

# ALMAによる原始惑星系円盤観測

塚越 崇 (茨城大)

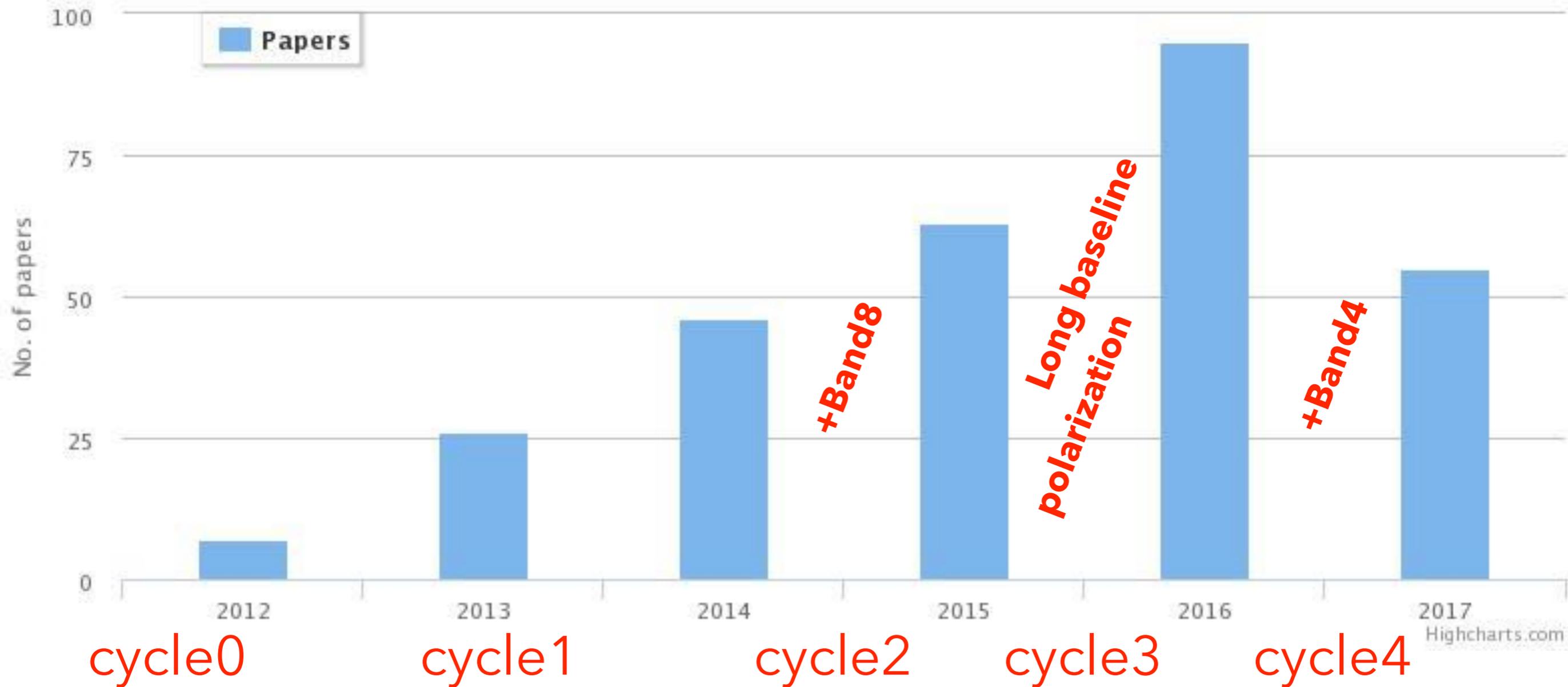
# ALMA関連論文の出版数推移

~300

No. of papers per year

Source: telbib

Query:



keyword: 'ALMA' & 'protoplanetary disk'

# 今日の内容

- ALMAについて
- 多重ダストリング/ギャップ構造
  - TW Hya高分解能多周波観測 [Tsukagoshi+2016]
- ダスト穴あき円盤 (遷移円盤)
  - Sz 91 [Tsukagoshi+ in prep.]

# Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

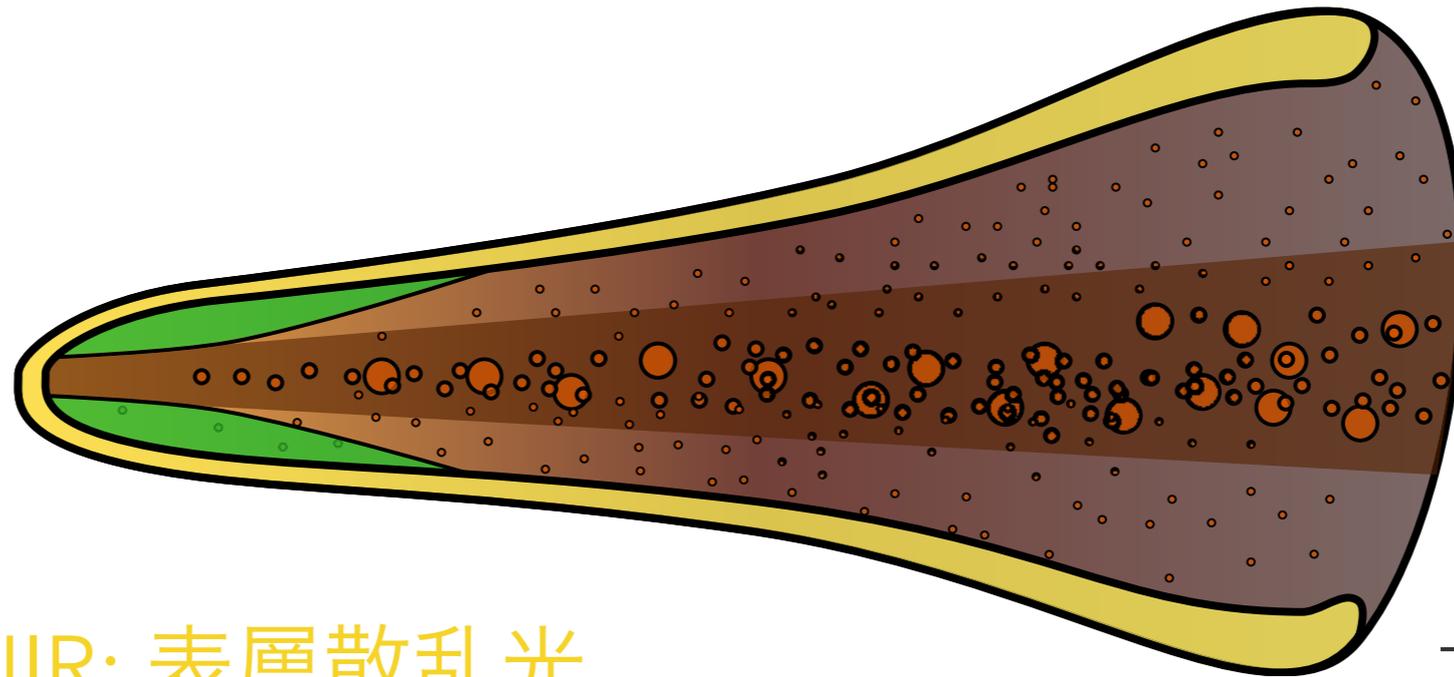


# Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

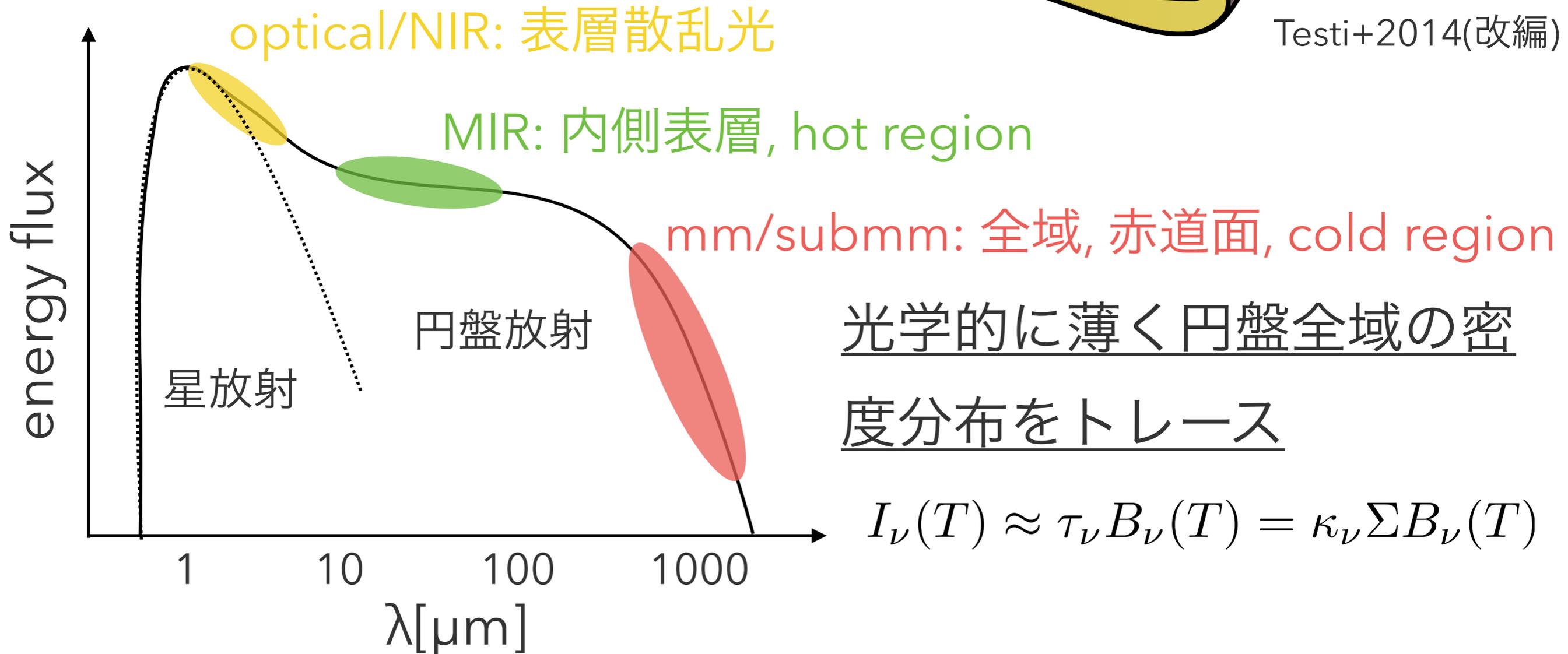
- アンテナ間距離 = 0.3~16km
- $\Delta\theta_{\max} \sim 18\text{mas}$ 
  - $\sim 1.0\text{ au}$  at  $d=54\text{pc}$
  - $\sim 2.5\text{ au}$  at  $d=140\text{pc}$
- 連続波 + 分子/原子輝線
  - ダストの熱放射 (+電離領域の自由自由放射)
  - ガスの線スペクトル
- 周波数  $\sim 80\text{-}950\text{ GHz}$
- $dv_{\max} \sim 30\text{-}50\text{ m/s}$

# サブミリ波観測で見える円盤構造：連続波観測

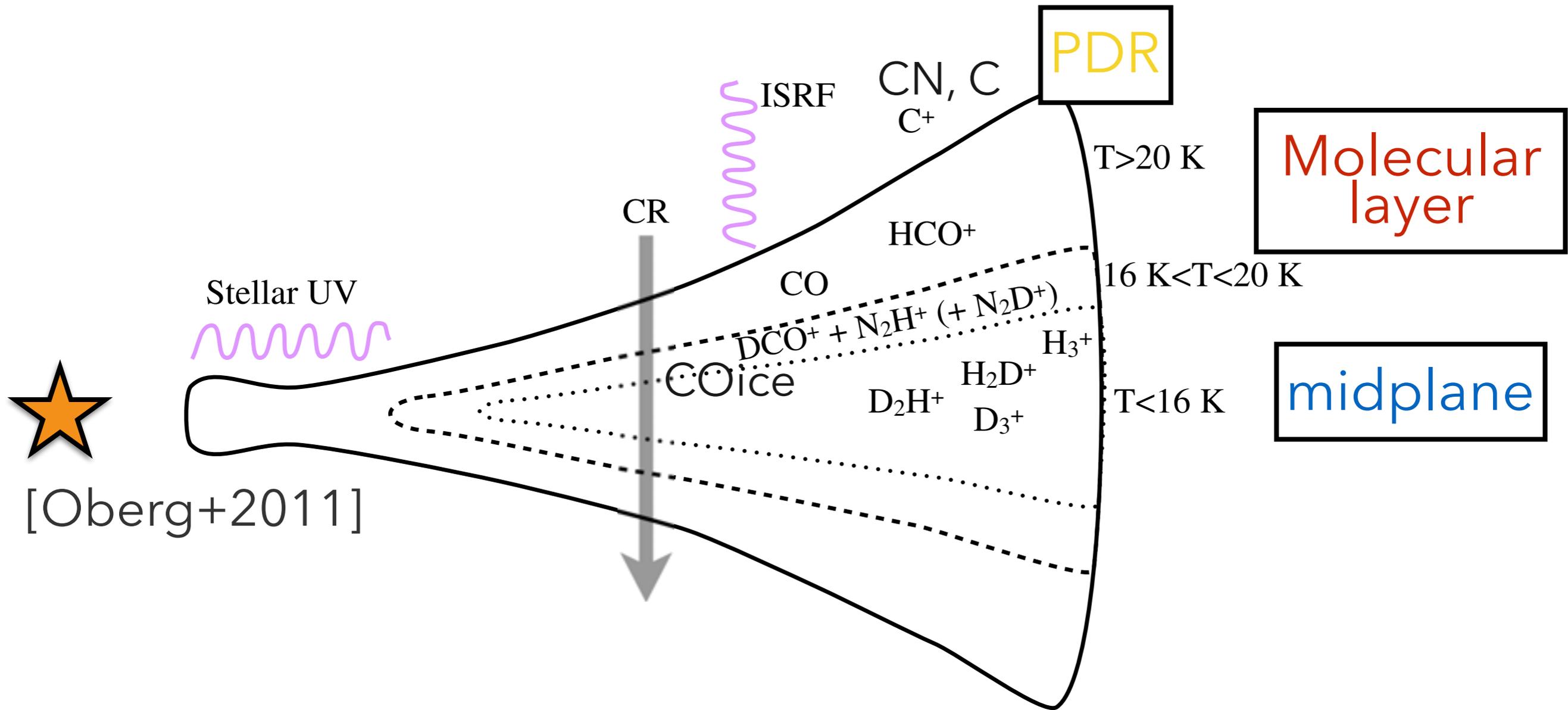
円盤断面図



Testi+2014(改編)

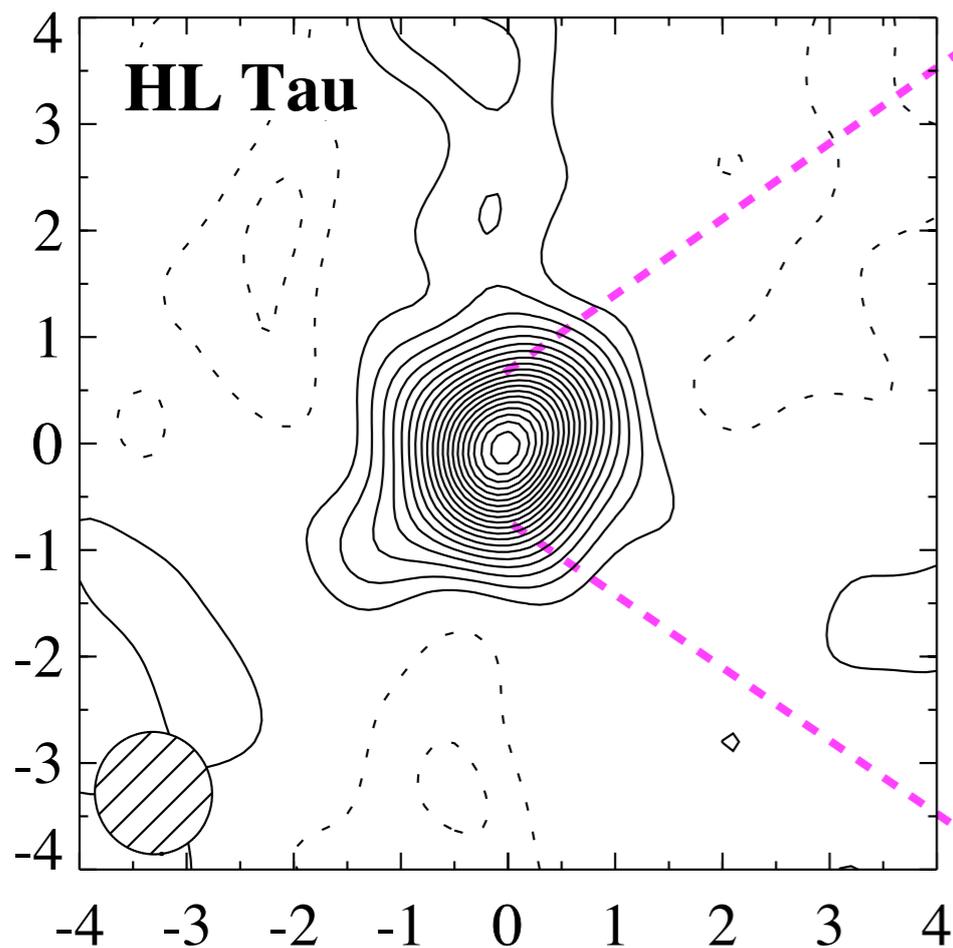


# サブミリ波観測で見える円盤構造：ガス輝線観測

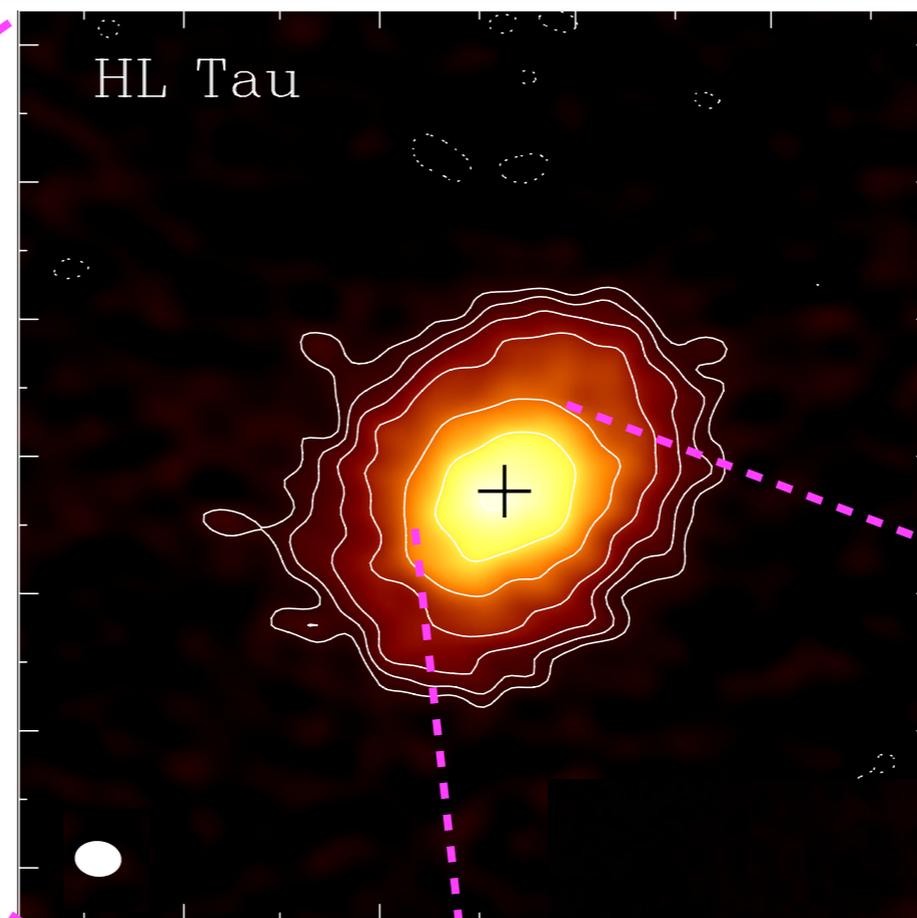


使用する輝線ごとにトレースする円盤領域が異なる

# ALMAまでの(サブ)ミリ波円盤観測の変化



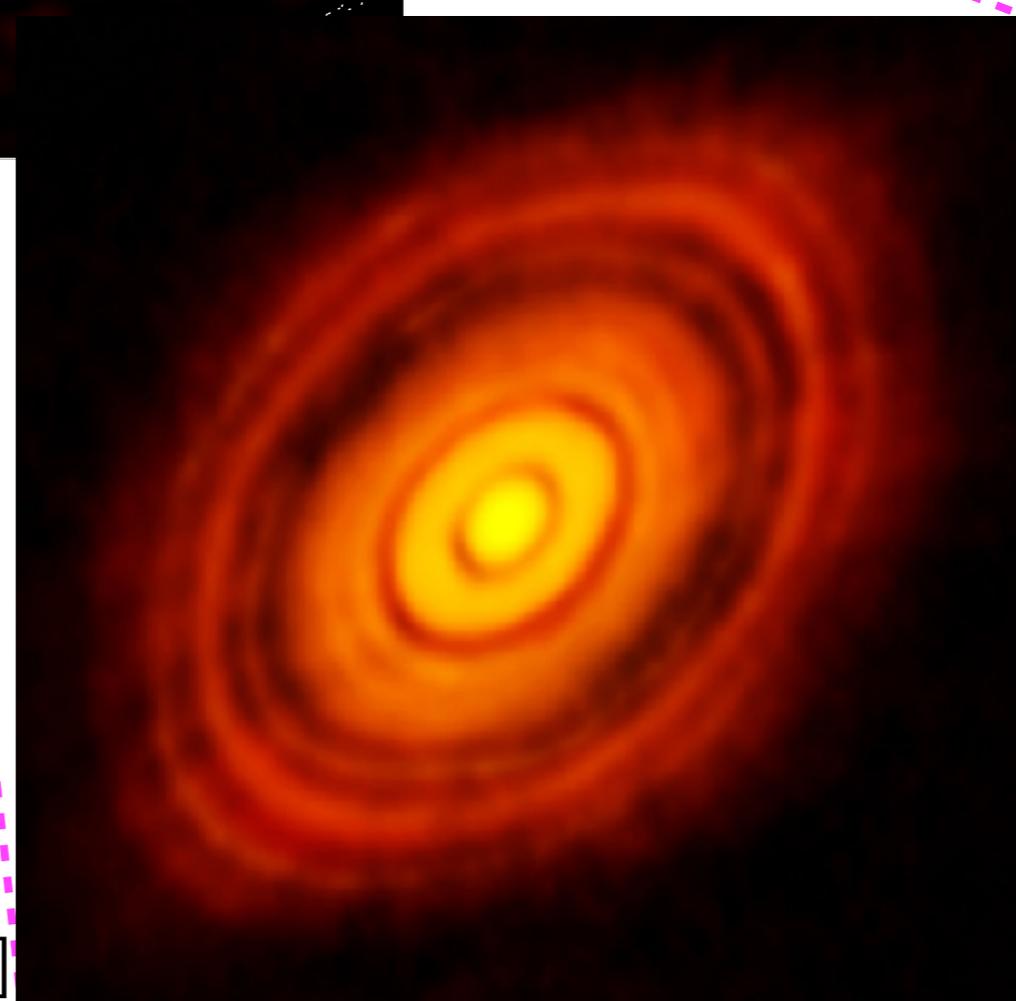
野辺山ミリ波干渉計;  $\sim 1.0''$   
2mm [Kitamura+2002]



CARMA望遠鏡;  $\sim 0.2''$   
1.3mm [Kwon+2011]

## HL Tau

ALMA望遠鏡;  $\sim 0.03''$   
1mm [ALMA Partnership+2015]



# ALMA前後での円盤構造の認識(仮定)の変化

## ALMA以前

- 柱密度, 温度のベキ乗分布
- Filled disk ( $g_2d$ 比=100)
- 均一な $\kappa(\text{dust})$  ( $\beta=0\sim 1$ )
- 軸対象円盤

## ALMAで見えてきた構造

- 多重リングやギャップ構造
- 遷移円盤, ダスト-ガスの分布の違い
- 動径方向のダストサイズ分布
- 非軸対象円盤, スパイラルアーム



多重ダストリング/ギヤツプ円盤

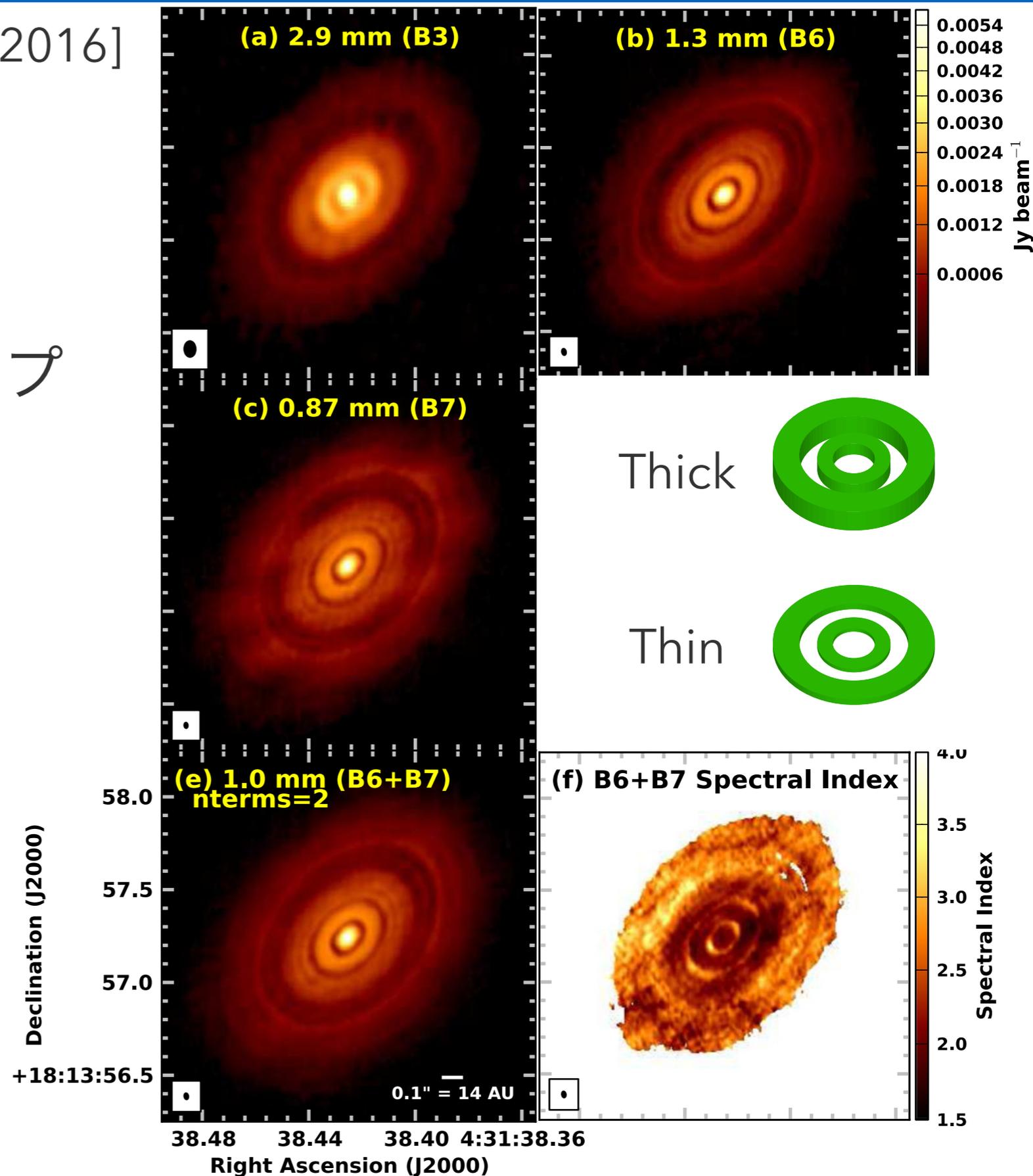
# HL Tau周りの多重ダストリング/ギャップ

[ALMA partnership+2015; Pinte+2016]

- 7つのリング/ギャップ
  - $\sim 30\text{mas}$  ( $\sim 4\text{au}$ )で分解
- 単軸でシャープなギャップ

=>ダスト沈殿を示唆

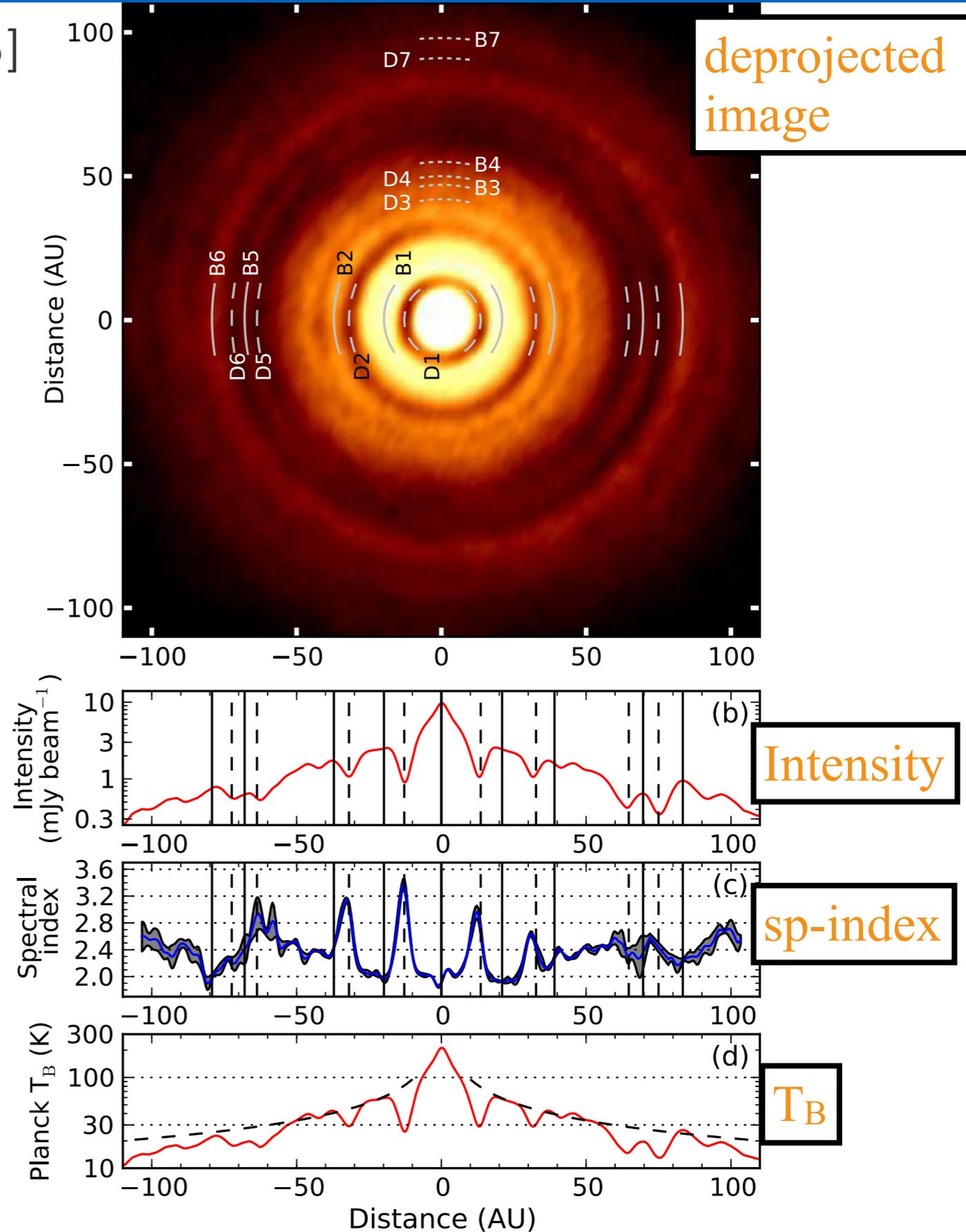
- $h_d \sim 1\text{au}$  at  $r=100\text{au}$   
=> $\alpha \sim 10^{-4}$  (弱乱流)
- Spectral index
  - 内側ではリングで $\sim 2$   
=>光学的に厚い



# HL Tau周りの多重ダストリング/ギャップ

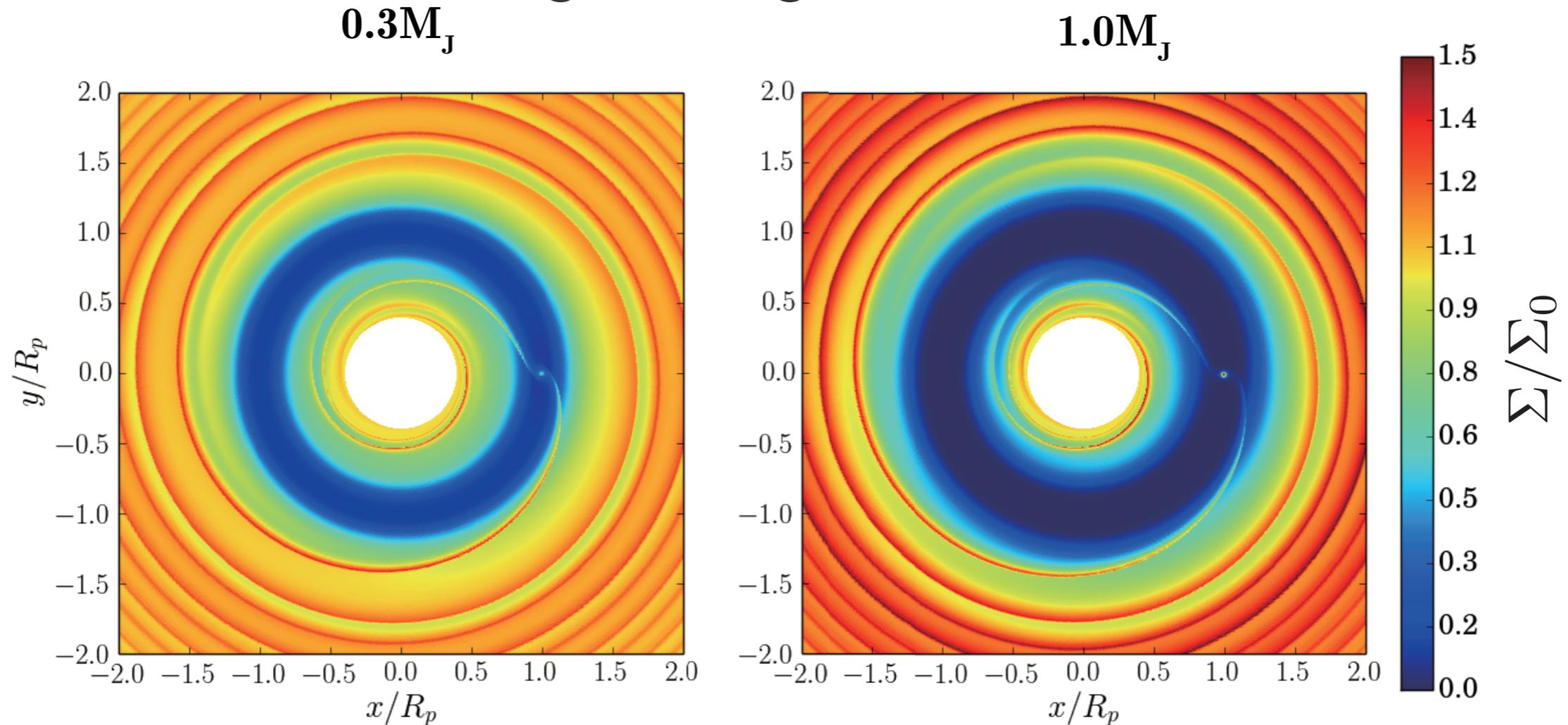
[ALMA partnership+2015; Pinte+2016]

- 7つのリング/ギャップ
  - $\sim 30\text{mas}(\sim 4\text{au})$ で分解
- 単軸でシャープなギャップ
  - =>ダスト沈殿を示唆
  - $h_d \sim 1\text{au}$  at  $r=100\text{au}$ 
    - => $\alpha \sim 10^{-4}$  (弱乱流)
- Spectral index
  - 内側ではリングで $\sim 2$ 
    - =>光学的に厚い



# リング/ギャップ構造の要因

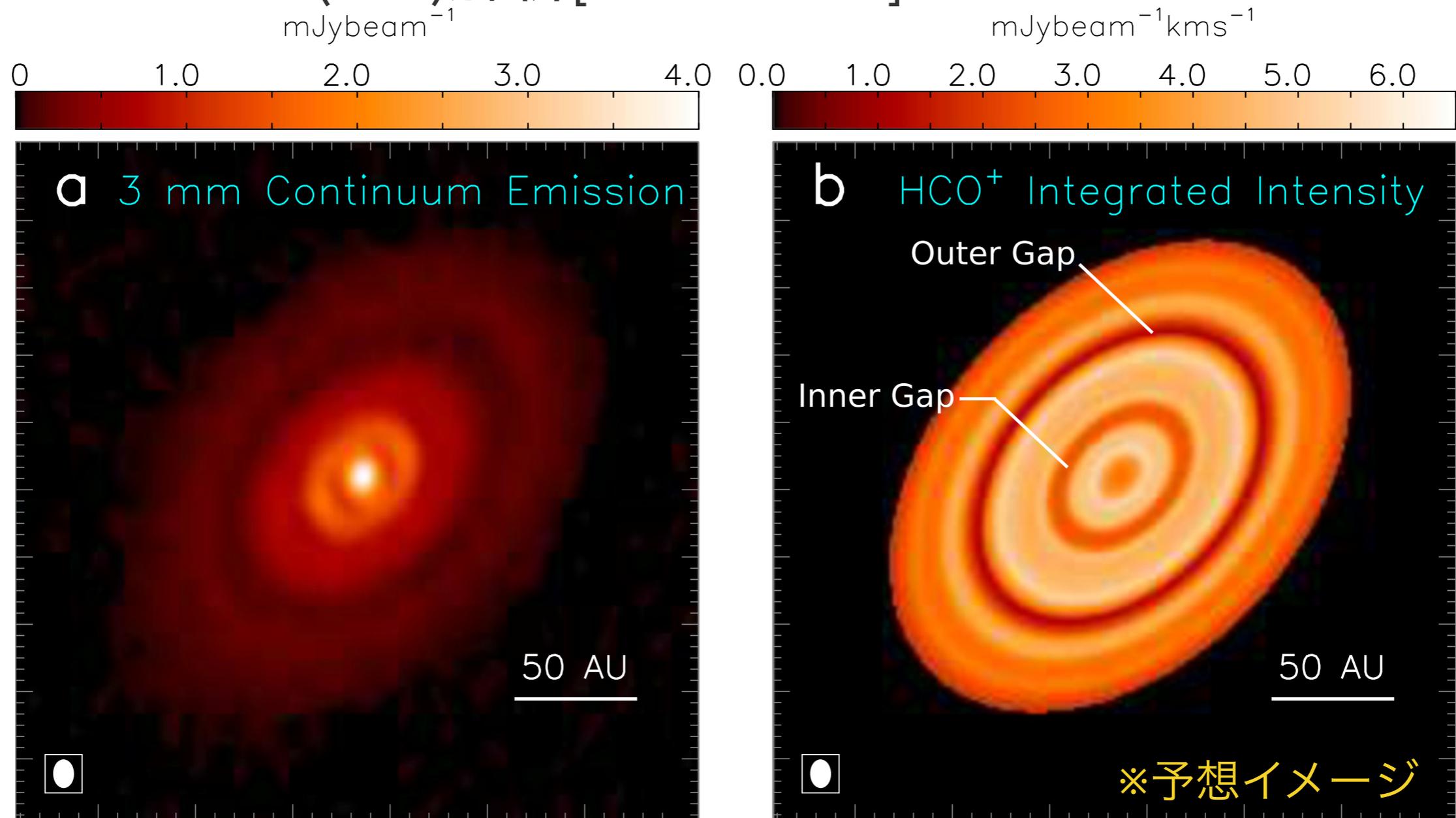
- 惑星による形成 [e.g, Kanagawa+2015,2016]



- 惑星を用いないメカニズム
  - Secular GI [Takahashi&Inutsuka 2014,2016]
  - Rapid pebble growth [Zhang+2015]
  - Sintering [Okuzumi+2016]

# ダストギャップ周囲のガス分布は？

HL TauのHCO<sup>+</sup>(1-0)解析[Yen+2016]

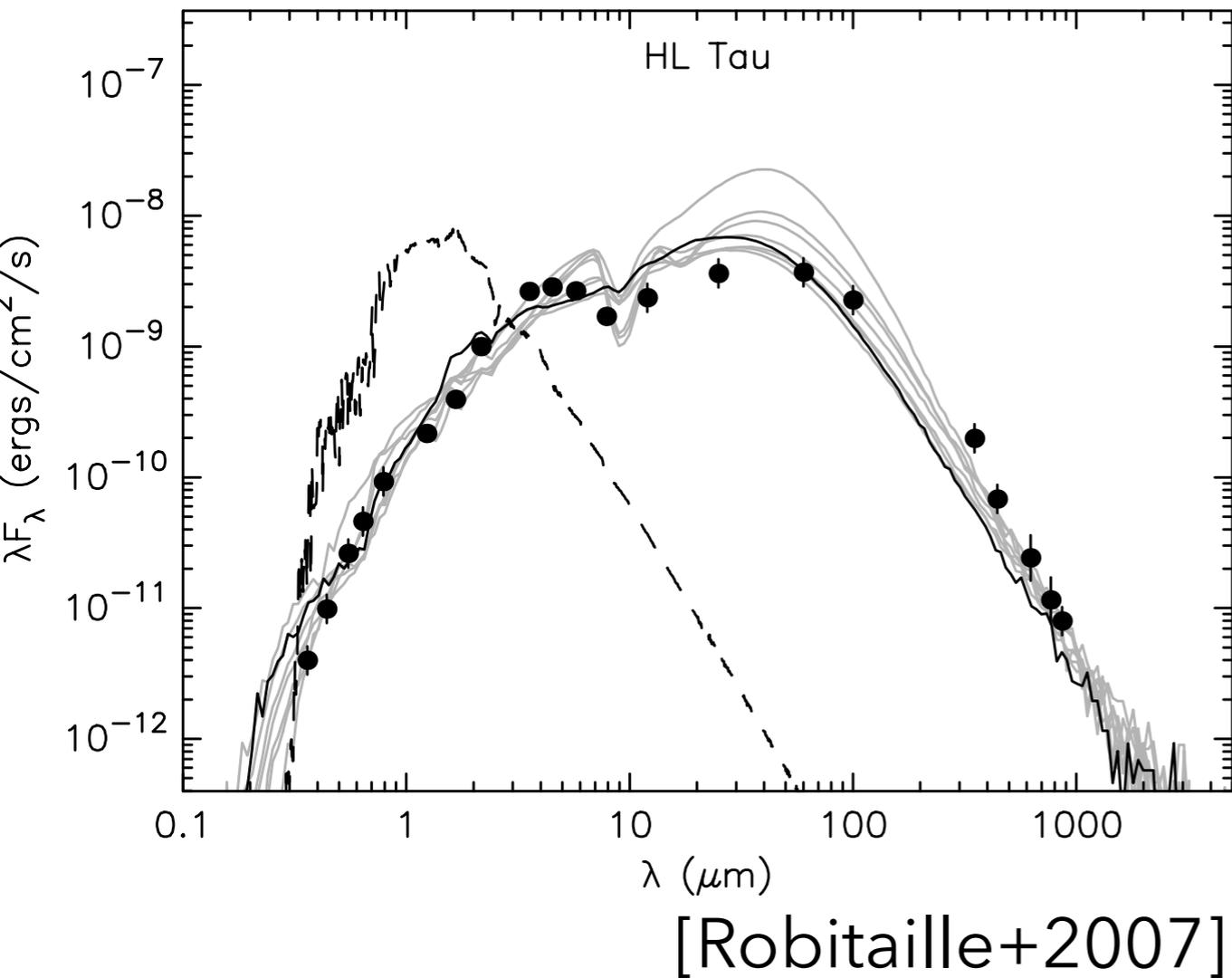


- 明瞭なイメージの検出には至っていない

ガスの定量は今後の課題

# HL Tauは若い原始星的天体

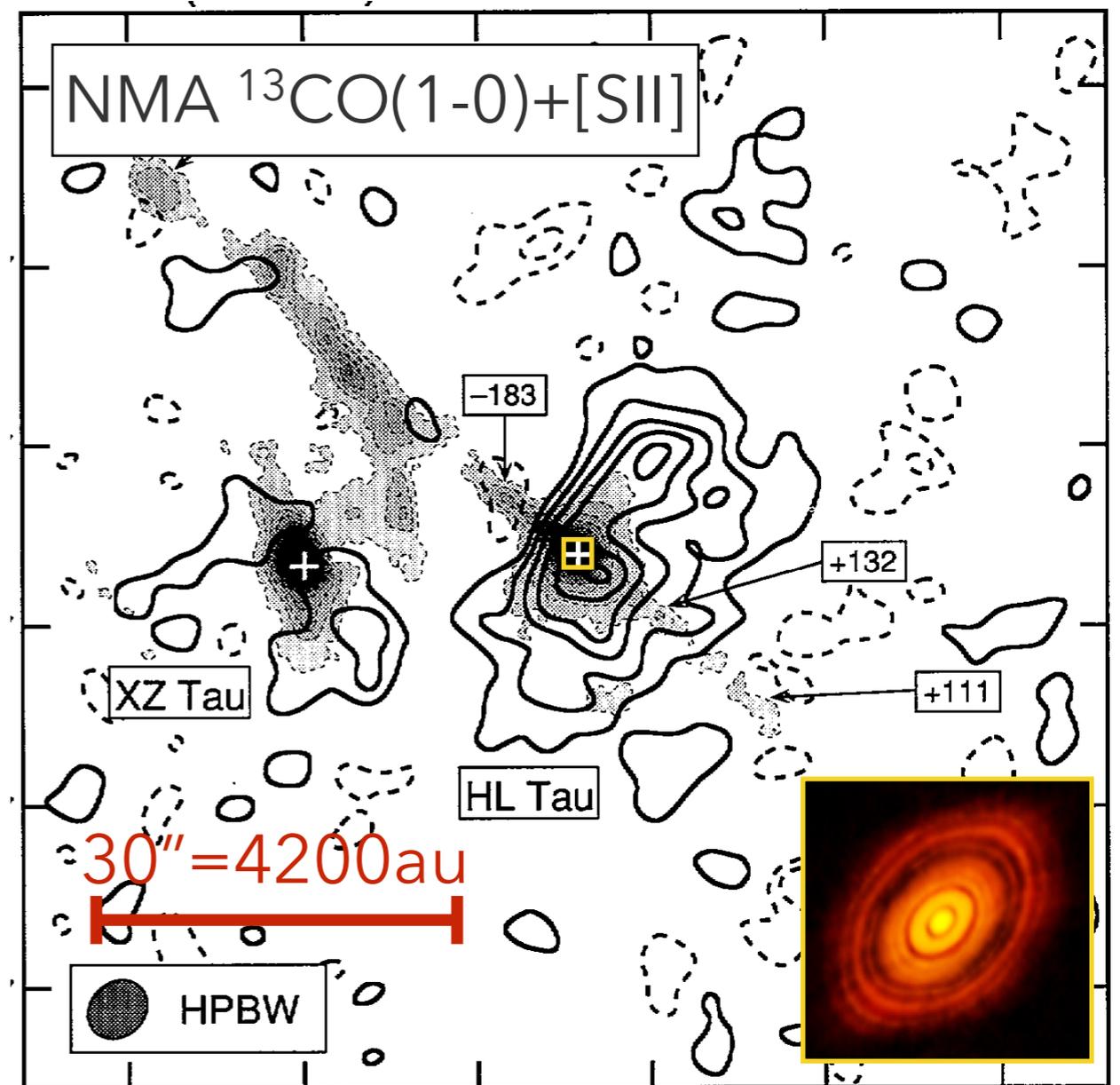
## Flat spectrum SED



もし惑星起源なら

**t < 1 Myr での惑星形成を示唆**

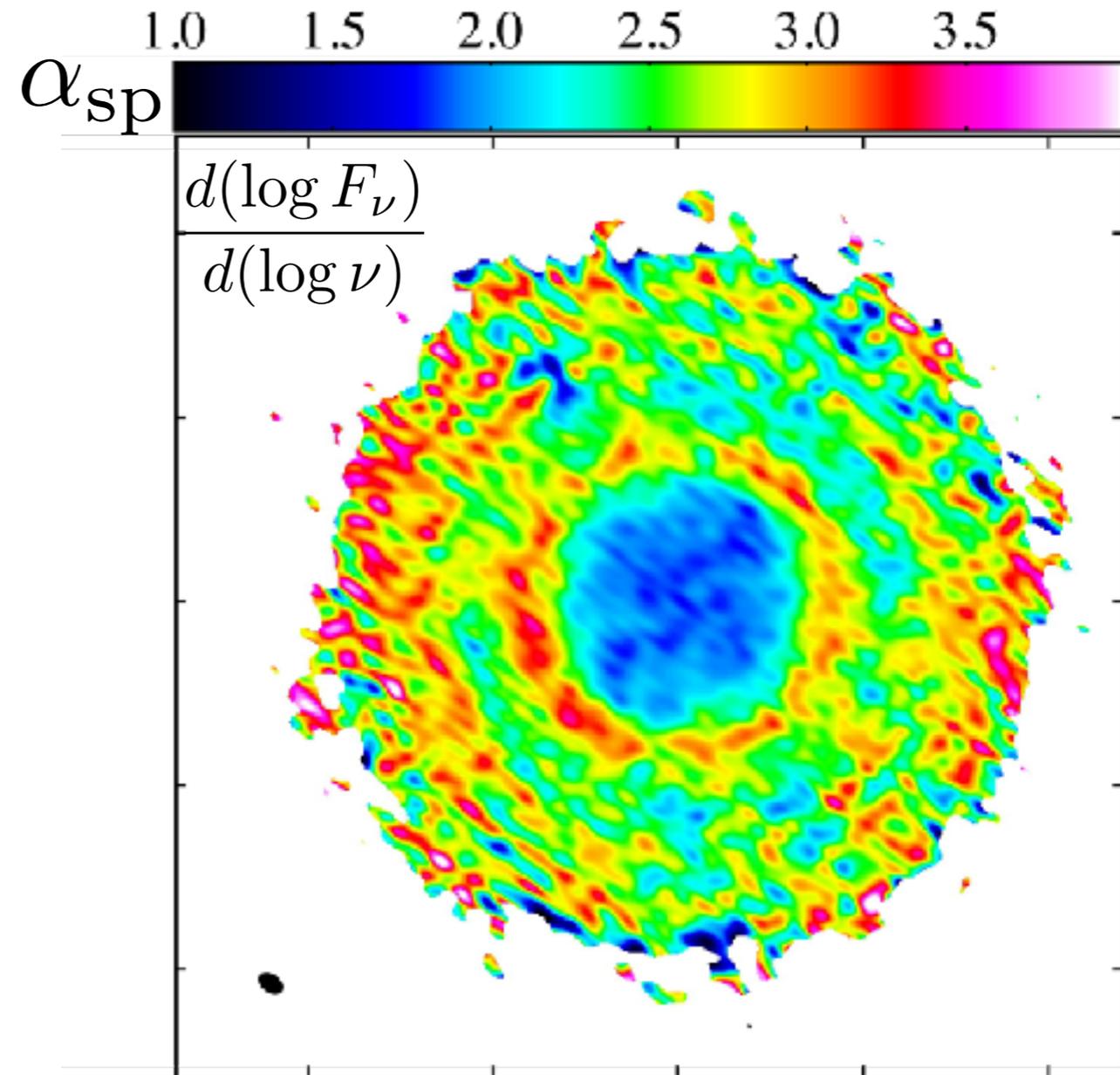
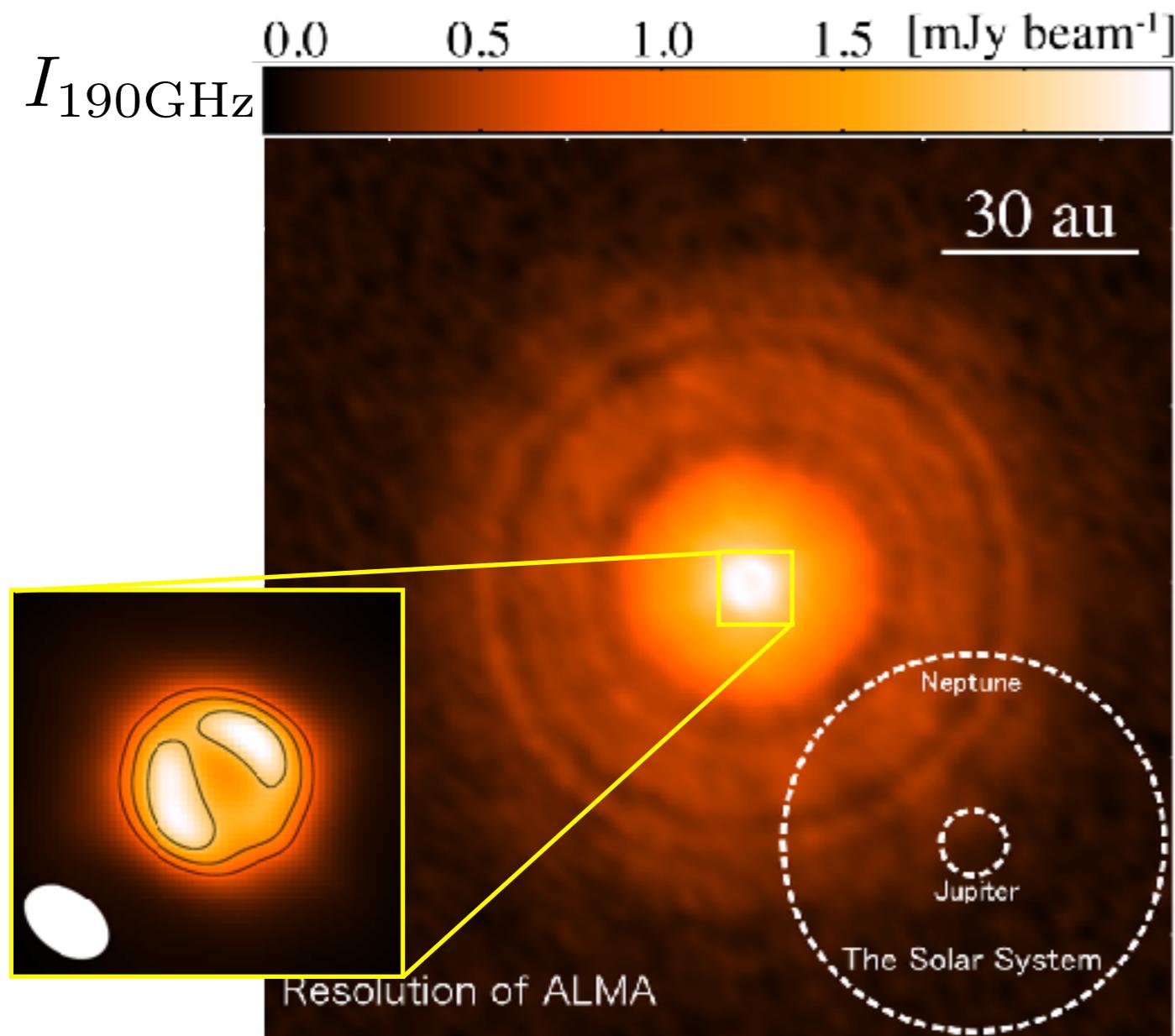
## Infalling envelope+optical jets



[Hayashi+1993]

# “原始惑星系円盤”でのギャップ: *TW Hya* (~10 Myr)

Band 4&6による観測(~3au分解能): [Tsukagoshi+2016]



- 多重ダストリング(ギャップ) [e.g., Andrews+2016(Band7)]
- ギャップ位置(22au)で $\alpha_{\text{peak}} \sim 3.0$

# 光学的厚み $\tau$ とダストオパシティインデックス $\beta$

$$I_\nu(R) = B_\nu(T_d(R)) (1 - \exp[-\tau_\nu])$$

$$\begin{aligned} \alpha(R) &\equiv \frac{d \log(I_\nu)}{d \log \nu} \\ &= 3 - \frac{T_0}{T_d(R)} \frac{e^{T_0/T_d(R)}}{e^{T_0/T_d(R)} - 1} \\ &\quad + \beta(R) \frac{\tau_\nu(R)}{e^{\tau_\nu(R)} - 1} \end{aligned}$$

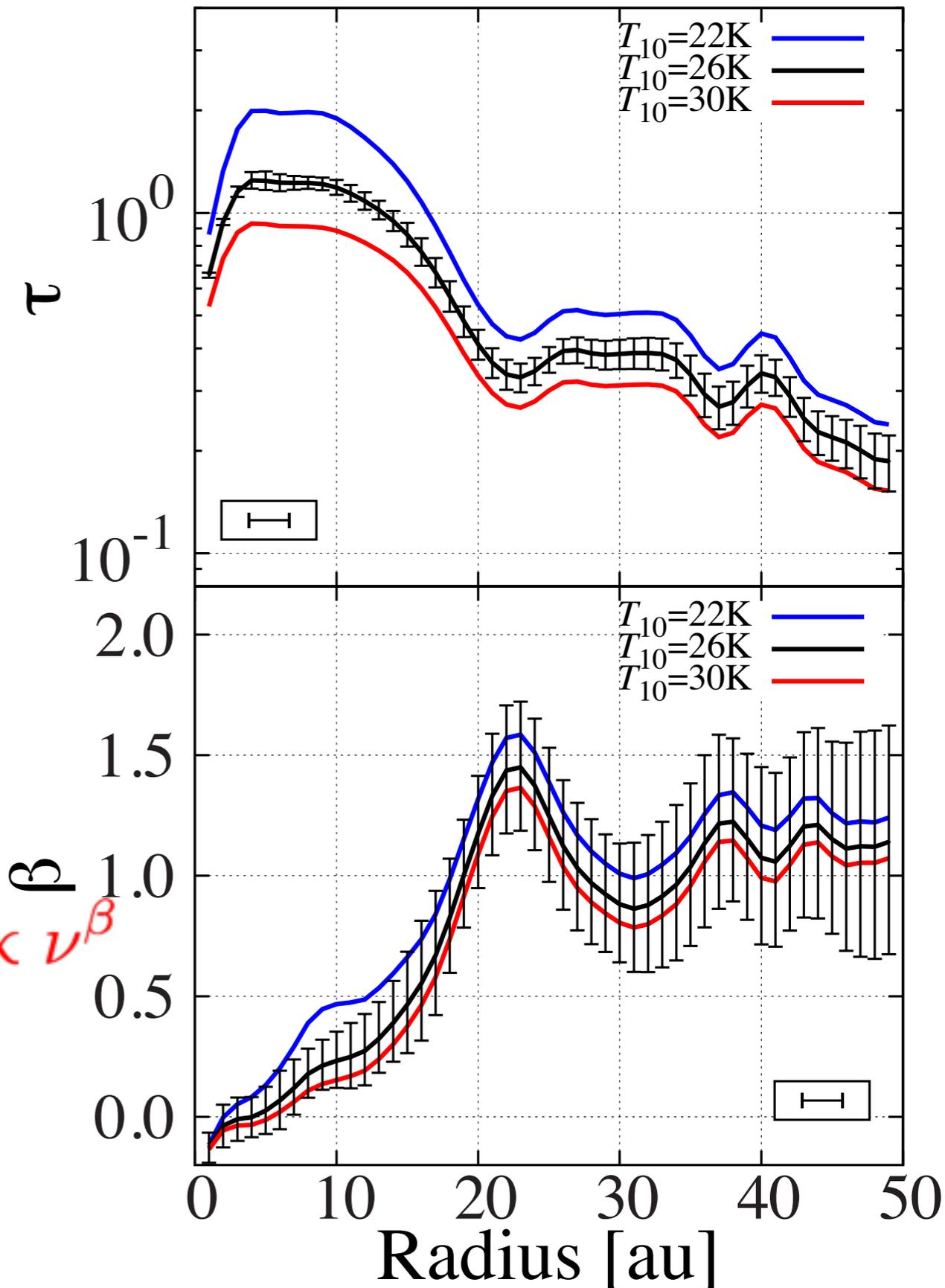
22auギャップ内で大きい

ダスト(~mm)が欠乏

$$\kappa_\nu \propto \nu^\beta$$

惑星によるdust filtration効果

[e.g. Zhu+2012]と整合



# ギャップの幅-深さ関係から惑星質量を見積もる

- 惑星質量に対するギャップ幅と深さの関係

[Kanagawa+2015,2016]

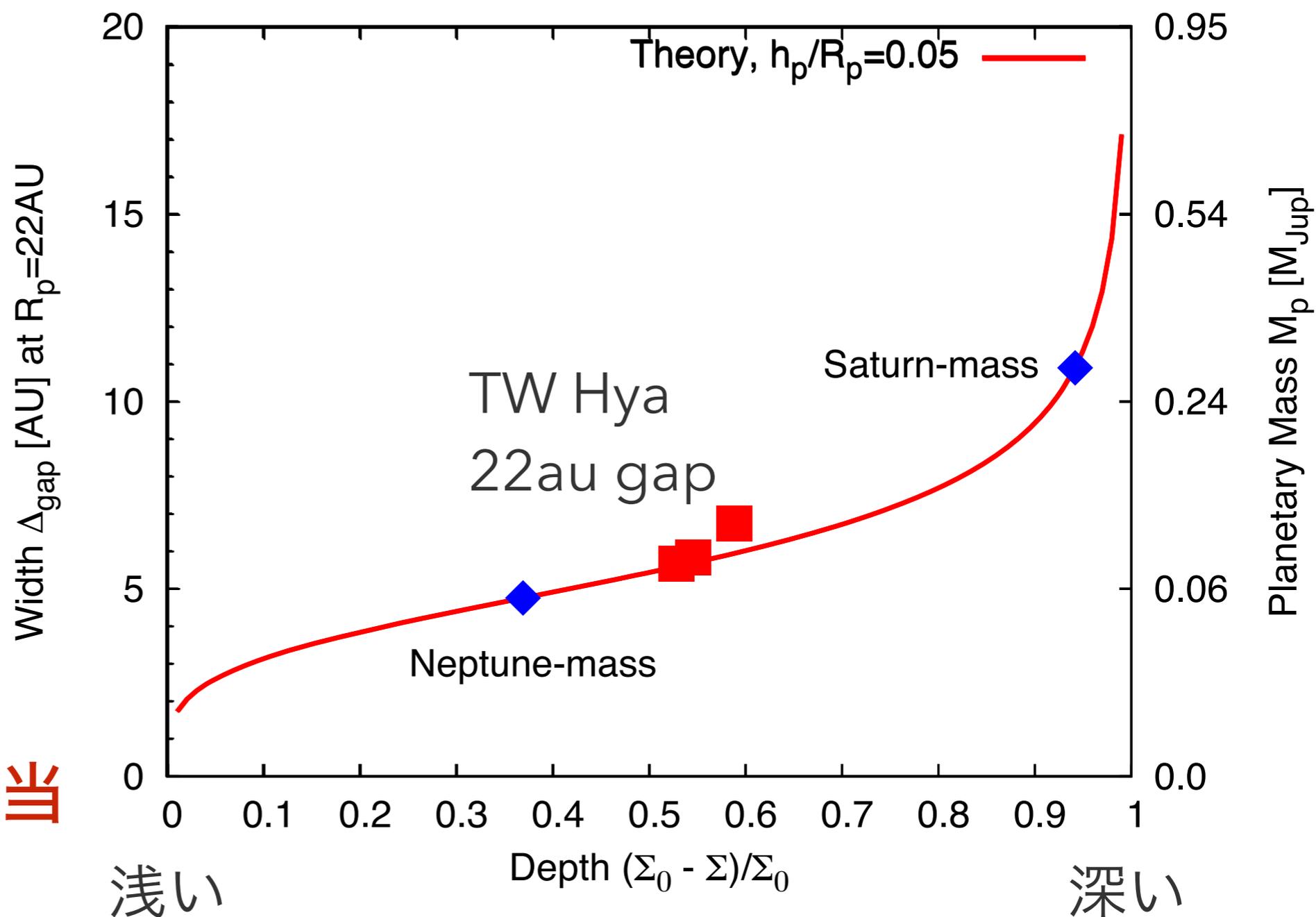
$$\frac{\Sigma_{\min}}{\Sigma_0} = \frac{1}{1 + 0.04K}$$

$$K = \left(\frac{M_p}{M_*}\right)^2 \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^{-5} \alpha^{-1}$$

$$\frac{\Delta_{\text{gap}}}{R_p} = 0.41K'^{1/4}$$

$$K' = K \left(\frac{h_p}{R_p}\right)^2$$

~ $M_{\text{Nep}}$ の惑星に相当



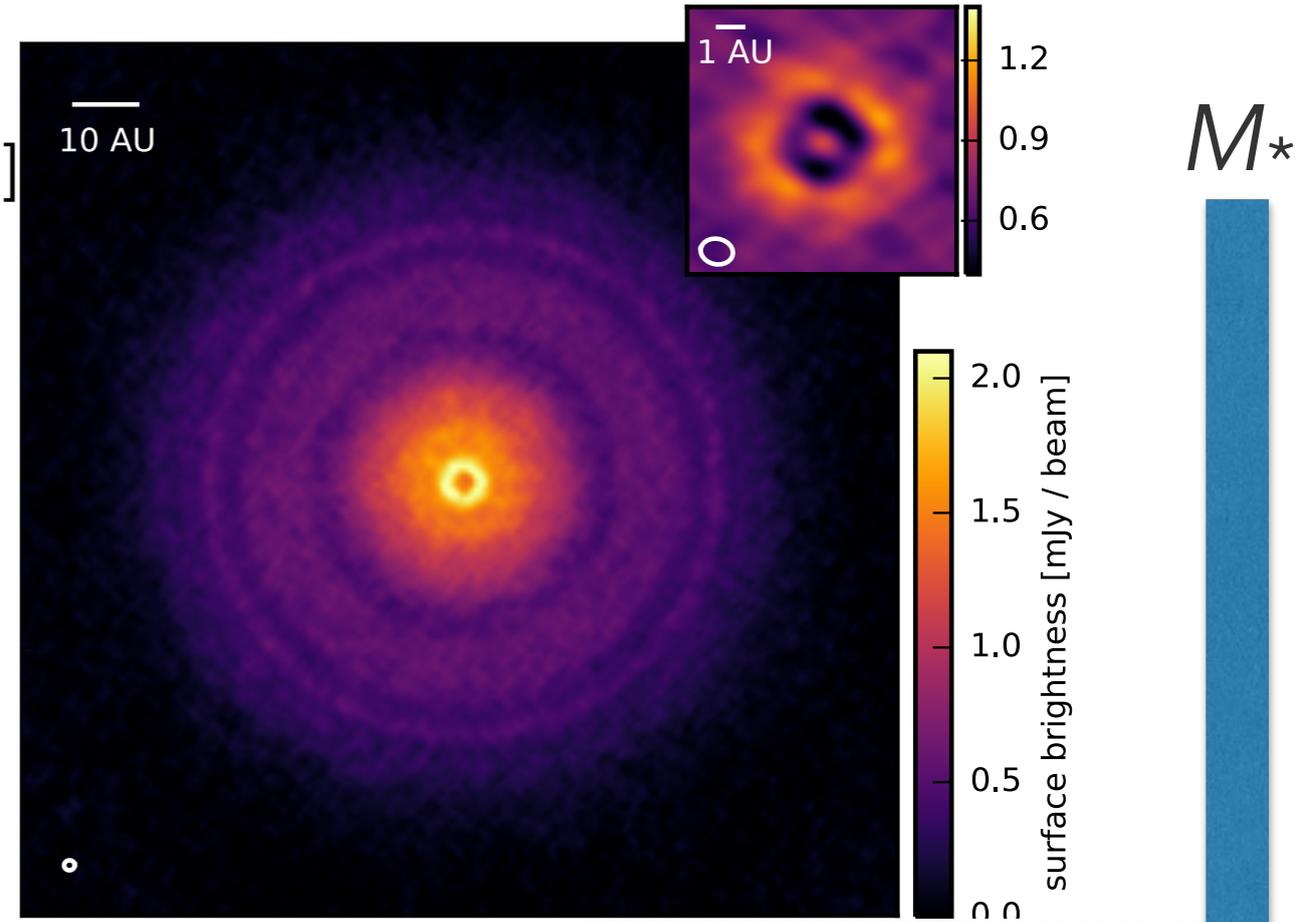
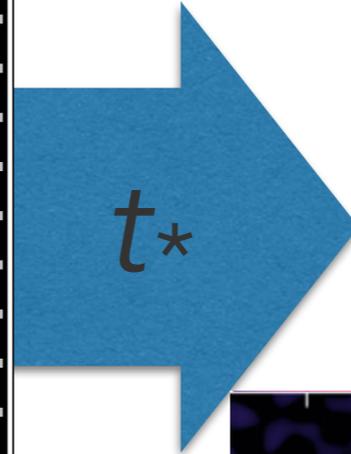
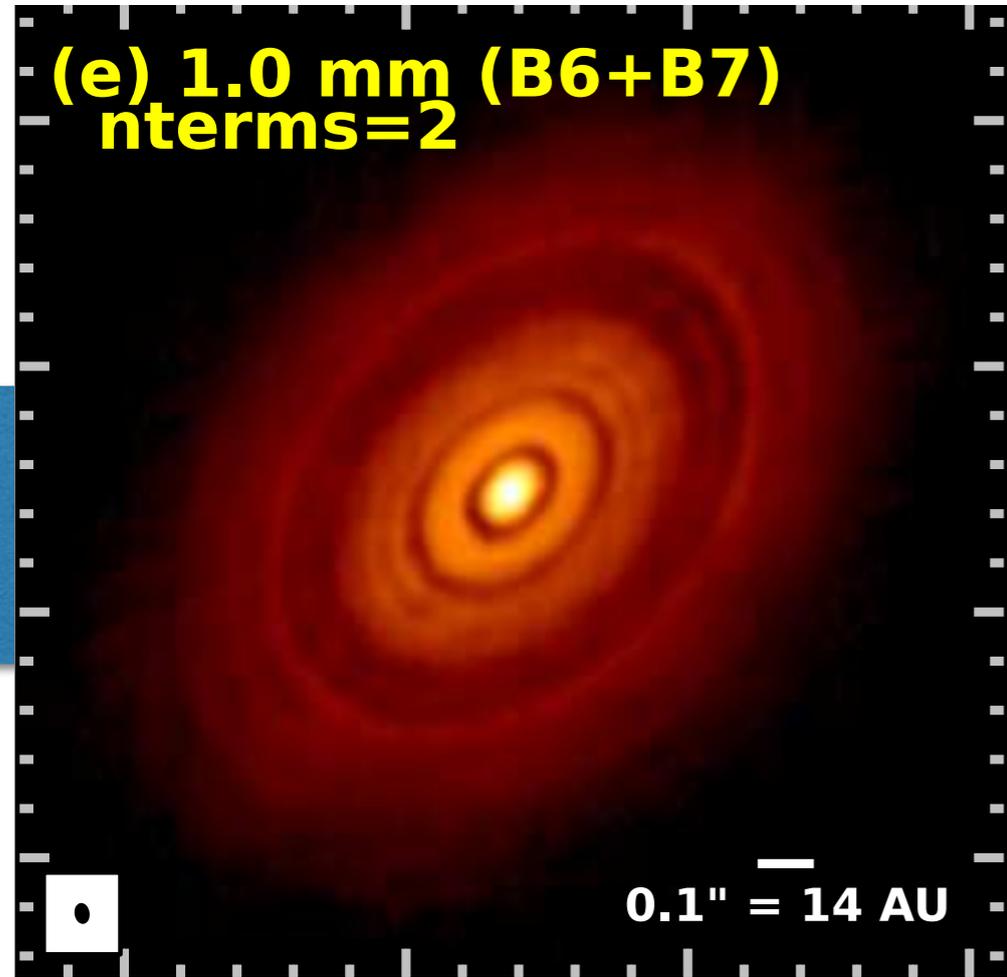
# ALMAで検出されたダストリング/ギャップ

HLTau

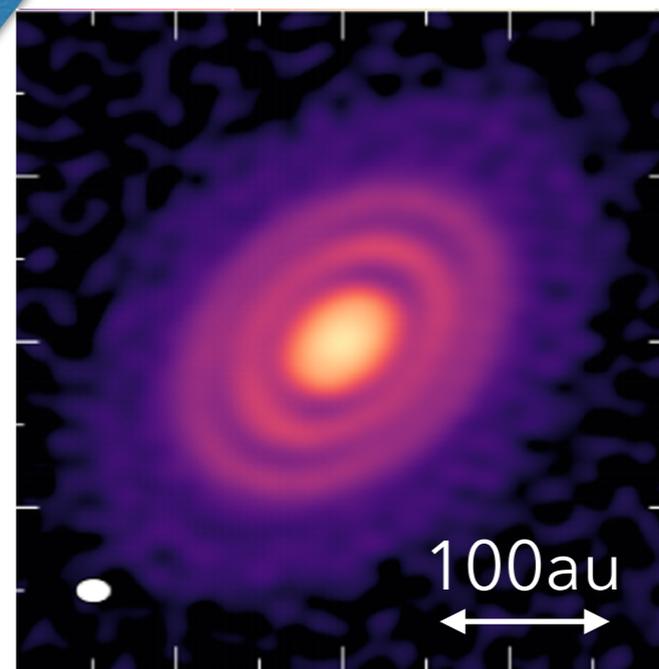
[ALMA Partnershp+2015]

TW Hya

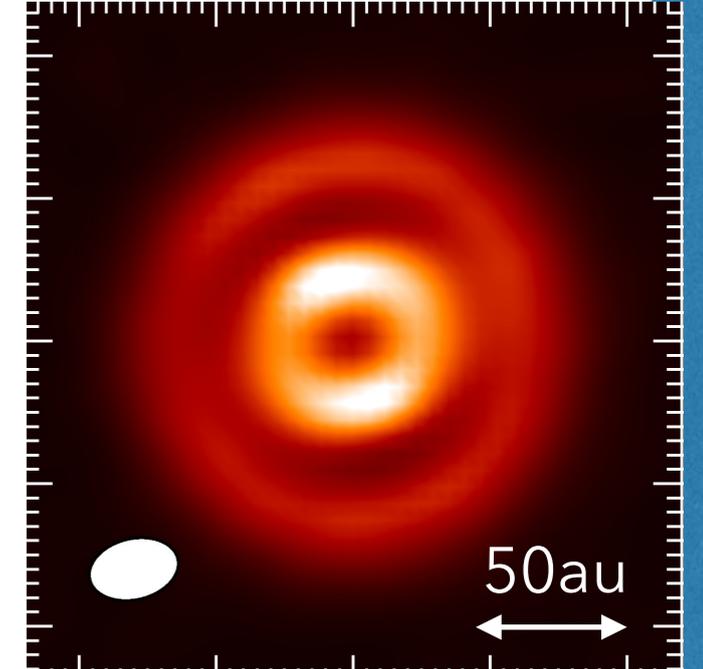
[Andrews+2016]



- サンプルの拡張が必要  
(特に比較的若い低質量星)



HD163296  
[Isella+2017]



HD169142  
[Fedele+2017]

ダスト穴構造を持つ円盤

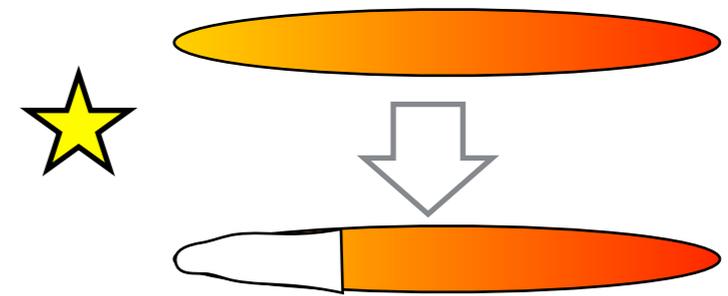
(遷移円盤)

# 遷移円盤

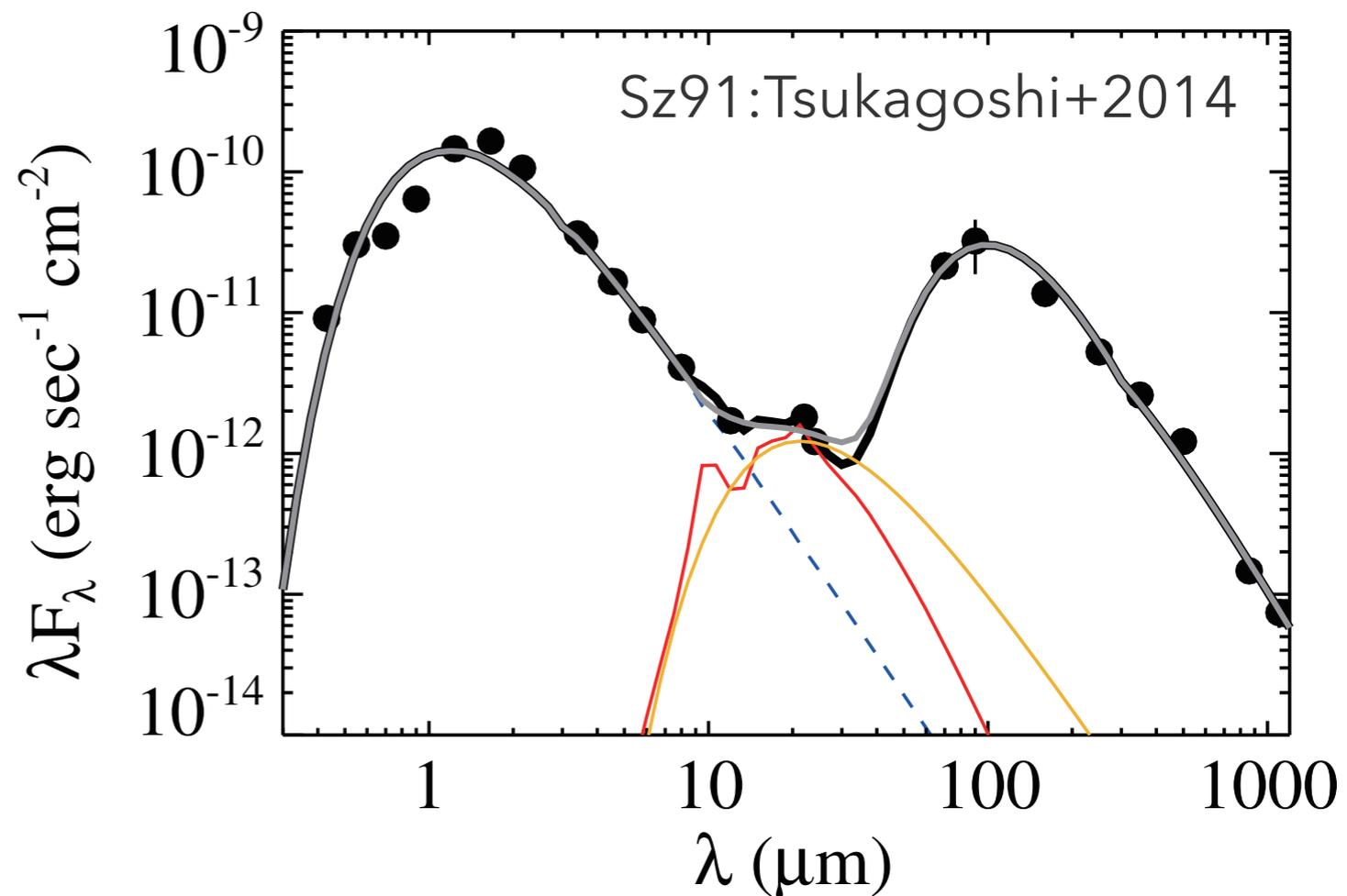
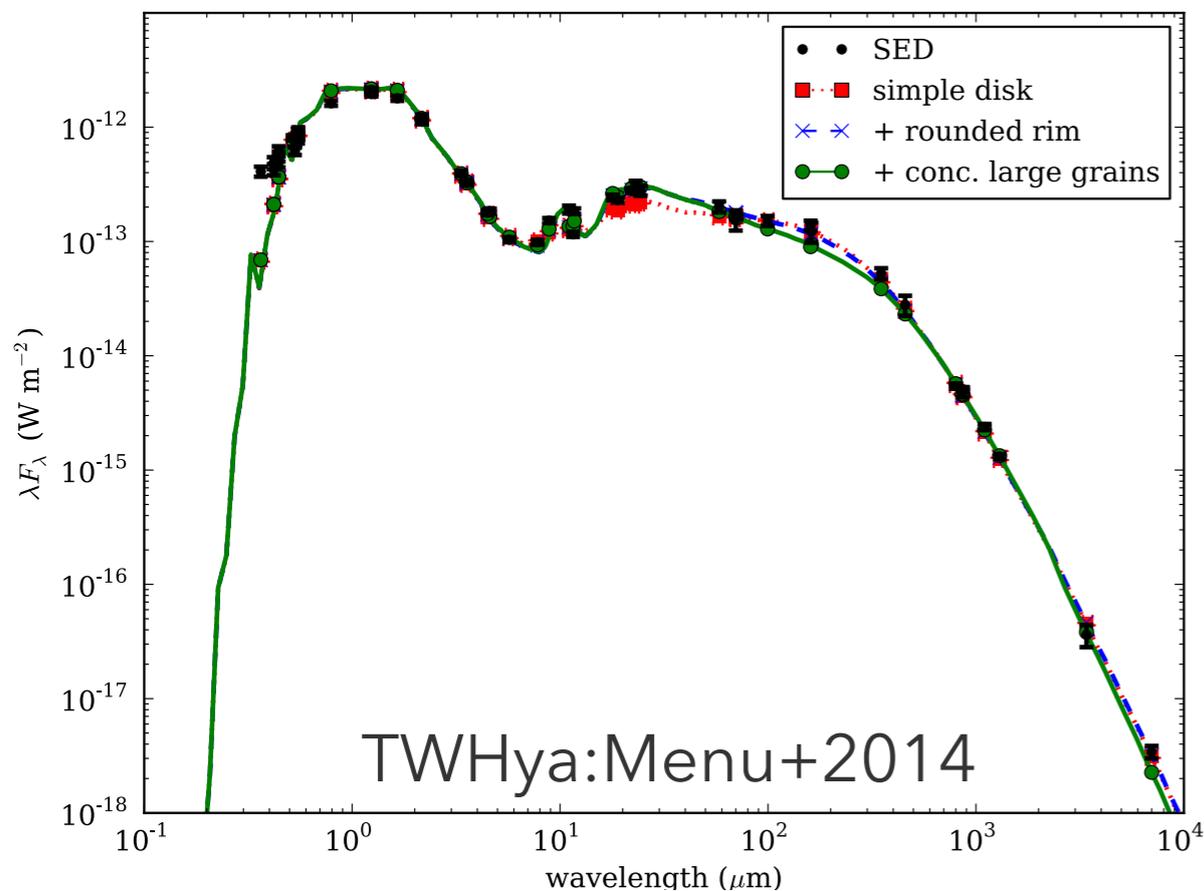
- SEDで近赤外~中間赤外にギャップが存在

=>円盤内側の穴構造に対応

- Class II -> IIIにかけての遷移段階



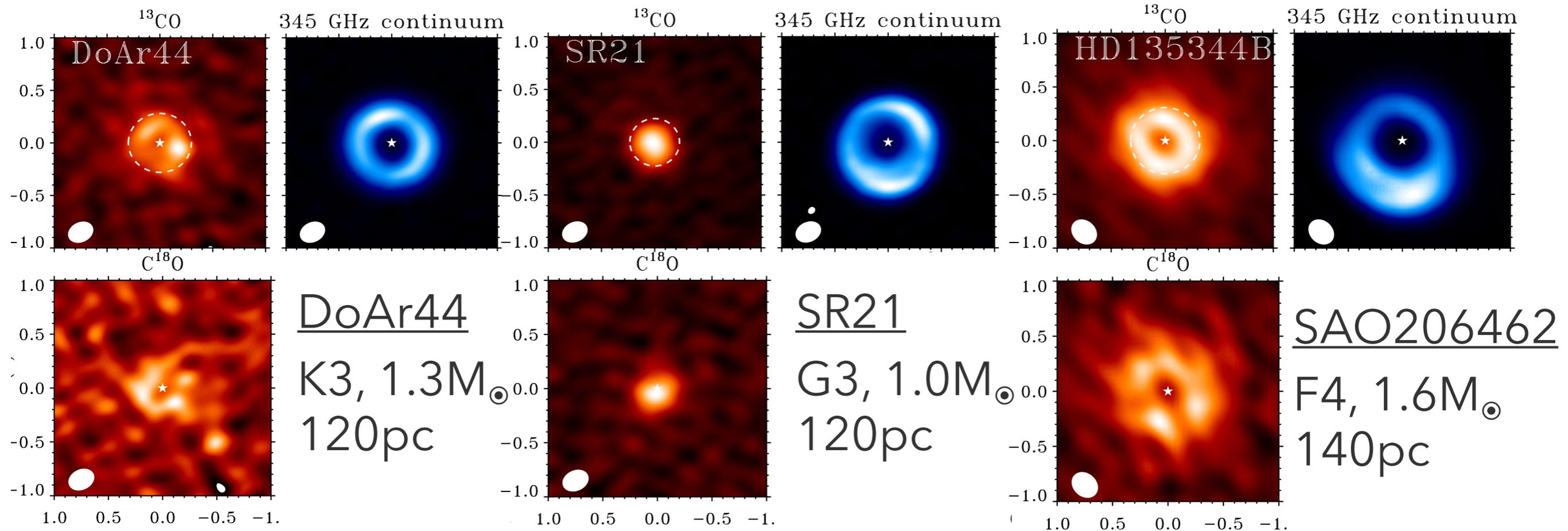
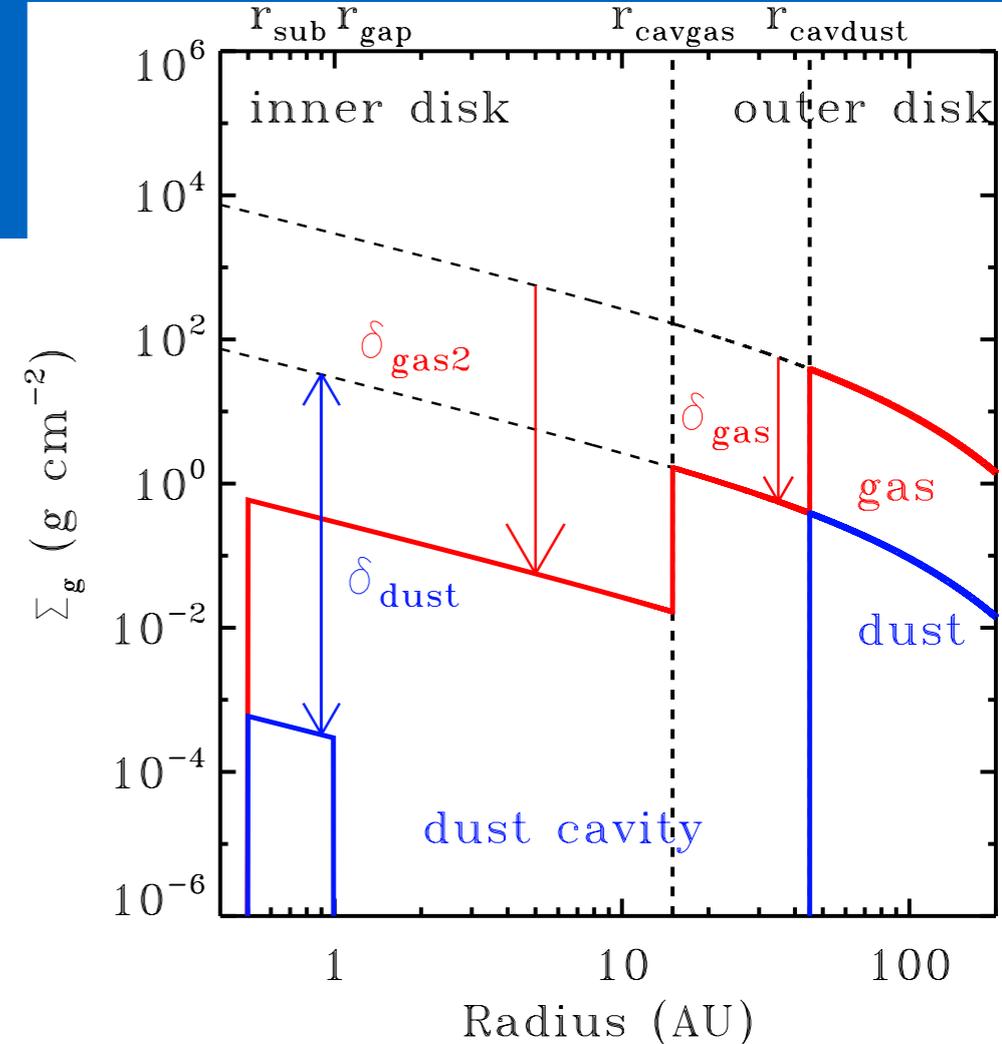
円盤進化・惑星系形成の理解へのキ一天体



# 遷移円盤の系統的研究

[van der Marel+2016(4天体), 2015a(6天体)]

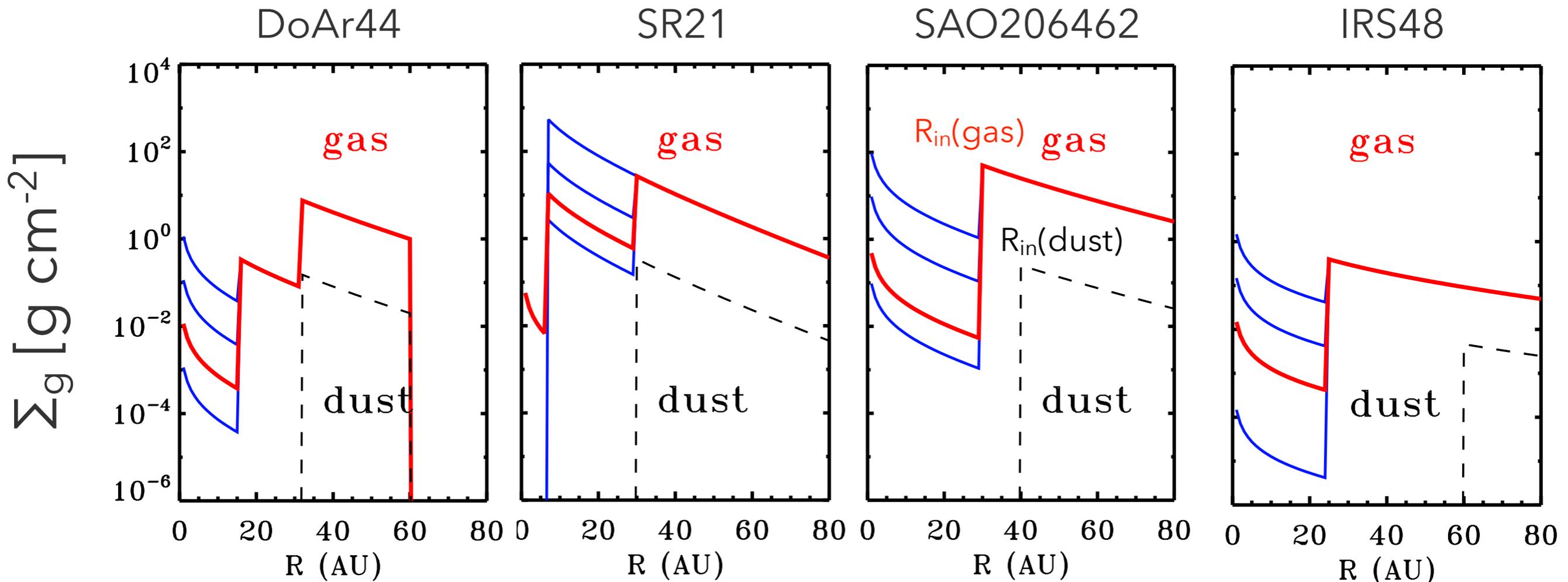
- $\Delta\theta \sim 0.2-0.3''$ , 連続波+分子輝線放射
- 円盤モデルを与え放射輸送計算
  - $T_{\text{gas}} \neq T_{\text{dust}}$
  - 画像, スペクトル, SEDを合わせる



# 遷移円盤の系統的研究

[van der Marel+2016(4天体), 2015a(6天体)]

- ダスト  $R_{in} >$  ガス  $R_{in}$
  - ガスギャップ  $\Delta\Sigma_{gas} = 10^{-2} \sim 10^{-4}$
  - $\Delta\Sigma_{dust} < \sim 10^{-4}$
  - $< M_J$  の惑星を示唆 [e.g, Kanagawa+2015]
- ガスも deplete**  
**ダストよりコントラスト小**



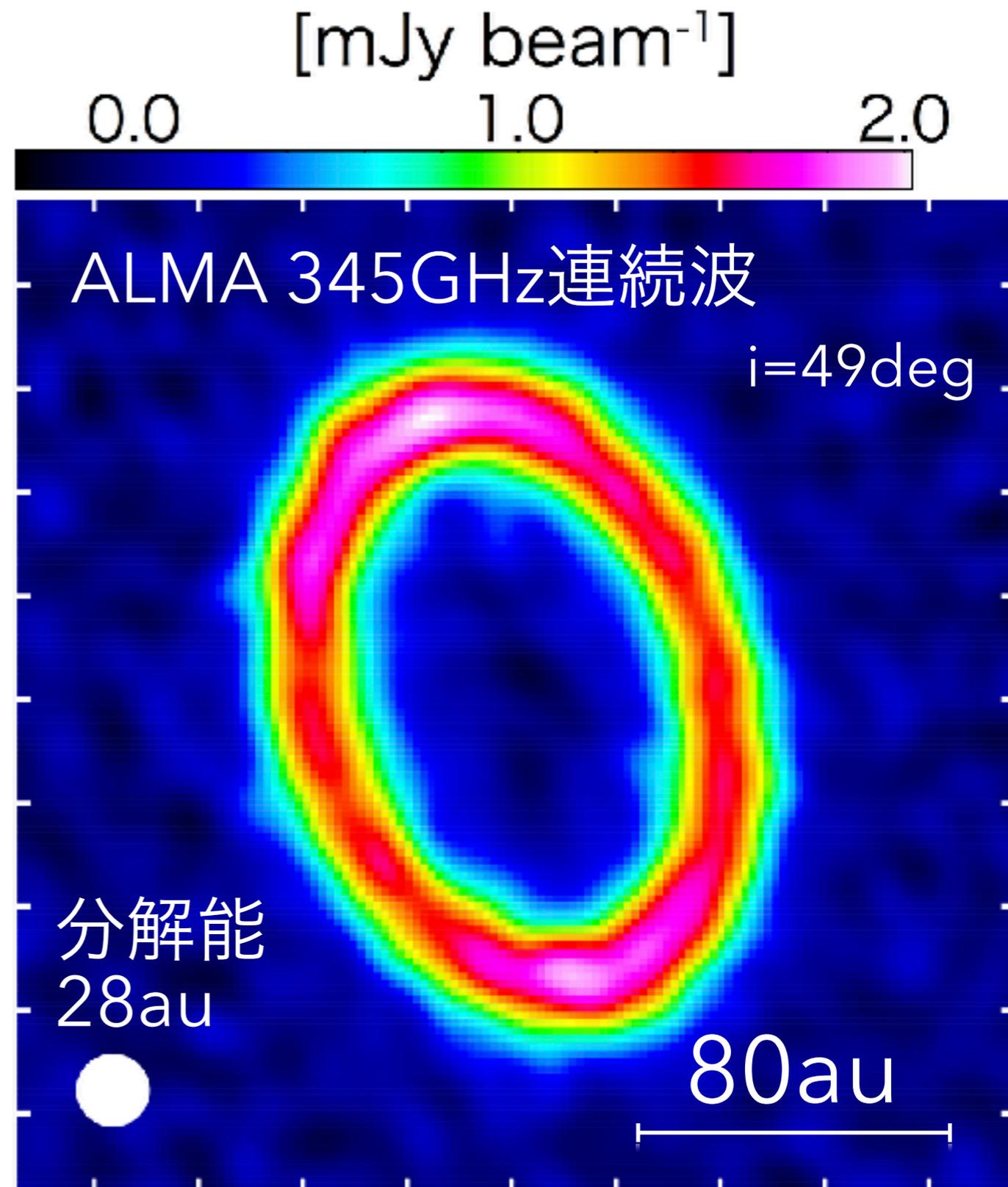
# Sz 91: リング状遷移円盤

[Tsukagoshi+in prep.]

- Sz 91
  - $0.49M_{\odot}$ , 5Myr
  - Class III (no NIR excess)
- 穴内にサブミリ放射なし
  - $<184 \text{ Jy/b}$  ( $M_{\text{dust}} \sim 0.03M_{\text{earth}}$ )
- NIRと異なった分布(Rin)

圧カバンプでのmmダスト

ト集積を示唆



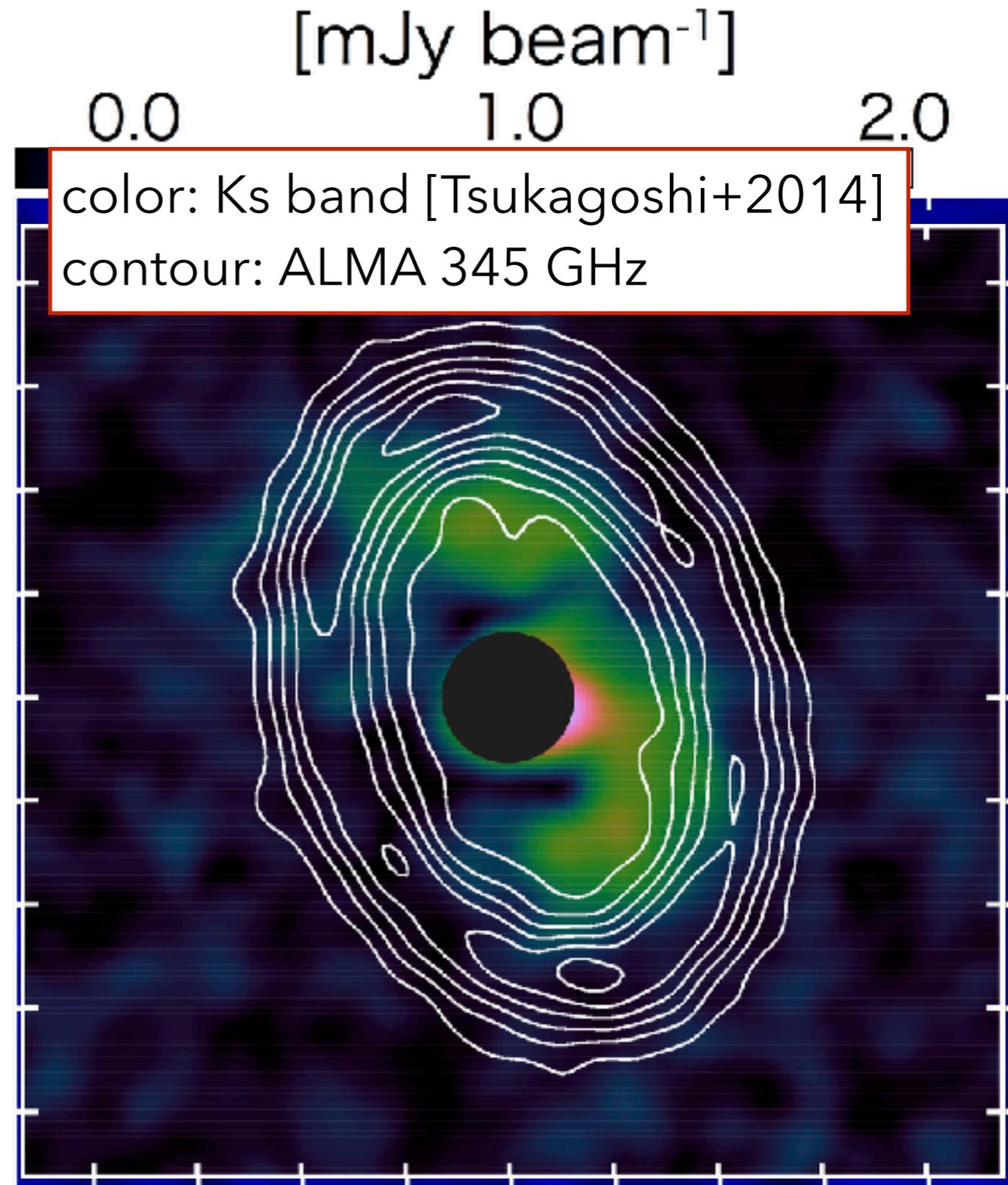
# Sz 91: リング状遷移円盤

[Tsukagoshi+in prep.]

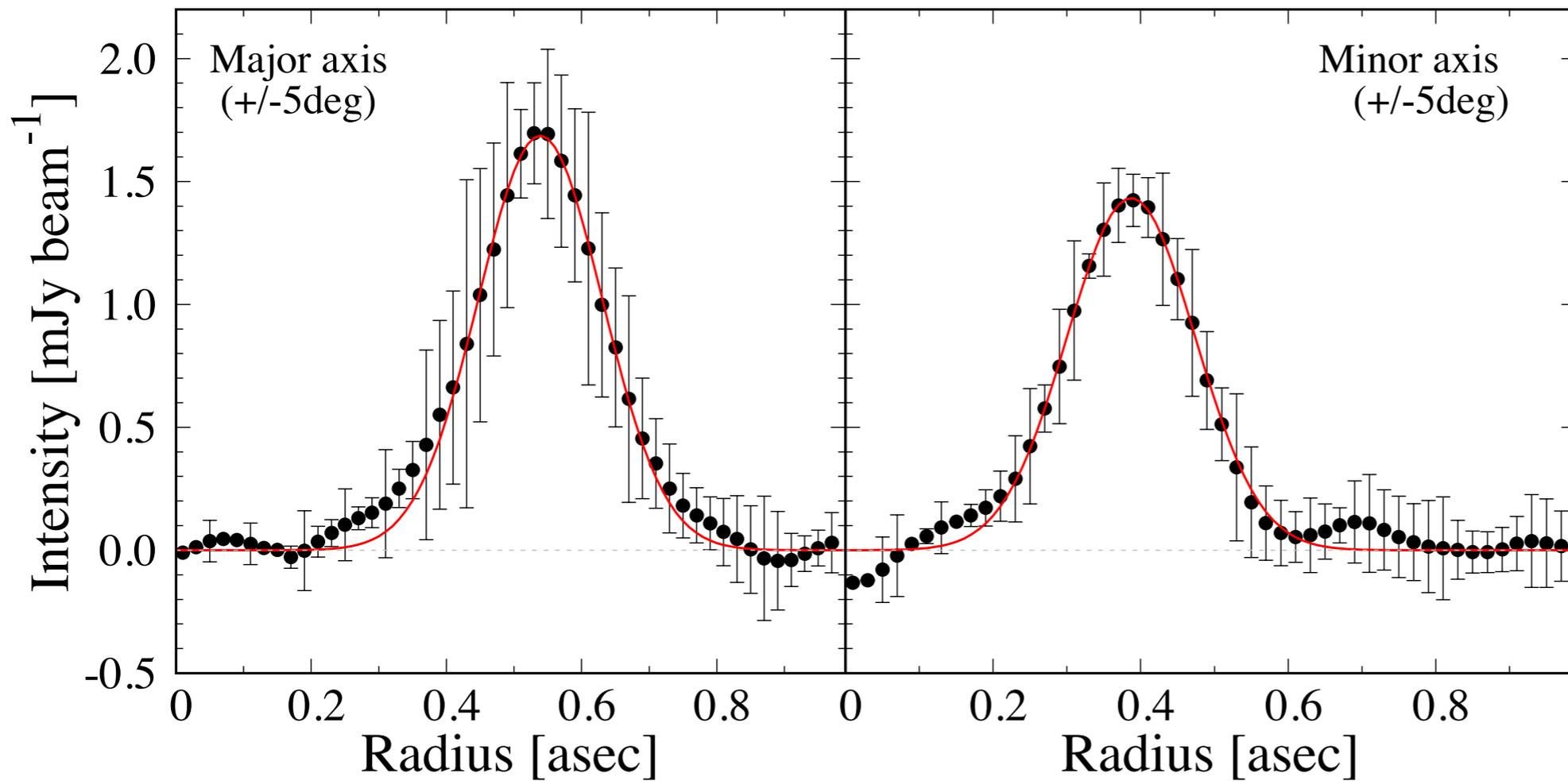
- Sz 91
  - $0.49M_{\odot}$ , 5Myr
  - Class III (no NIR excess)
- 穴内にサブミリ放射なし
  - $<184 \text{ Jy/b}$  ( $M_{\text{dust}} \sim 0.03M_{\text{earth}}$ )
- NIRと異なった分布(Rin)

圧カバンプでのmmダス

ト集積を示唆



# 動径方向プロファイル

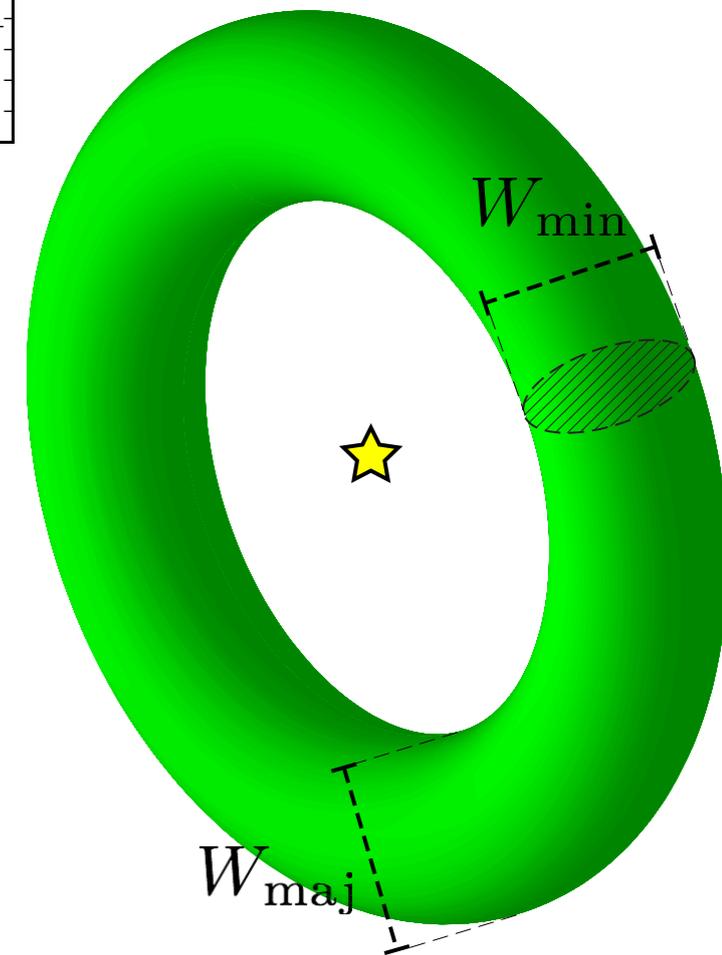


- Deconv. size
  - $W_{\text{maj}}=156\text{mas}$
  - $W_{\text{min}}=150\text{mas}$

$W_{\text{maj}} \sim W_{\text{min}} \Rightarrow$  円盤はトーラス状

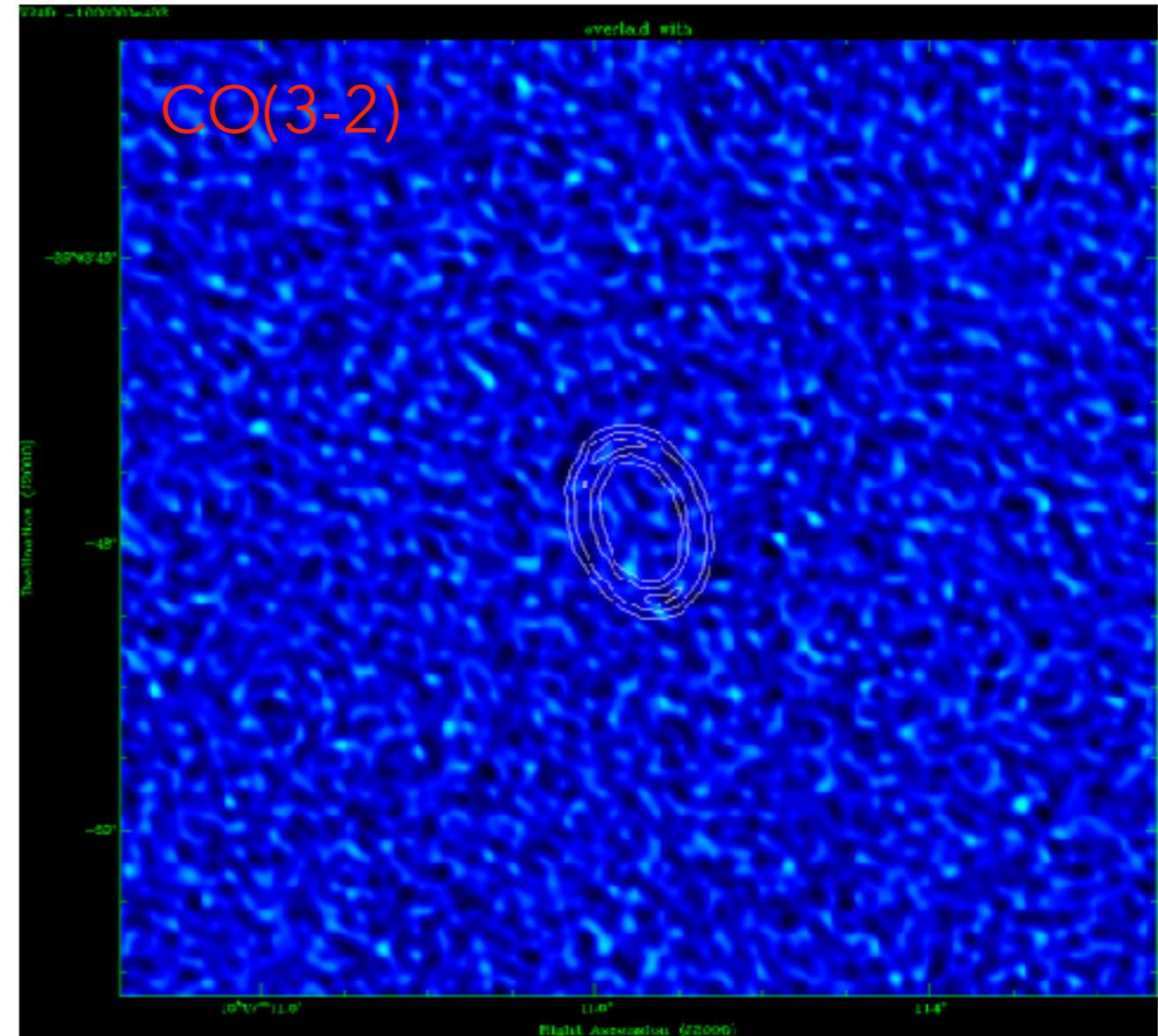
- $h_d \sim 12.4\text{au}@120\text{au}$  ( $h_g \sim 16\text{ au}$ )
- Full diskと同程度[e.g., IM Lup; Pinte+2008]

Full disk  $\rightarrow$  遷移円盤の過程で沈殿しない?  
or ダストが巻き上げられている?

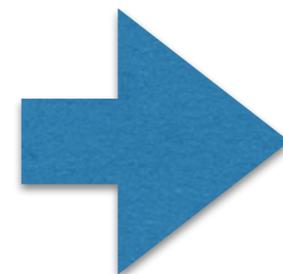


# CO(3-2)チャンネルマップ

- ガスは  $R_{in} \sim 10$  auまで分布
    - $V=0.0 \sim 8.8$  km/s,  $inc.=49^\circ$
  - 2.8 km/s付近に複雑な構造
- 円盤表層の手前側/奥側からの放射を捉えている
- e.g. HD163296 [de Gregorio-Monsalvo+2013]



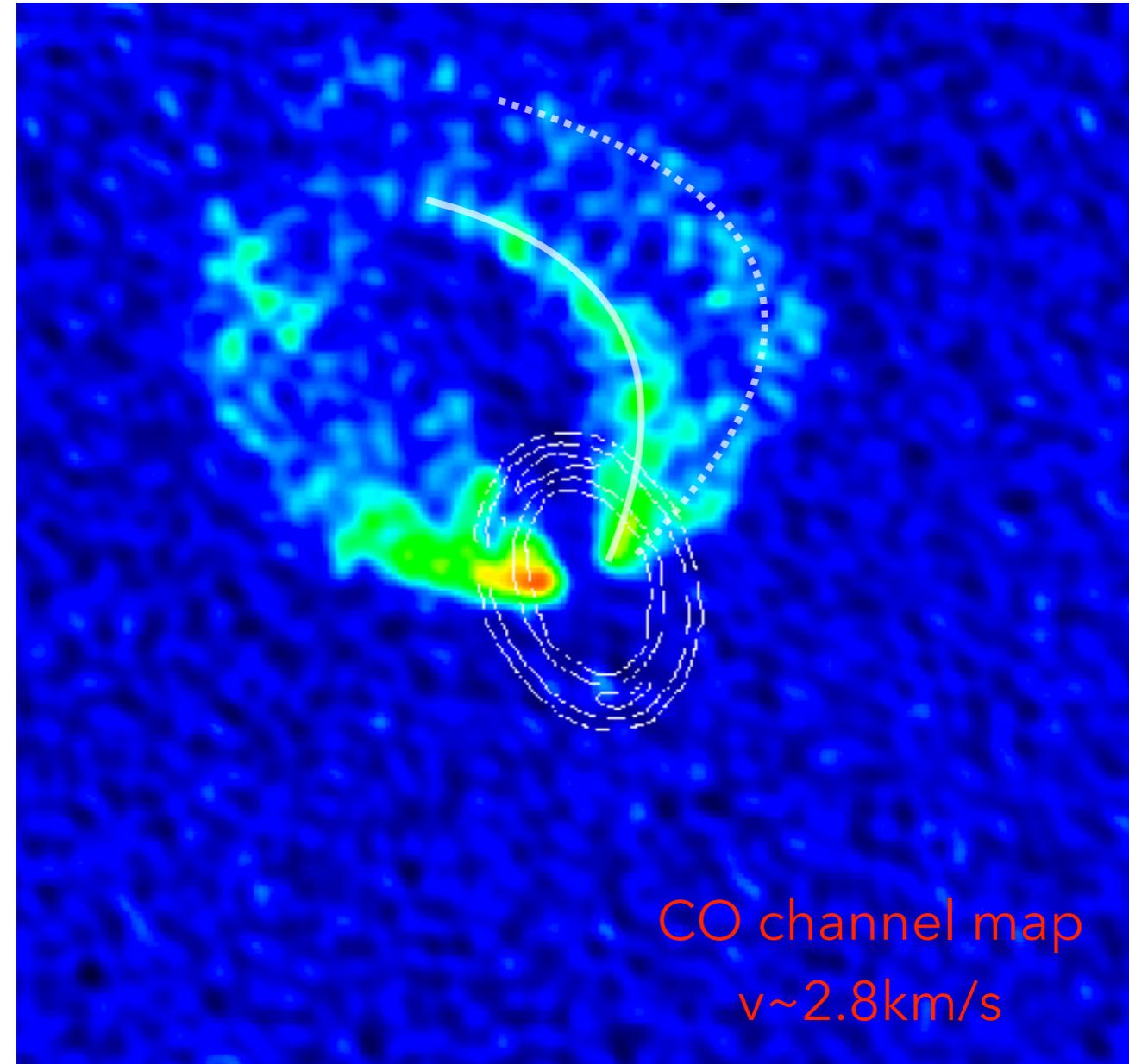
ダストトーラスか壁となり  
鉛直方向の温度勾配を作る



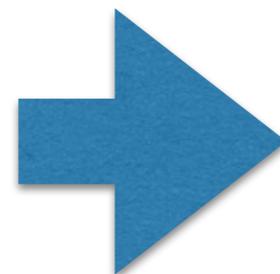
- 放射強度の低下
- 赤道面での自己吸収

# CO(3-2)チャンネルマップ

- ガスは  $R_{in} \sim 10$  auまで分布
    - $V=0.0 \sim 8.8$  km/s,  $inc.=49^\circ$
  - 2.8 km/s付近に複雑な構造
- 円盤表層の手前側/奥側からの放射を捉えている
- e.g. HD163296 [de Gregorio-Monsalvo+2013]



ダストトーラスか壁となり  
鉛直方向の温度勾配を作る

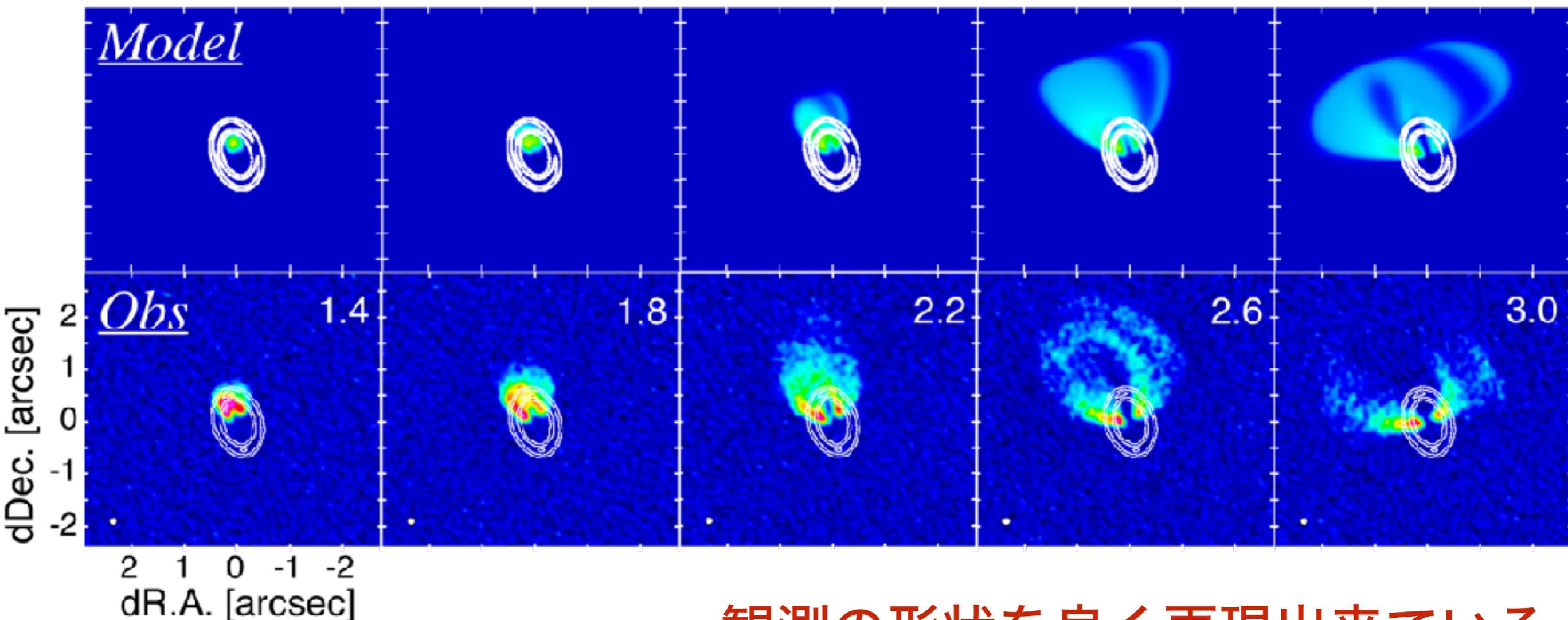


- 放射強度の低下
- 赤道面での自己吸収

# RADMC3Dによる放射輸送計算; CO(3-2)

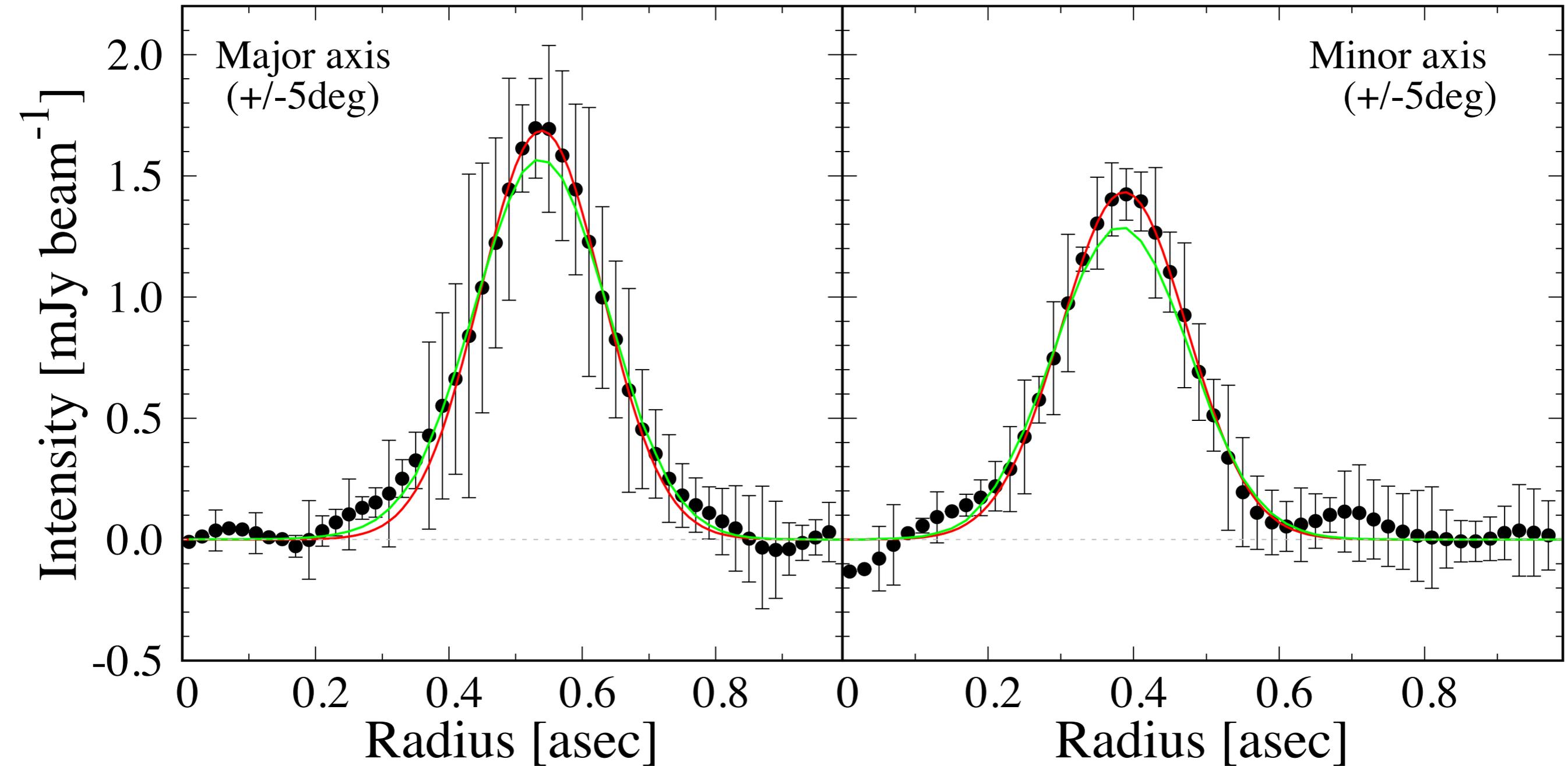
- ダストトーラスをモデル化し温度分布を計算
  - $a_{\max} = 1 \text{ mm}$  [Aikawa&Nomura+2006]
  - $T_{\text{dust}} = T_{\text{gas}}$
- ガスはtruncated disk ( $\Sigma \propto r^{-1.5}$ )

#観測の分解能でsmoothing



観測の形状を良く再現出来ている

# 連続波プロファイルの再現性

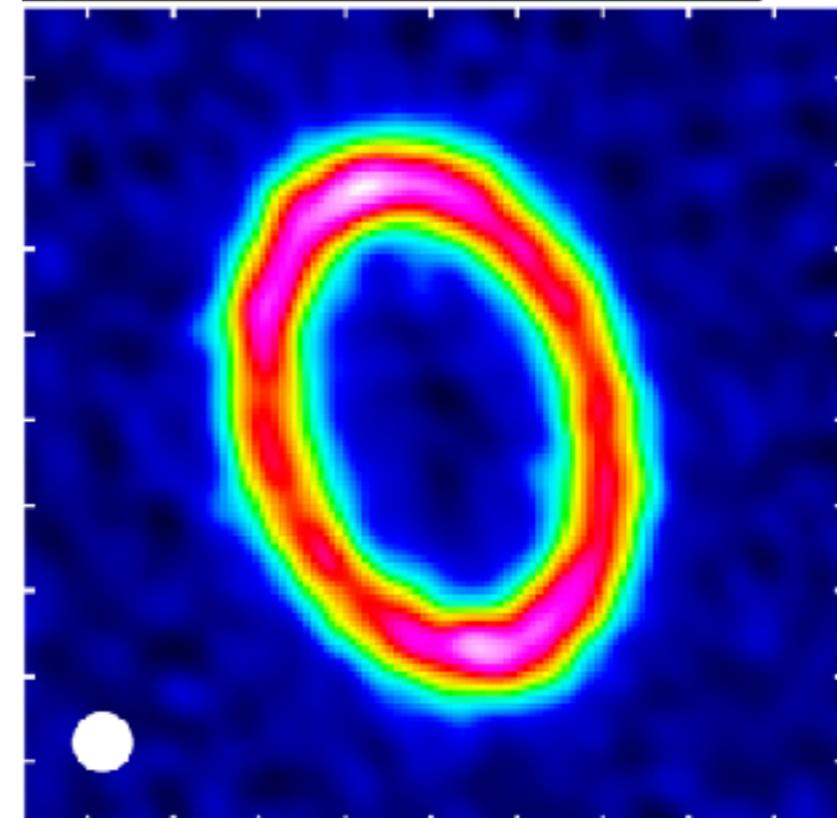
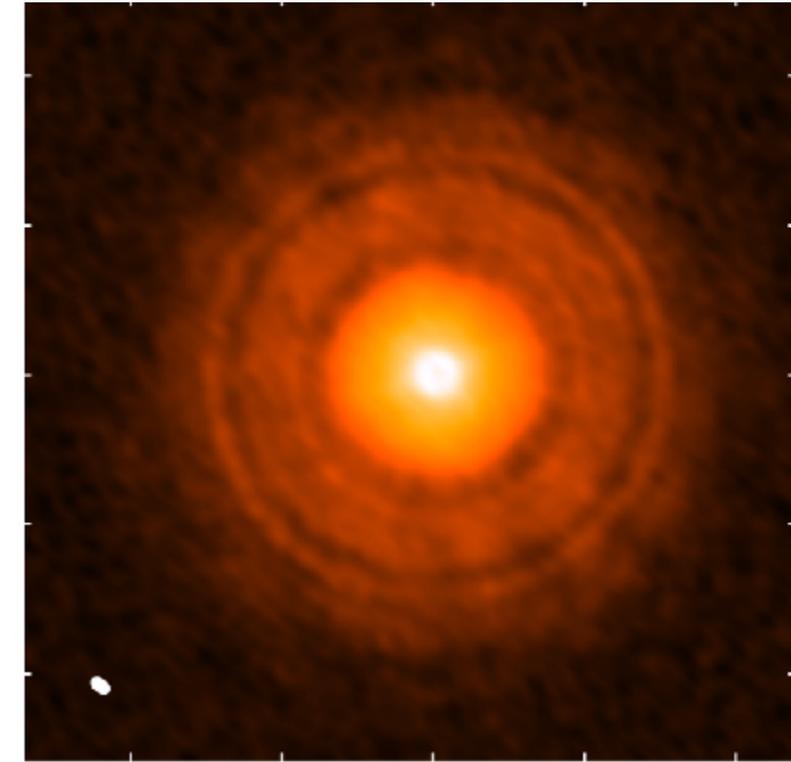


- $F_v = 45.4 \text{ mJy}$  ( $\sim$ obs.)
- 円盤ダスト質量:  $4.9 \times 10^{-5} M_{\odot}$

強度・幅ともに  
観測をよく再現する

# まとめ

- 多重ダストリング/ギャップ
  - 数天体で見つかっている
  - HLTauが惑星起源だと $<1\text{Myr}$ での形成を示唆
  - TWHyaのギャップは惑星起因の構造と整合的
    - 幅と深さは理論予測と合う
    - ギャップ内では成長した(mmサイズ)ダストが欠損
- 遷移円盤
  - 穴内でガスは残存, わずかにdepleteの兆候
  - 観測波長によって穴の半径が異なる
  - トーラス状のダストリング構造
    - ダストはあまり沈殿していない



# 残された課題と今後のALMA観測の展望

- <1Myrでの惑星系形成？
  - HL Tauの多重ギャップは惑星起源か？
  - 構造は普遍的か？ (<=>ギャップなし円盤の検出[Momose+])
- ギャップ内でのガスの定量
  - ガスの高分解能観測、およびCO以外の輝線による円盤構造推定
  - CO以外での観測も必要
- 遷移円盤構造の普遍性
  - 高分解能/高感度の条件での系統的観測 => Large Proposal
- アーカイブデータの活用/イメージング手法の発展