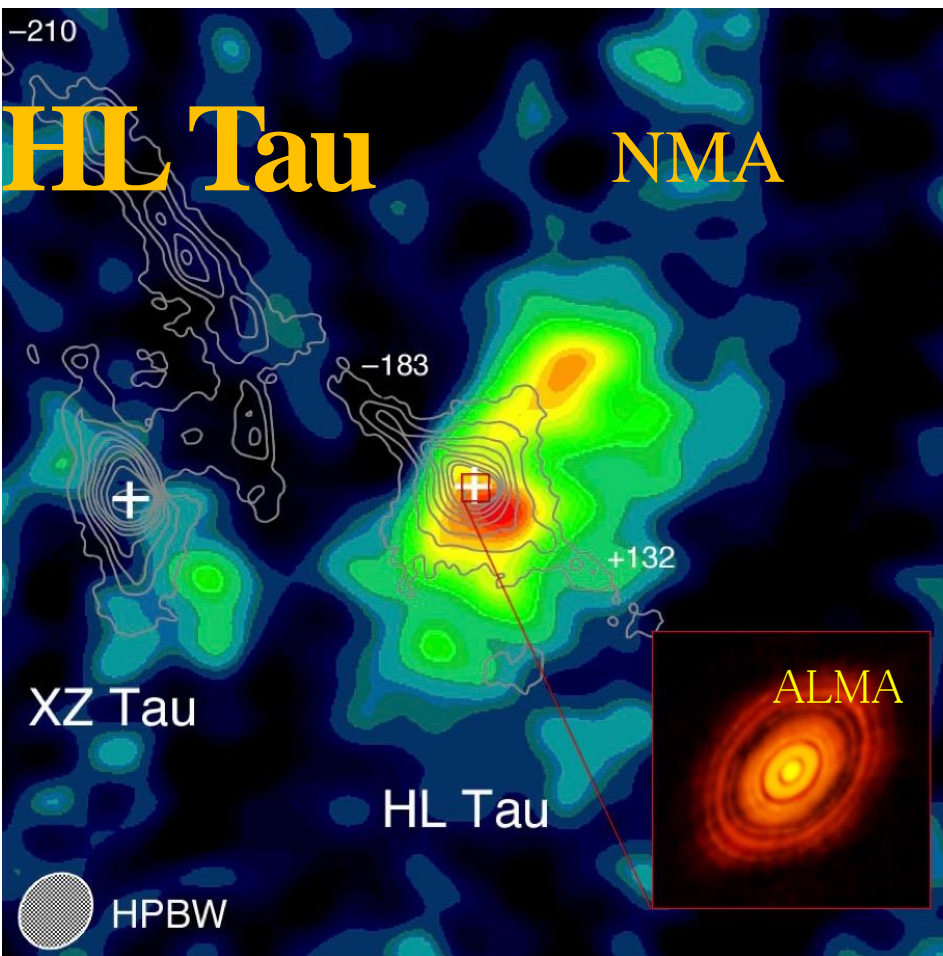


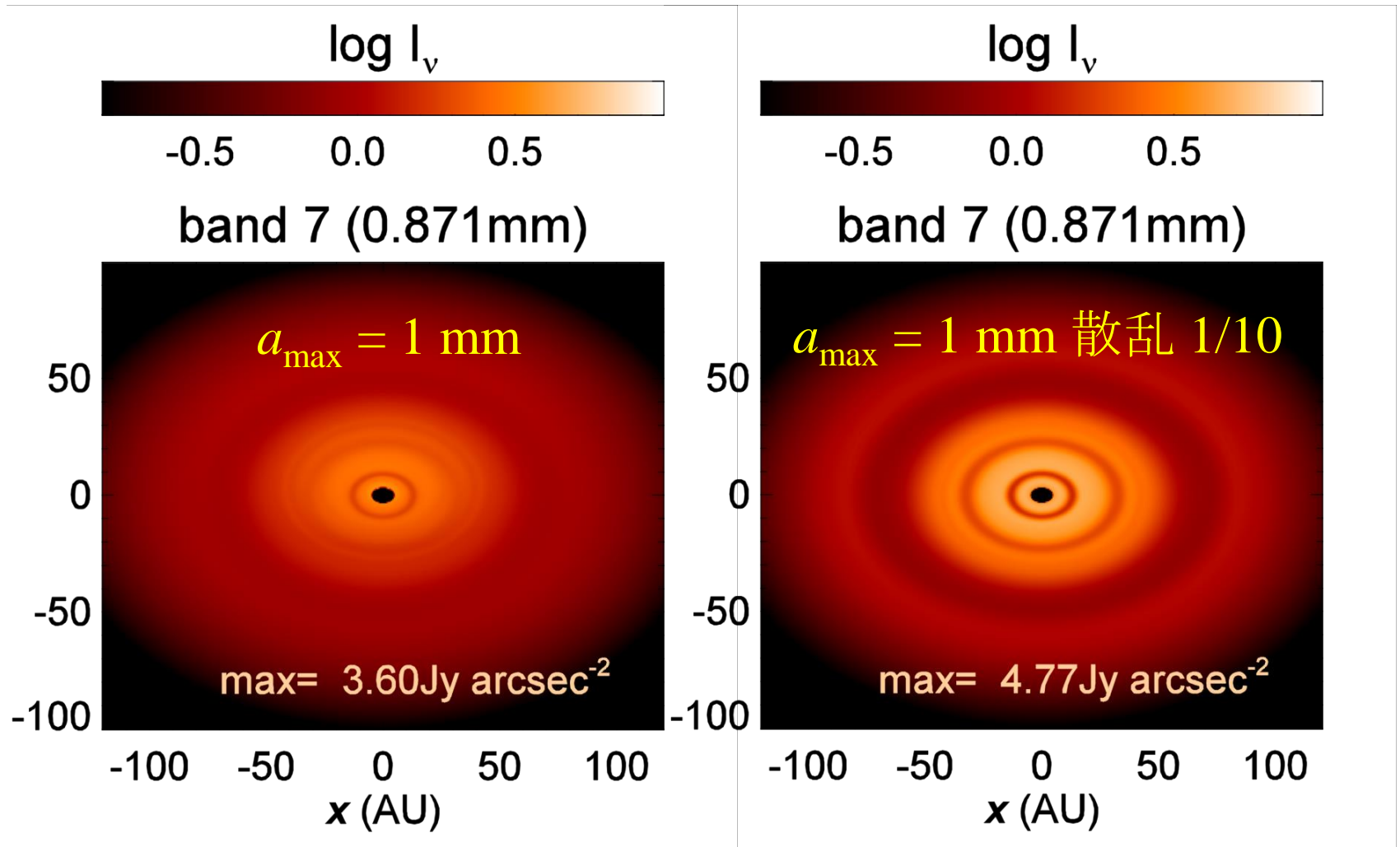
HL Tau周囲の原始惑星系円盤の 多波長輻射平衡モデル

持田 一貴, 花輪 知幸 (千葉大)



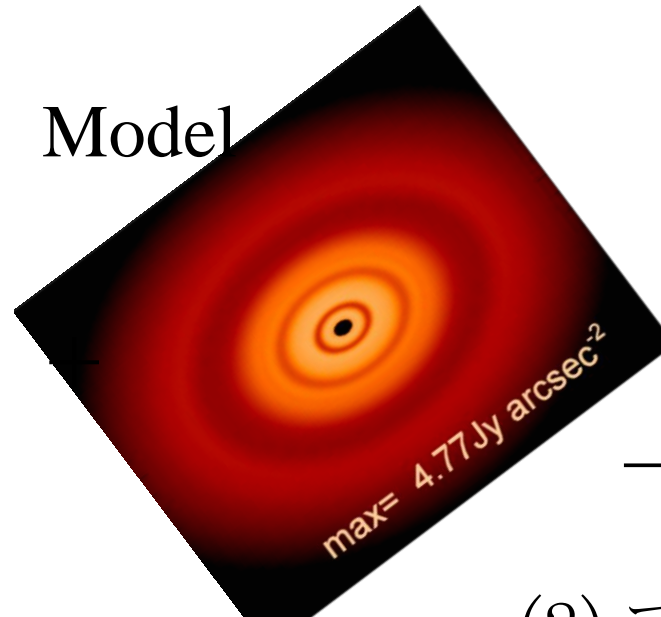
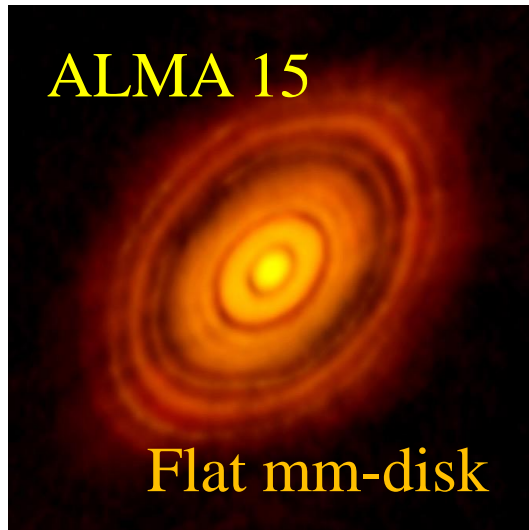
HL Tau周囲の原始惑星系円盤の 多波長輻射平衡モデル

持田 一貴, 花輪 知幸 (千葉大)



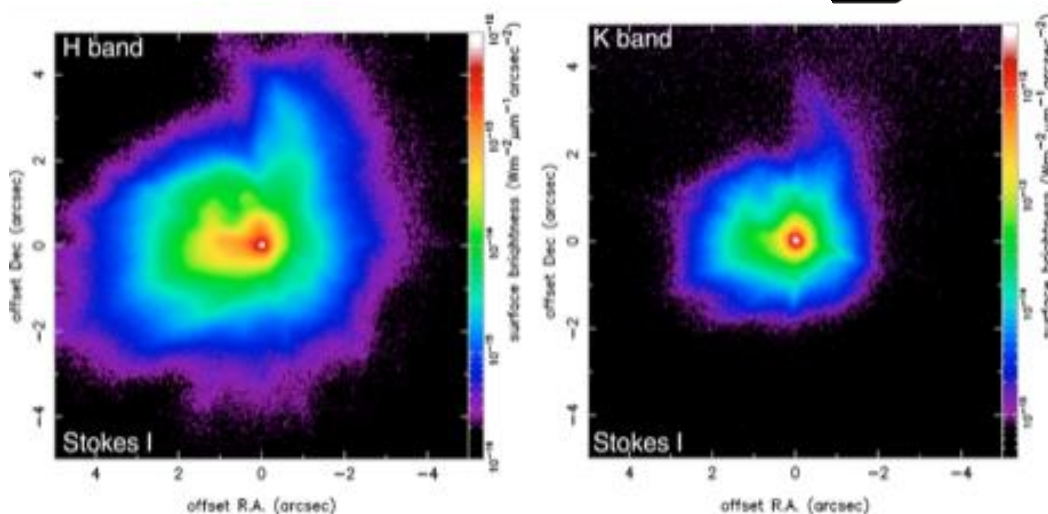
目的

(1) ダストのオパシティー κ_{abs} と κ_{sca} に制限を与えられるか？



→ κ_{abs} , κ_{sca} , $\rho(r,z)$?

(2) フレアした円盤大気はミリ波の放射に影響を与えるか？



Flared IR-disk
Murakawa+06

モデルの概要

1. 輻射平衡モデルの作成

1a. 密度分布を与える

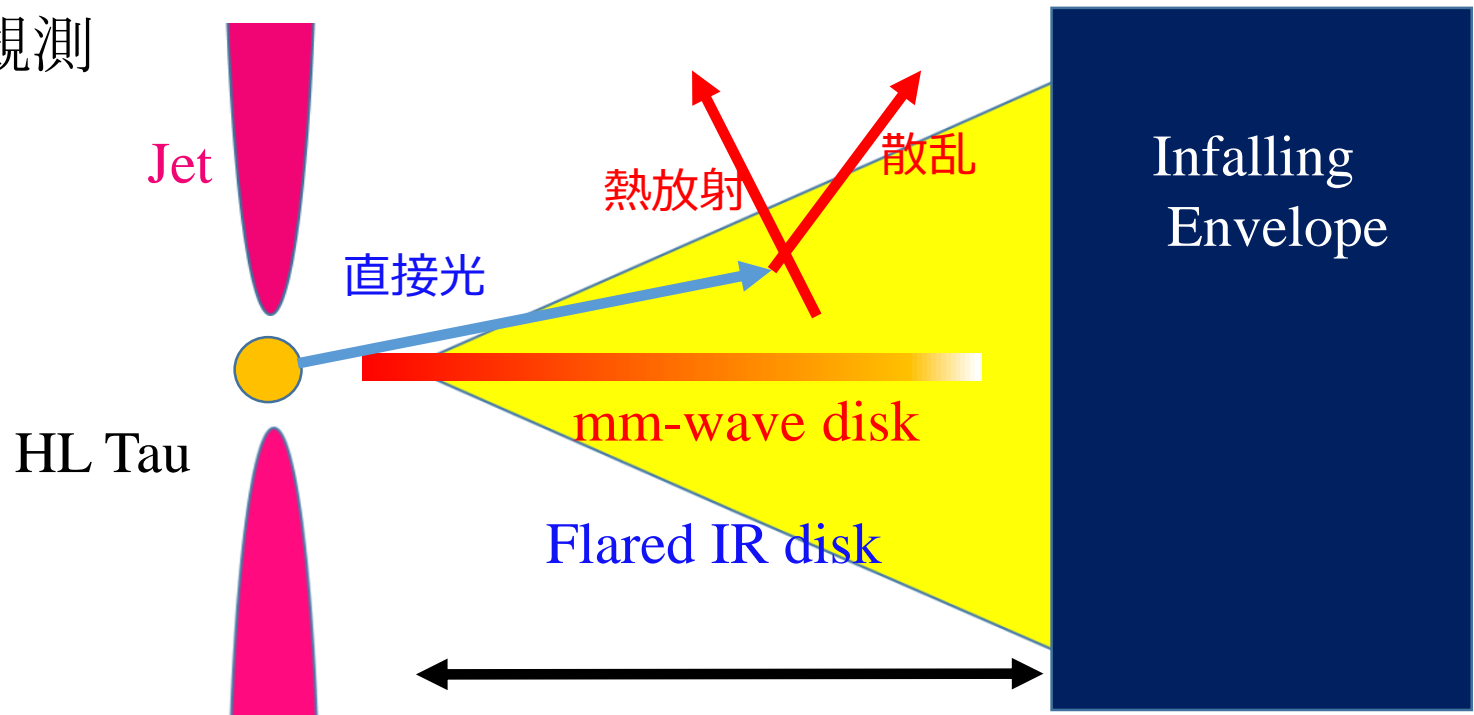
1b. 星からの直接光

1c. 円盤の散乱光と熱放射の輻射輸送
(M1 model)

1d. ダスト熱平衡温度

1c と 1dを反復計算

2. 擬似観測



計算領域: $20 \text{ AU} \leq r \leq 140 \text{ AU}$

密度分布

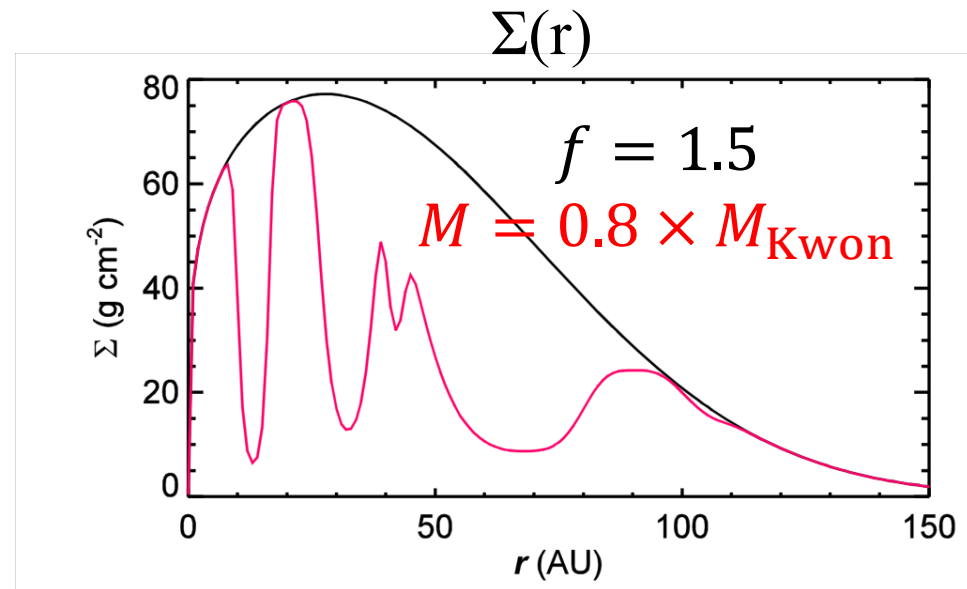
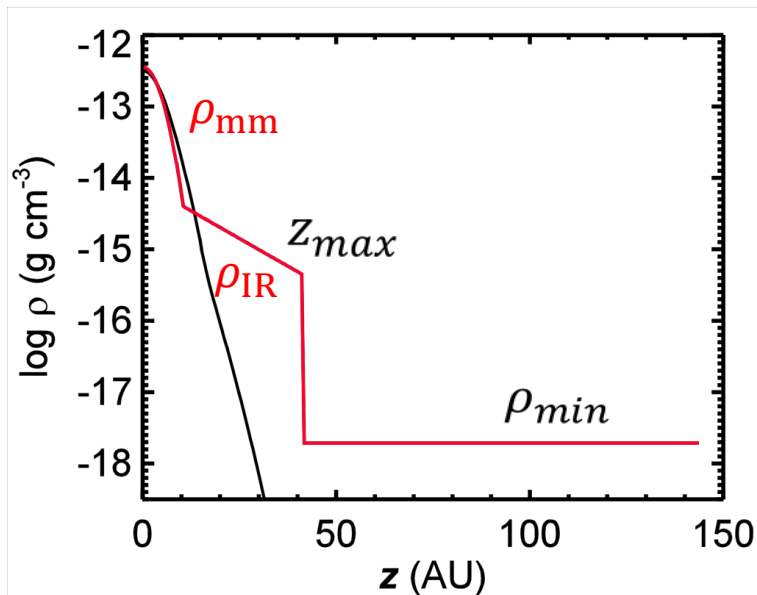
$$\rho(r, z) = \begin{cases} \rho_{mm} = \rho_0 \exp\left(-\frac{z^2}{2H_0^2}\right) & |z| \leq \alpha H_0 \\ \rho_{IR} = \rho_0 \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2} - \frac{z - \alpha}{H_1}\right) & \alpha H_0 < |z| < z_{\max} \\ \rho_{min} = 10^{-18} & |z| \geq z_{\max} \end{cases}$$

parameter

$$\alpha = 3, \quad H_0 = 0.05 r, \quad H_1 = 0.2 r, \quad z_{\max} = \left(\frac{r}{200} \text{ AU}\right)^{0.5} r$$

$$\Sigma(r) = 24.9 f \left(\frac{R}{78.9 \text{ AU}}\right)^{0.22} \exp\left[1 - \left(\frac{R}{78.9 \text{ AU}}\right)^{2.22}\right] \text{ g cm}^{-2}$$

$$f = 1 \text{ (Kwon+11)}$$



星からの直接光

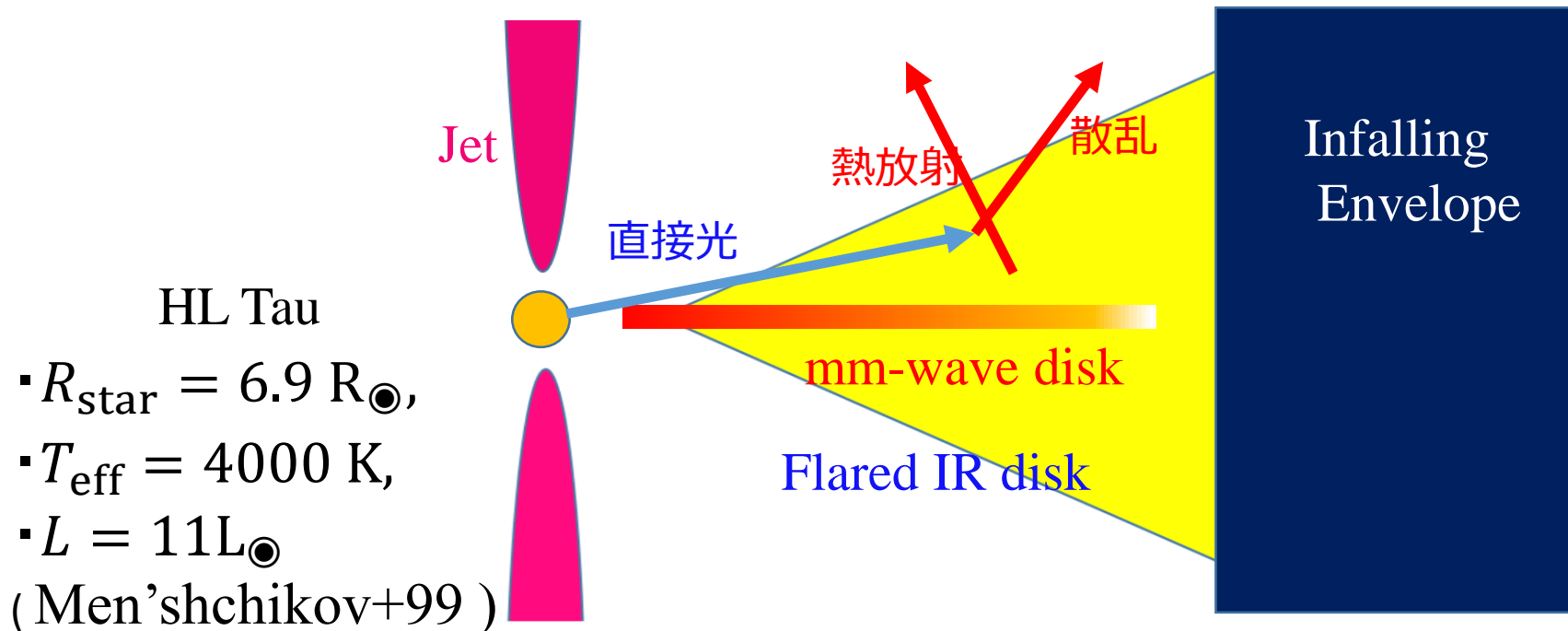
$$0.1\mu\text{m} \leq \lambda \leq 3.16\text{mm}$$

$$\Delta\log \lambda = 0.02 \text{ (226 color)}$$

$$\tau_\nu(r, z) = \int_0^r (\kappa_\nu^{abs} + \kappa_\nu^{sca}) \rho \left(r', \frac{zr'}{r} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{z}{r} \right)^2} dr'$$

$$E_{\nu,star}(r, z) = \frac{R_{star}^2}{c(r^2 + z^2)} B_\nu(T_{star}) \exp[-\tau_\nu(r, z)]$$

$$\mathbf{F}_{\nu,star}(r, z) = \frac{c}{\sqrt{r^2 + z^2}} \begin{pmatrix} r \\ z \end{pmatrix} E_{\nu,star}(r, z)$$



円盤の散乱光と熱放射の輻射輸送 (M1モデル)

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{\partial E_{\nu,\text{disk}}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_{\nu,\text{disk}} &= -\kappa_{\nu,\text{abs}}\rho \left[E_{\nu,\text{disk}} - \frac{4\pi B_{\nu}(T)}{c} \right] + \kappa_{\nu,\text{sca}}E_{\nu,\text{star}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{\nu,\text{disk}}}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\mathbf{P}}_{\nu,\text{disk}} &= -c(\kappa_{\nu,\text{abs}} + \kappa_{\nu,\text{sca}})\rho \mathbf{F}_{\nu,\text{disk}} \end{aligned}}$$

2次元(r, z) 軸対称

$$\vec{\mathbf{P}}_{\nu} = \left(\frac{1-\chi_{\nu,\text{disk}}}{2} \vec{\mathbf{I}} + \frac{3\chi_{\nu,\text{disk}}-1}{2} \mathbf{n}_{\nu,\text{disk}} \mathbf{n}_{\nu,\text{disk}} \right) E_{\nu,\text{disk}},$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{F}_{\nu,\text{disk}}}{|\mathbf{F}_{\nu,\text{disk}}|}, \quad \chi_{\nu,\text{disk}} = \frac{3+4f_{\nu,\text{disk}}^2}{5+2\sqrt{4-3f_{\nu,\text{disk}}^2}}, \quad f = \frac{|\mathbf{F}_{\nu}|}{cE_{\nu,\text{disk}}}$$

($E_{\nu}, F_{r\nu}, F_{z\nu}$) 直接光

($E_{\nu}, F_{r\nu}, F_{z\nu}$) 熱放射, 散乱

$$\int_0^{\infty} \kappa_{\nu,a} c E_{\nu} d\nu = 4\pi \int_0^{\infty} \kappa_{\nu,a} B_{\nu}(T) d\nu$$

熱平衡

散乱

熱放射

吸収

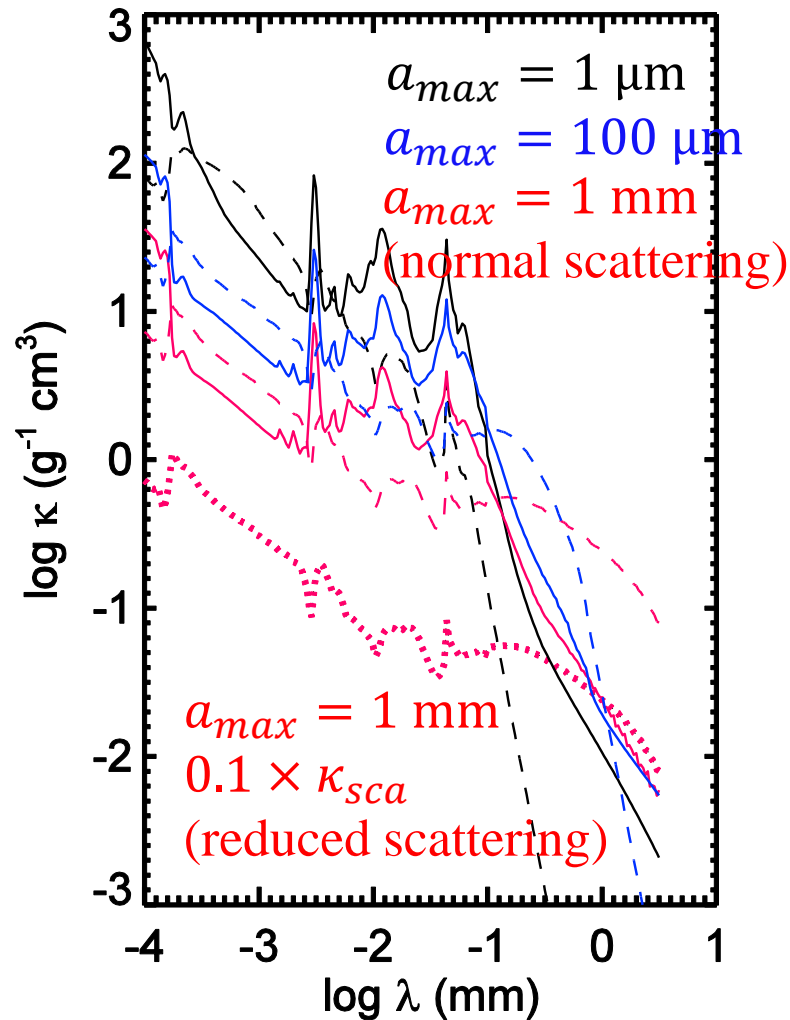
HL Tau

直接光(optical)



計算領域: $20 \text{ AU} \leq r \leq 140 \text{ AU}$

オパシティー

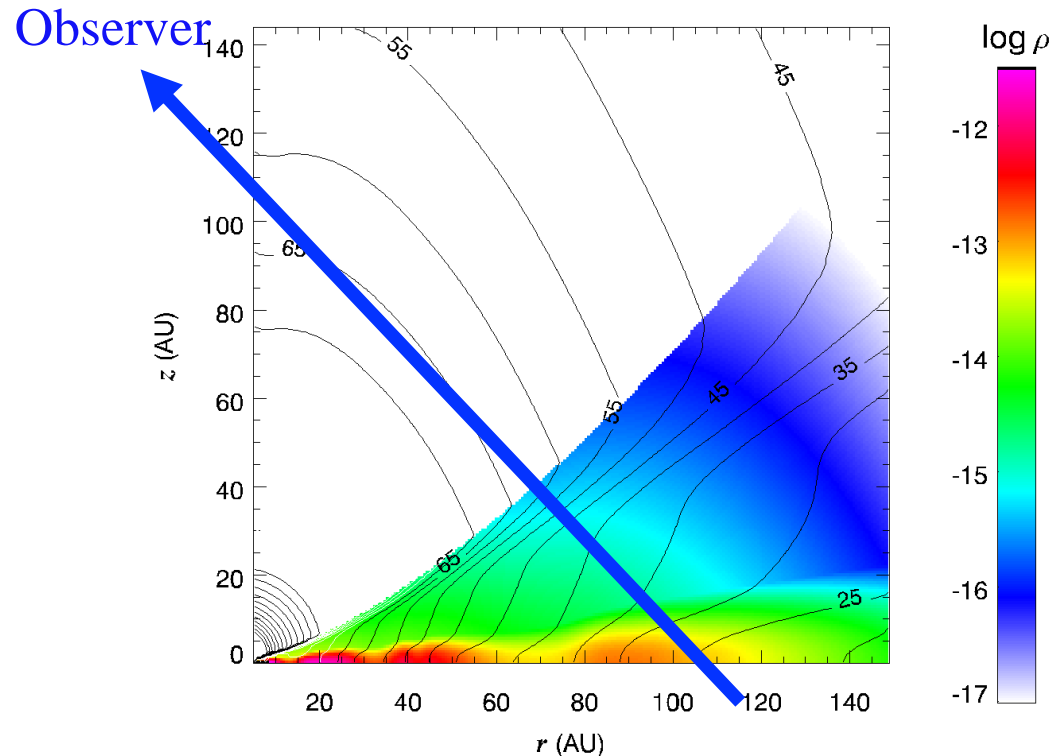


Nomura+05

擬似観測

$$\frac{dI_\nu}{ds} = [\kappa_{\nu,a} + \kappa_{\nu,s}(1 - \langle \cos \theta \rangle)](S_\nu - I_\nu)$$

$$S_\nu = \frac{\kappa_{\nu,a}B_\nu(T) + \kappa_{\nu,s}(1 - \langle \cos \theta \rangle) \frac{cE_\nu}{4\pi}}{\kappa_{\nu,a} + \kappa_{\nu,s}(1 - \langle \cos \theta \rangle)}$$

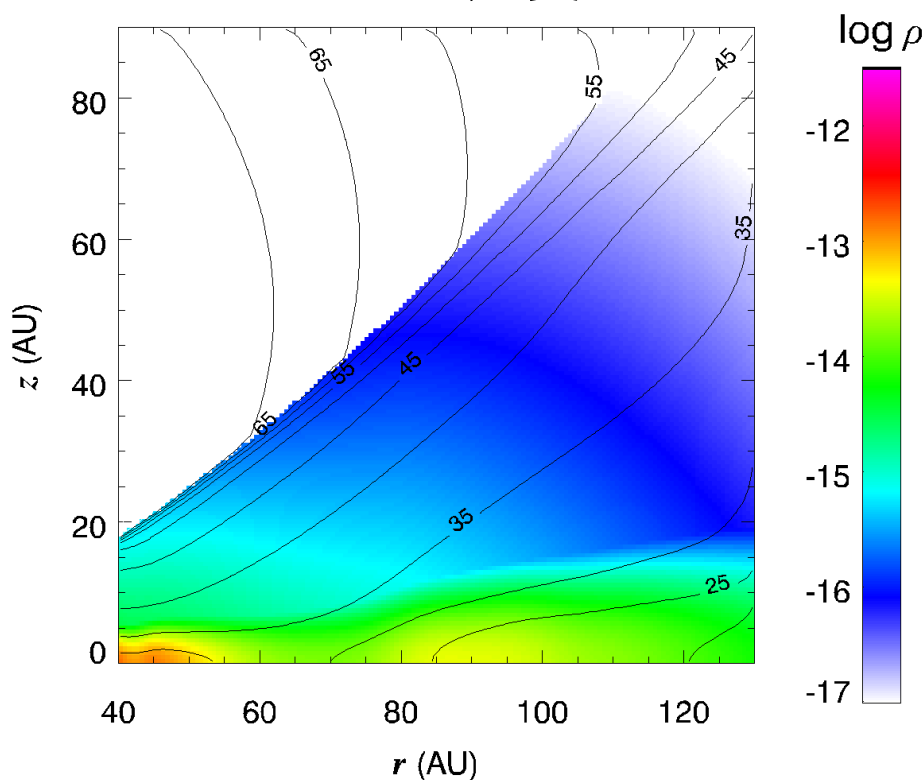


“ $a_{max} = 1 \text{ mm}, 0.1 \times \kappa_{sca}$ ”だけがALMAの観測を再現する

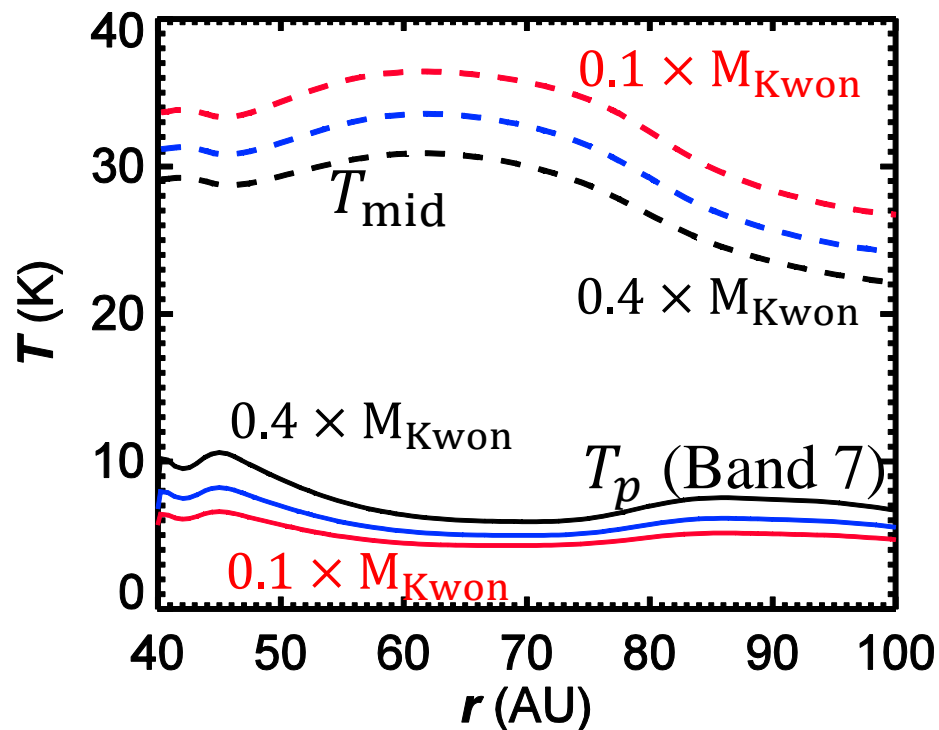
ダストのオパシティー κ_{abs} と κ_{sca}
に制限を与えられるか？

$$a_{\text{max}} = 1 \mu\text{m}$$

等高線：温度
カラー：密度



T_{mid} : 赤道面の温度
 T_p : プランク温度



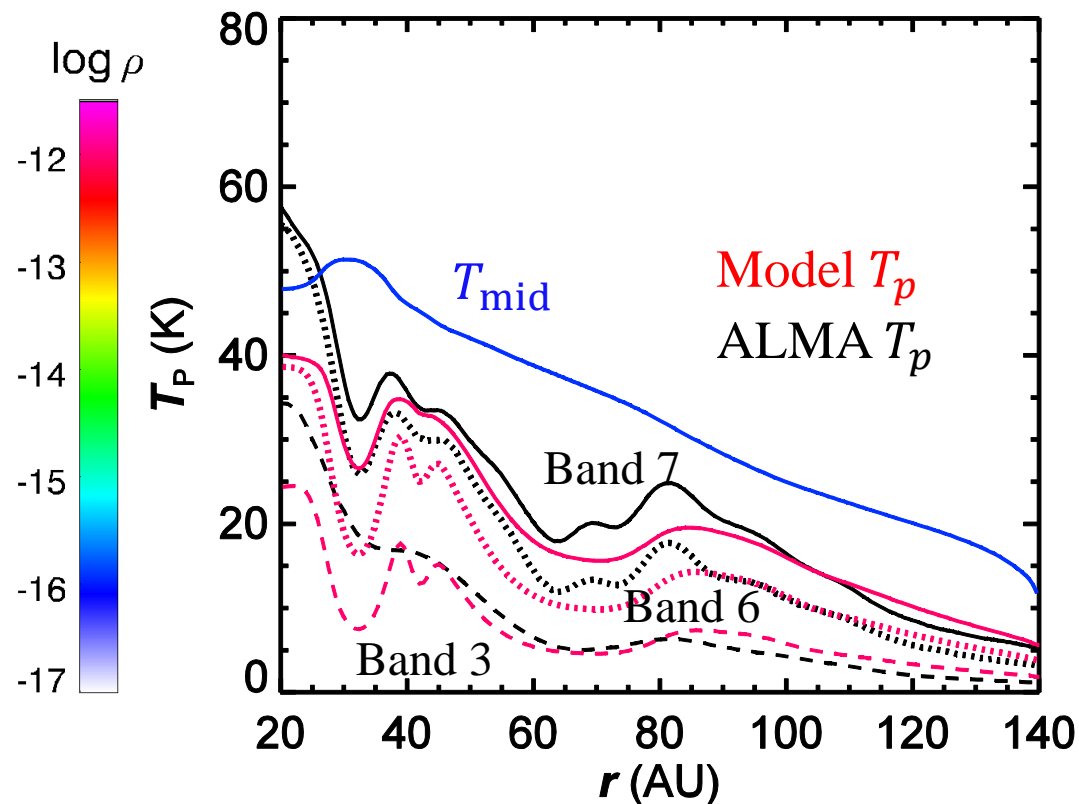
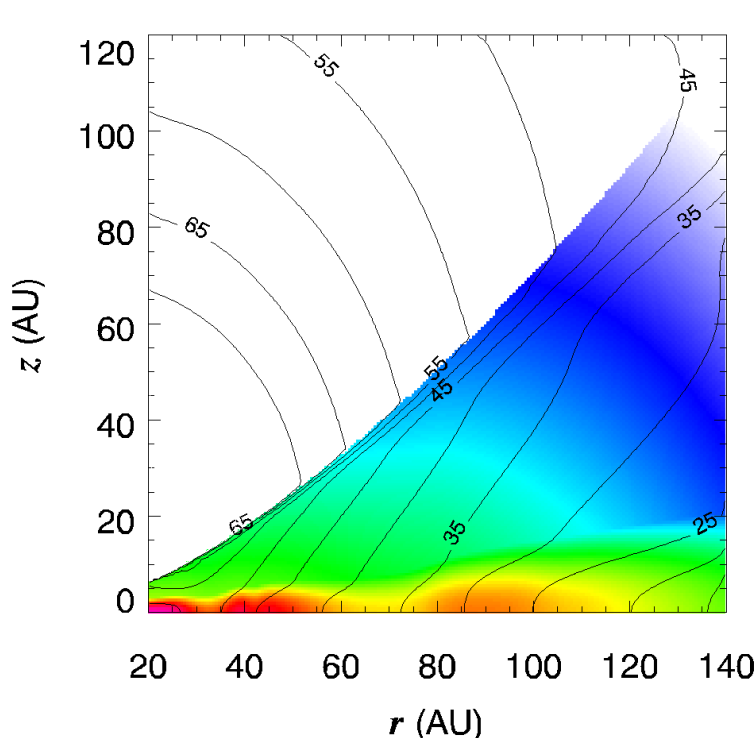
- T_{mid} がかなり低い
- 面密度を上げると T_{mid} が下がっていく

→ ALMAの観測を再現できない

$$a_{\text{max}} = 100 \mu\text{m}$$

等高線：温度
カラー：密度

T_{mid} ：赤道面の温度
 T_p ：プランク温度

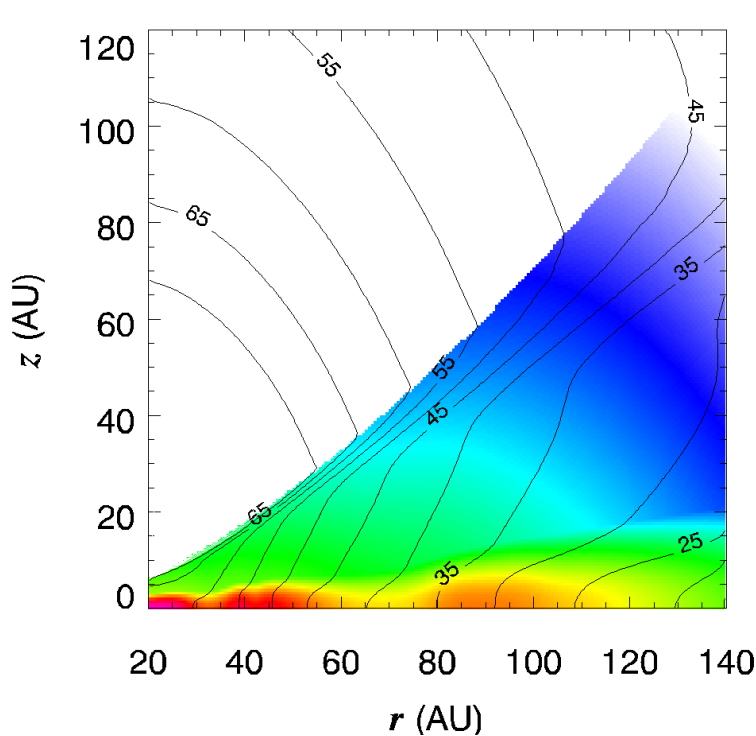


20AUの付近で T_{mid} がALMAの T_p を下回る

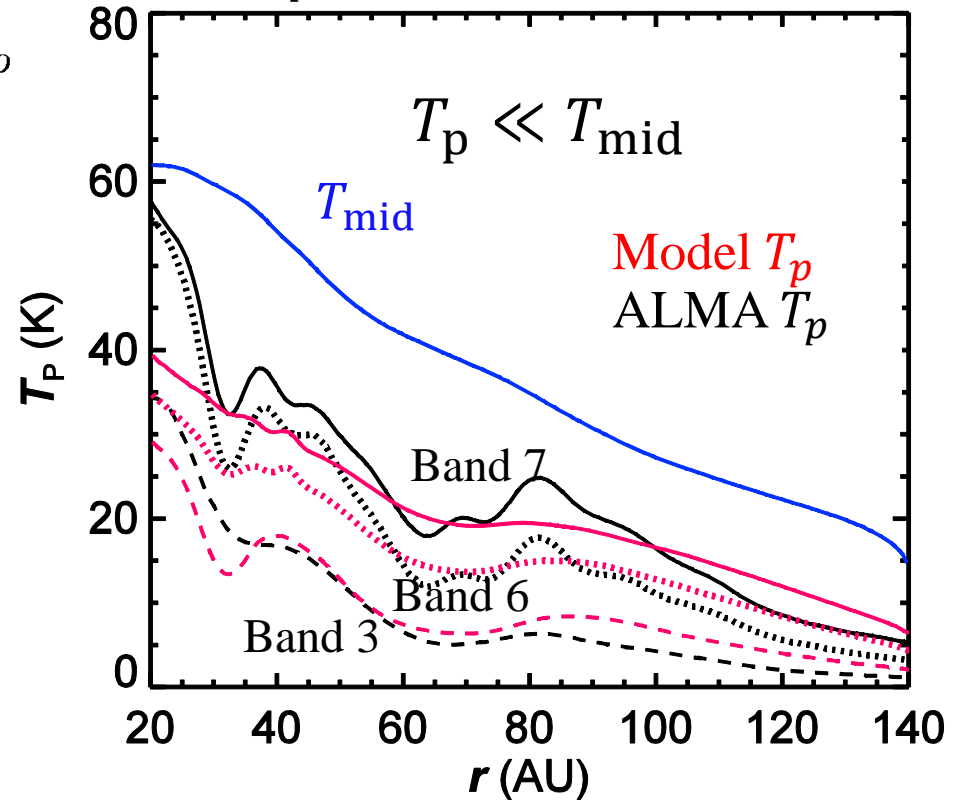
→ ALMAの観測を再現できない

$a_{\max} = 1 \text{ mm}$ (normal scattering)

等高線：温度
カラー：密度

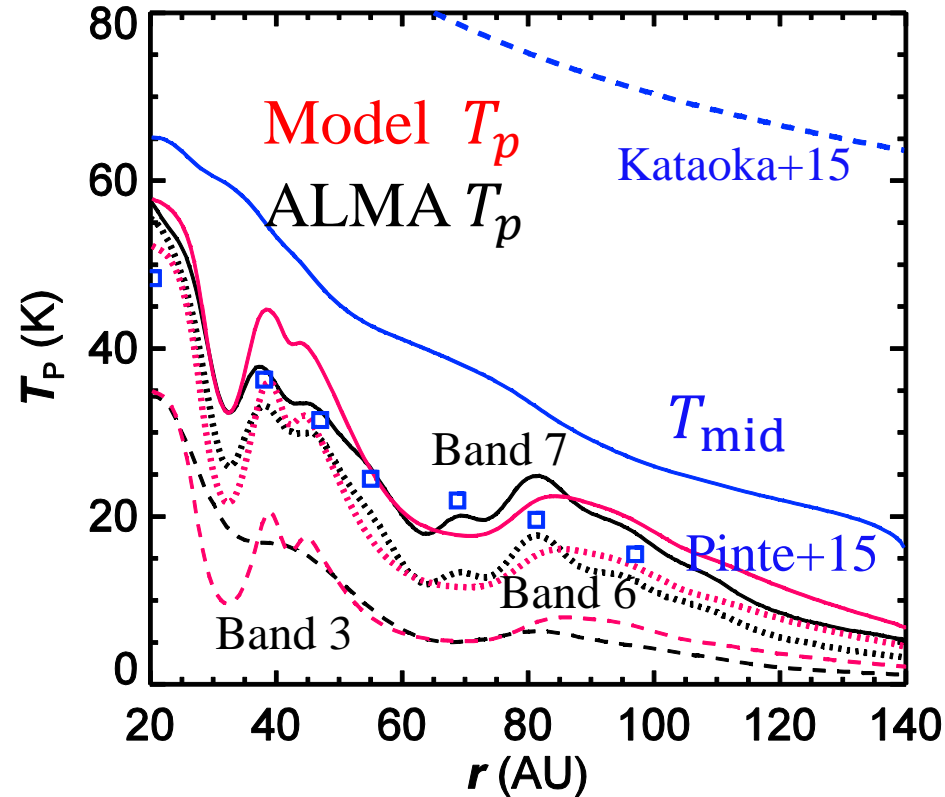


T_{mid} : 赤道面の温度
 T_p : プランク温度

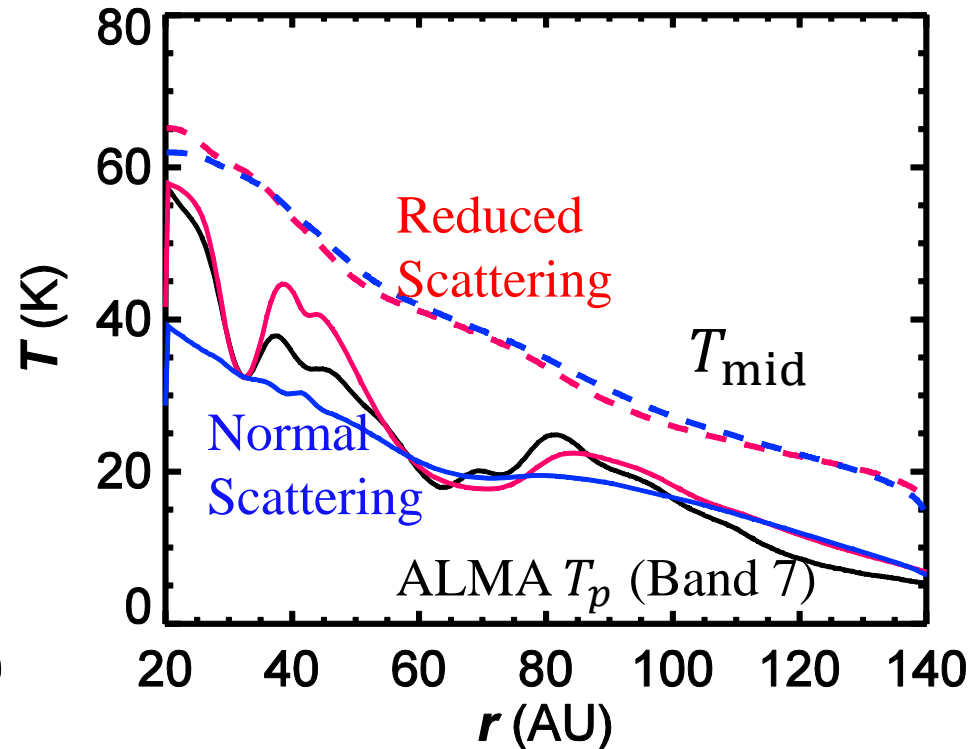


- T_{mid} は十分高いが T_p はかなり低い
 - Gapがぼやける
- 強い散乱が原因

$$a_{max} = 1 \text{ mm}, 0.1 \times \kappa_{sca} \text{ (reduced scattering)}$$



Reduced scattering model
can reproduce ALMA
images.

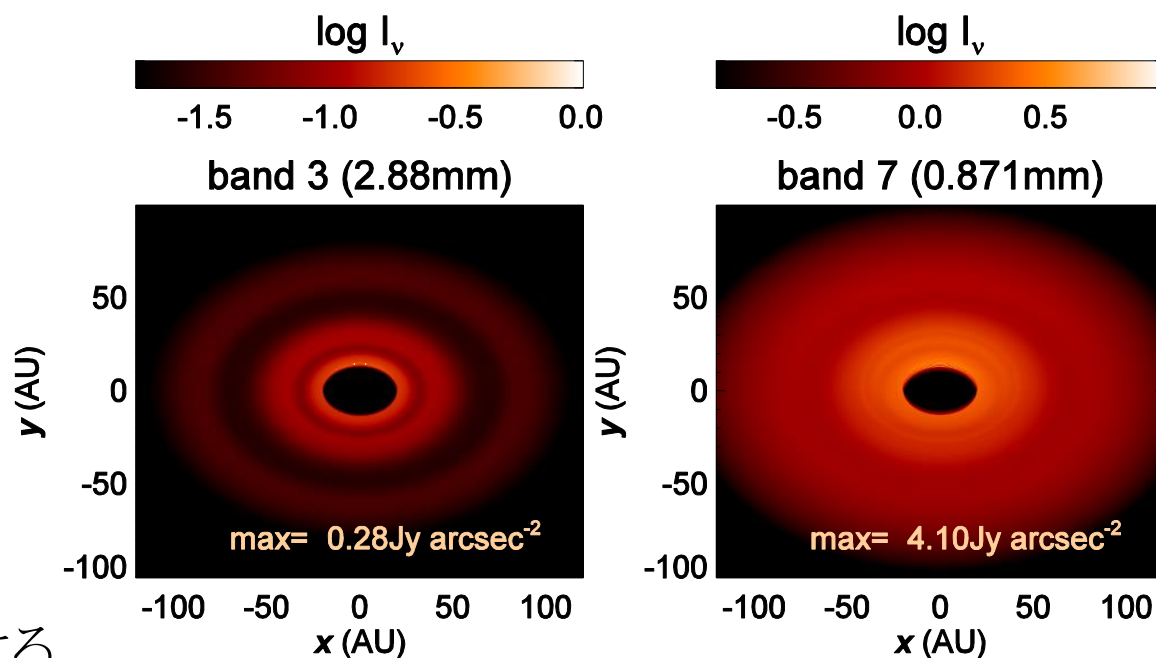


散乱を0.1倍にすると
 • T_{mid} は変わらない
 • Gapを再現できる

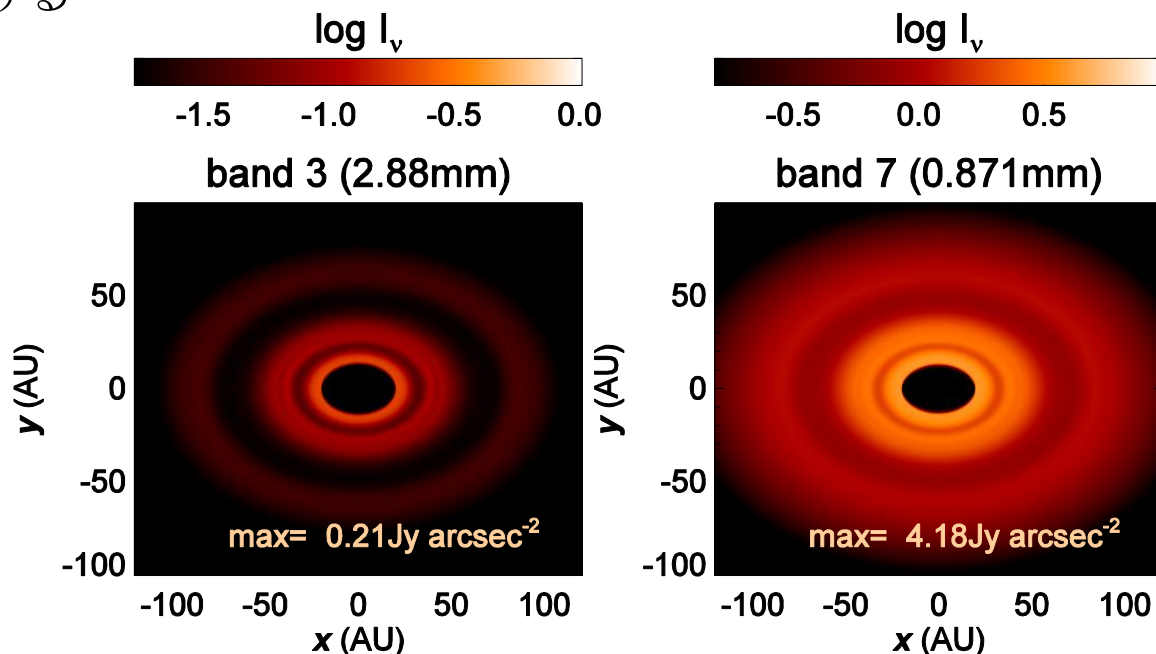
Model Images

$a_{\text{max}} = 1\text{mm}$
(normal scattering)

- 暗い
- Gapがぼやける



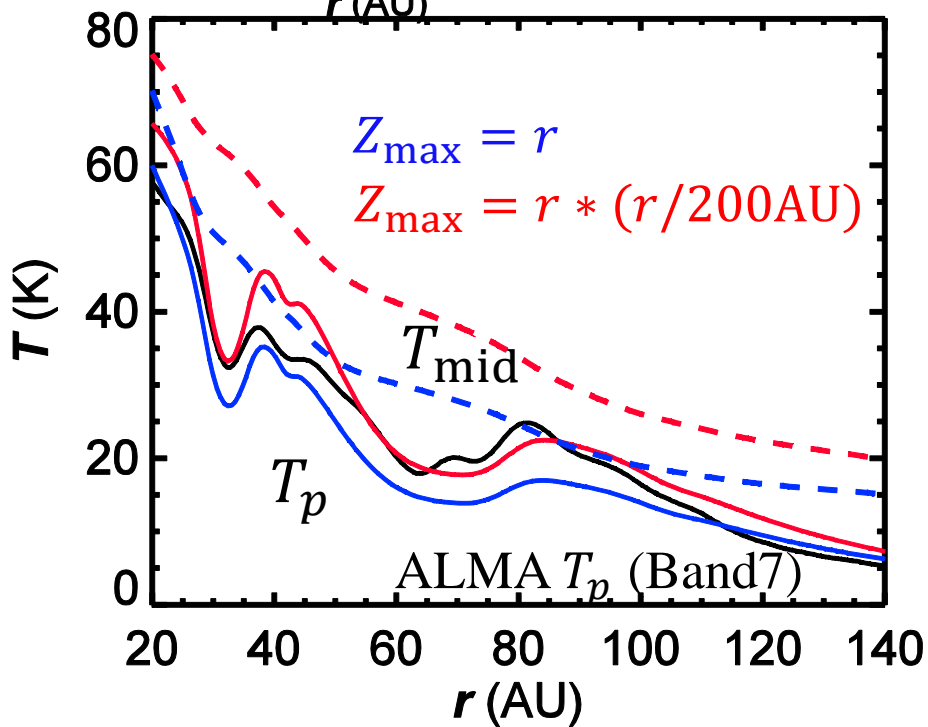
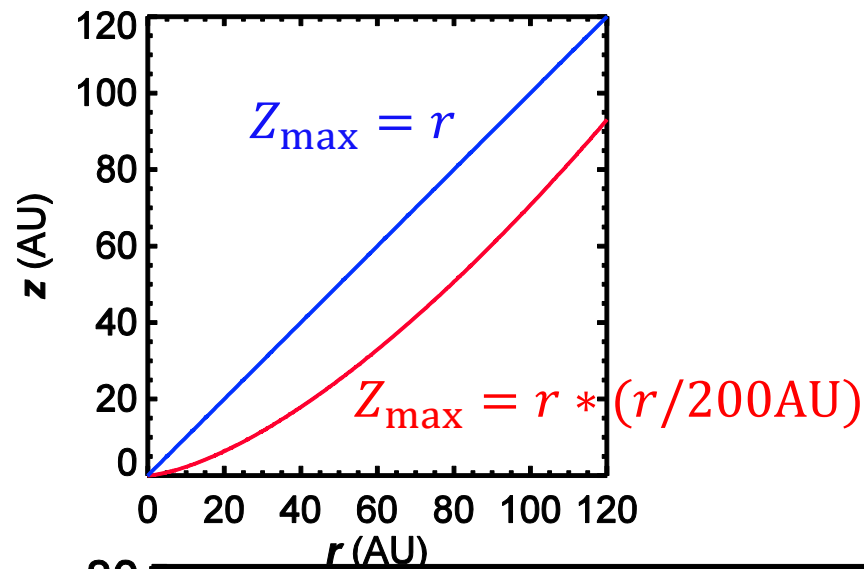
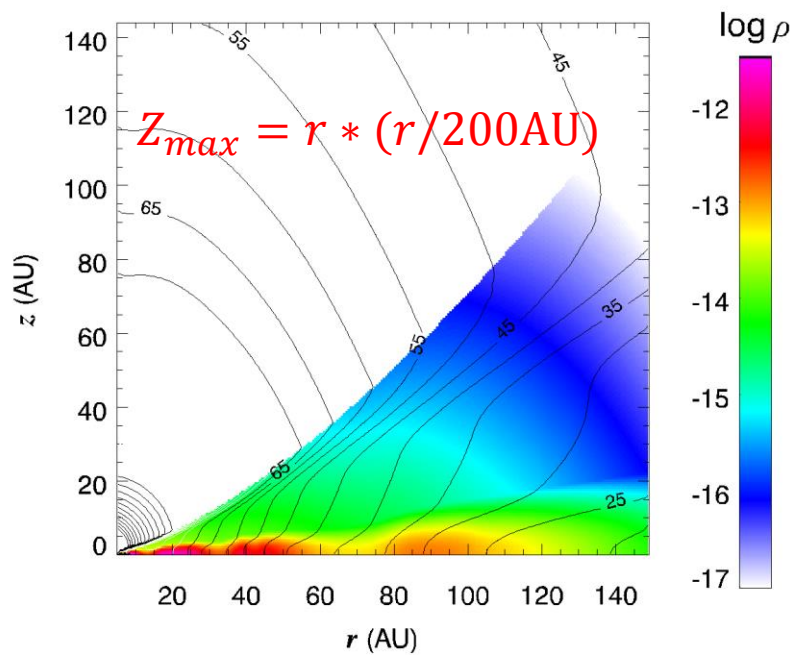
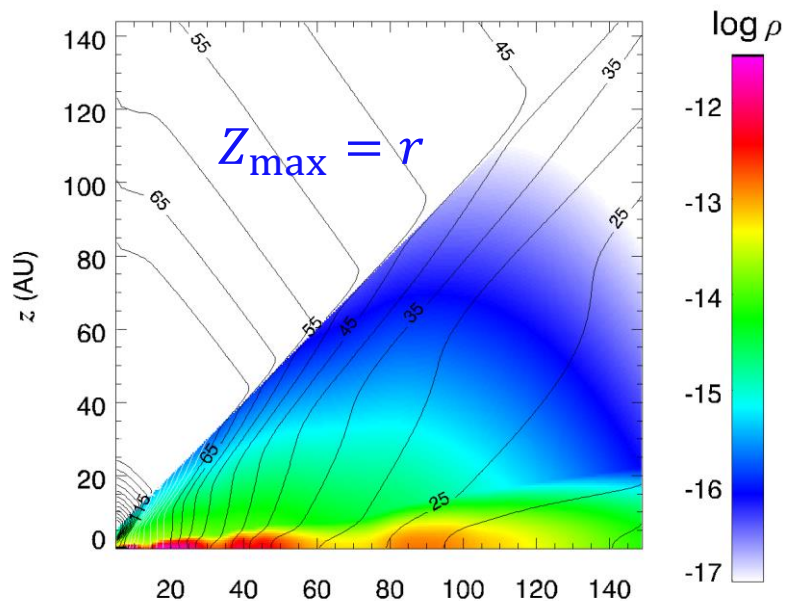
$a_{\text{max}} = 1\text{mm}$
 $0.1 \times \kappa_{\text{sca}}$
(reduced scattering)



Disc is geometrically thin. cf. Pinte+15

フレアした円盤はミリ波の放射
に影響を与えるか

赤道面の温度は T_{mid} はIR diskの形状に依存する



まとめ

- 散乱は円盤を暗くさせ、Gapをぼやけさせる
→ 散乱が強くてはいけない
- 一方でALMAの観測を再現するには
ダストサイズが大きい方がよい
- 密度の低いフレアした円盤が
ミリ波の放射に影響を与える