

# 電波観測で見る原始惑星系円盤 の構造と進化

原始惑星系円盤研究会 2013年8月19日-22日

国立天文台 秋山 永治

# アウトライン

## 1. イントロダクション

原始惑星系円盤観測の経緯

原始惑星系円盤の概要

電波・赤外における円盤観測領域

## 2. 円盤の内側構造 (~ 数10 AU)

Transitional Disk

円盤層構造

COスノーライン(chemistry)

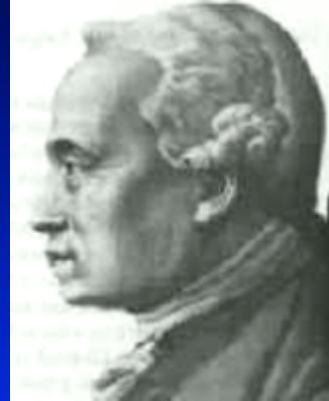
## 3. 円盤の外側構造 (100 AU以遠)

## 4. まとめ

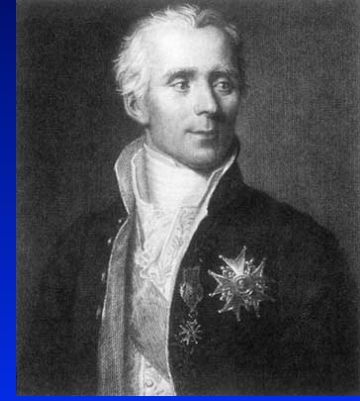
# 星雲仮説



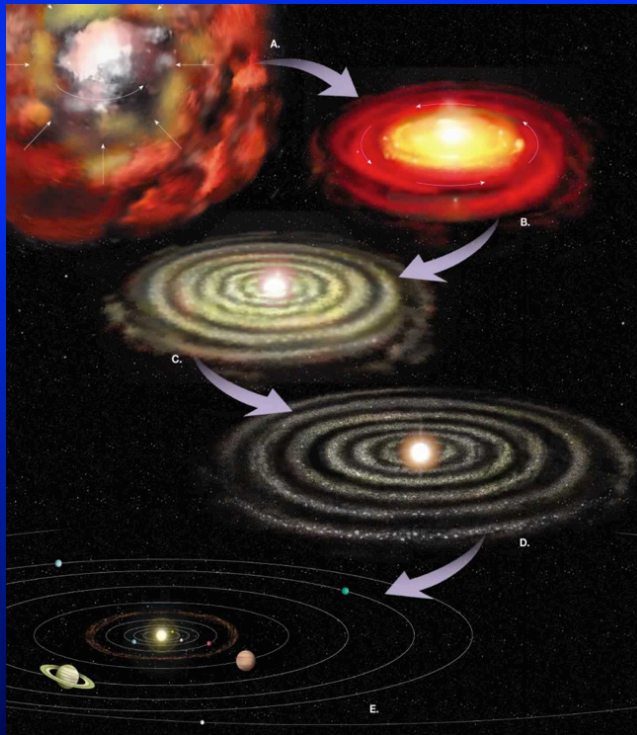
Swedenborg 1688-1772



Kant 1724-1801



Laplace 1749-1827



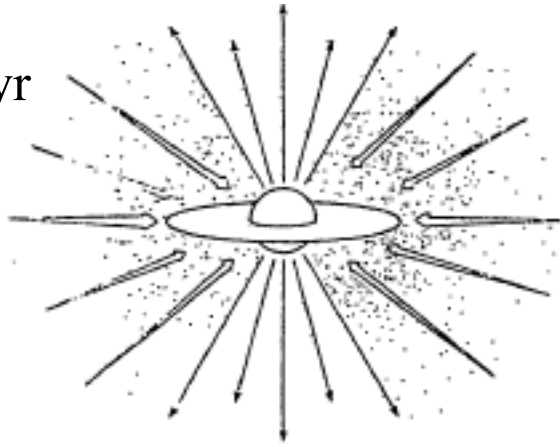
1. ガス雲が重力収縮する。
2. 回転軸方向では収縮が進み、動径方向では収縮が進まず円盤形状を形成させる。
3. 重力と円心力で釣り合う。
4. リング形状が生じ惑星が形成される。

# 星形成標準シナリオ

$\sim 10^{4-5}$  yr

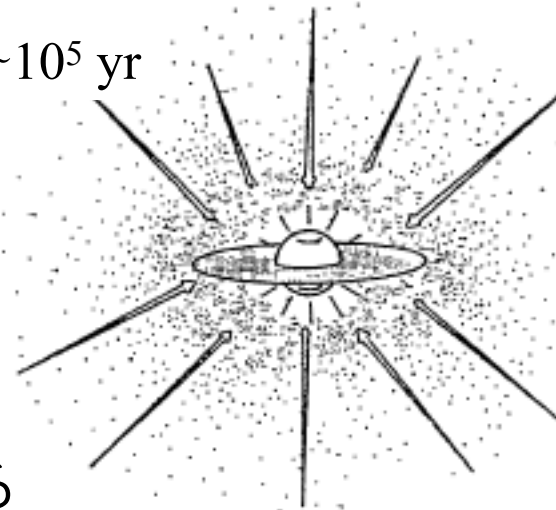
1. 分子雲中で高密度コアが生まれる

$\sim 10^{5-6}$  yr



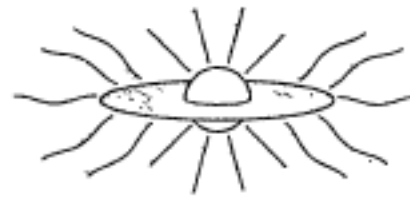
3. 星風が発生して双極流を作る

$\sim 10^5$  yr



2. 中心に原始星が誕生し外層からの降着により質量が増加する

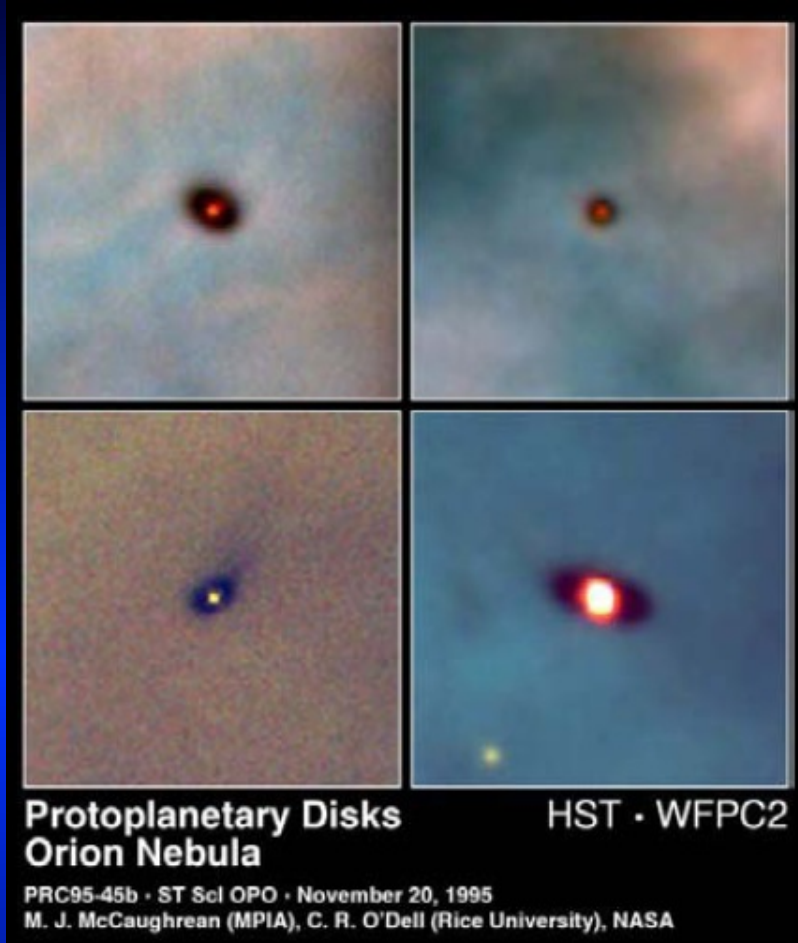
$\sim 10^{6-7}$  yr



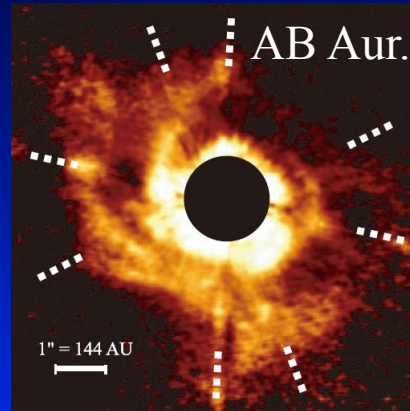
4. 質量降着が終わり若い星と円盤が見えるようになる

Shu, Adams, & Lizano 1987

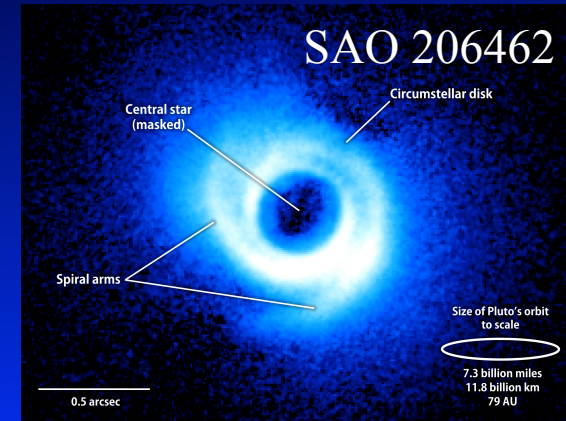
# 原始惑星系円盤



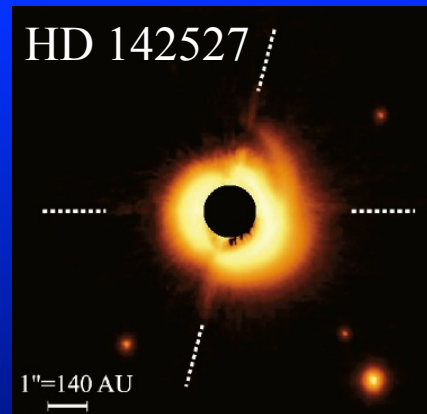
McCaughrean & O'Dell 1995



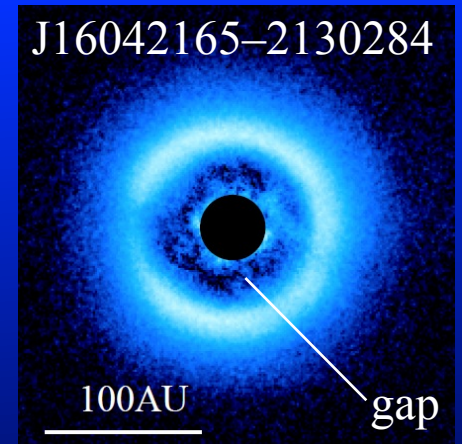
Fukagawa+2004



Muto+2012



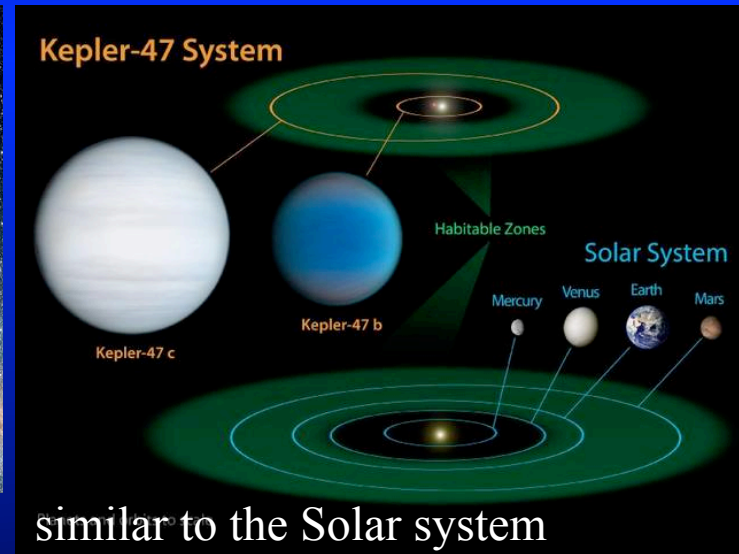
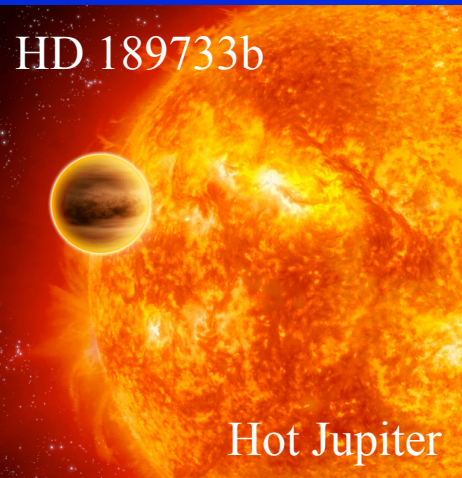
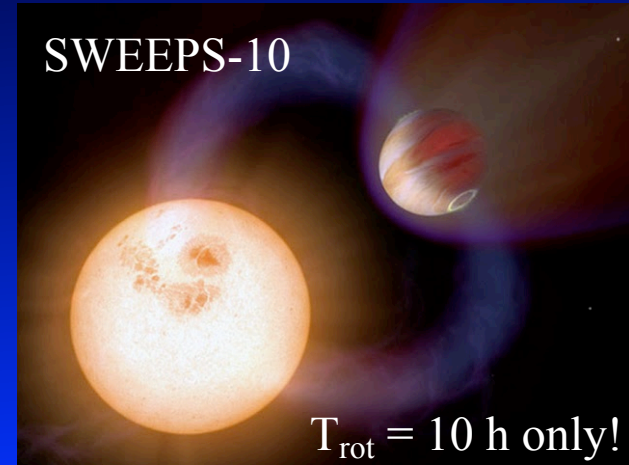
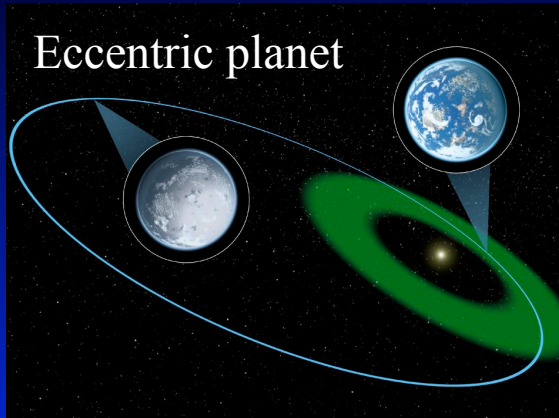
Fukagawa+2006



Mayama+2012

円盤は複雑な構造を持つ

# Diversity of Exoplanets



標準モデルでは全てを説明する事は困難。

# 今回の取り扱う天体

Class 0/1

L1527

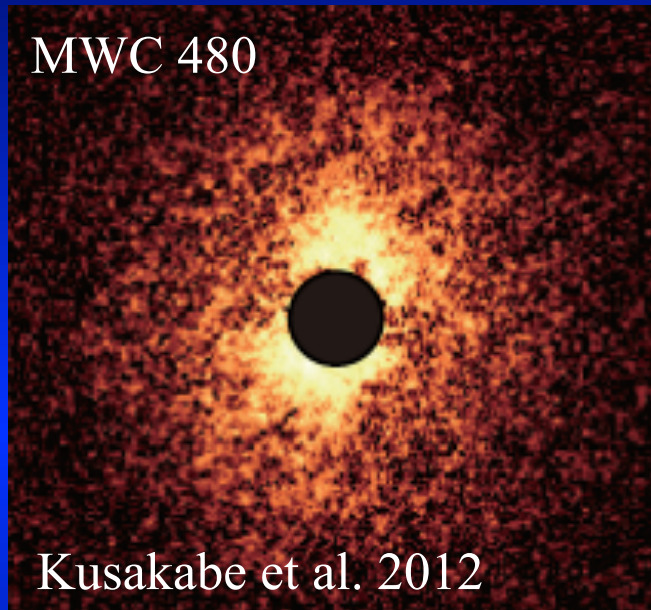


Tobin et al. 2012

高桑さんレビュー  
町田さんレビュー

Class 2/3

MWC 480

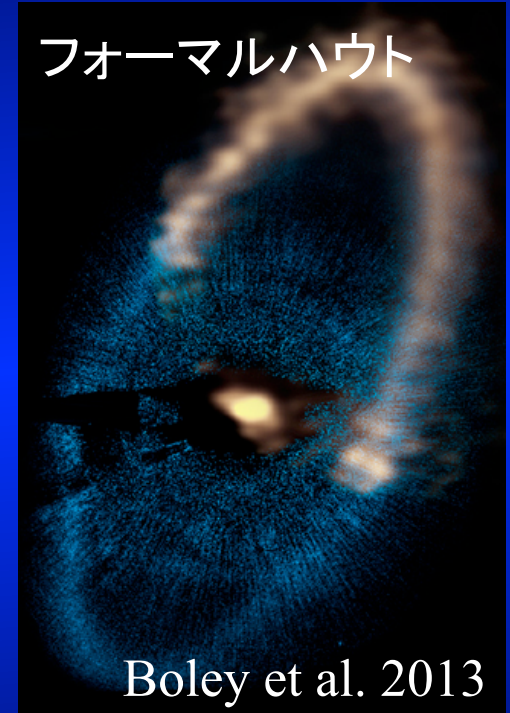


Kusakabe et al. 2012

深川さんレビュー  
武藤さんレビュー  
奥住さんレビュー  
野村さんレビュー

デブリ円盤

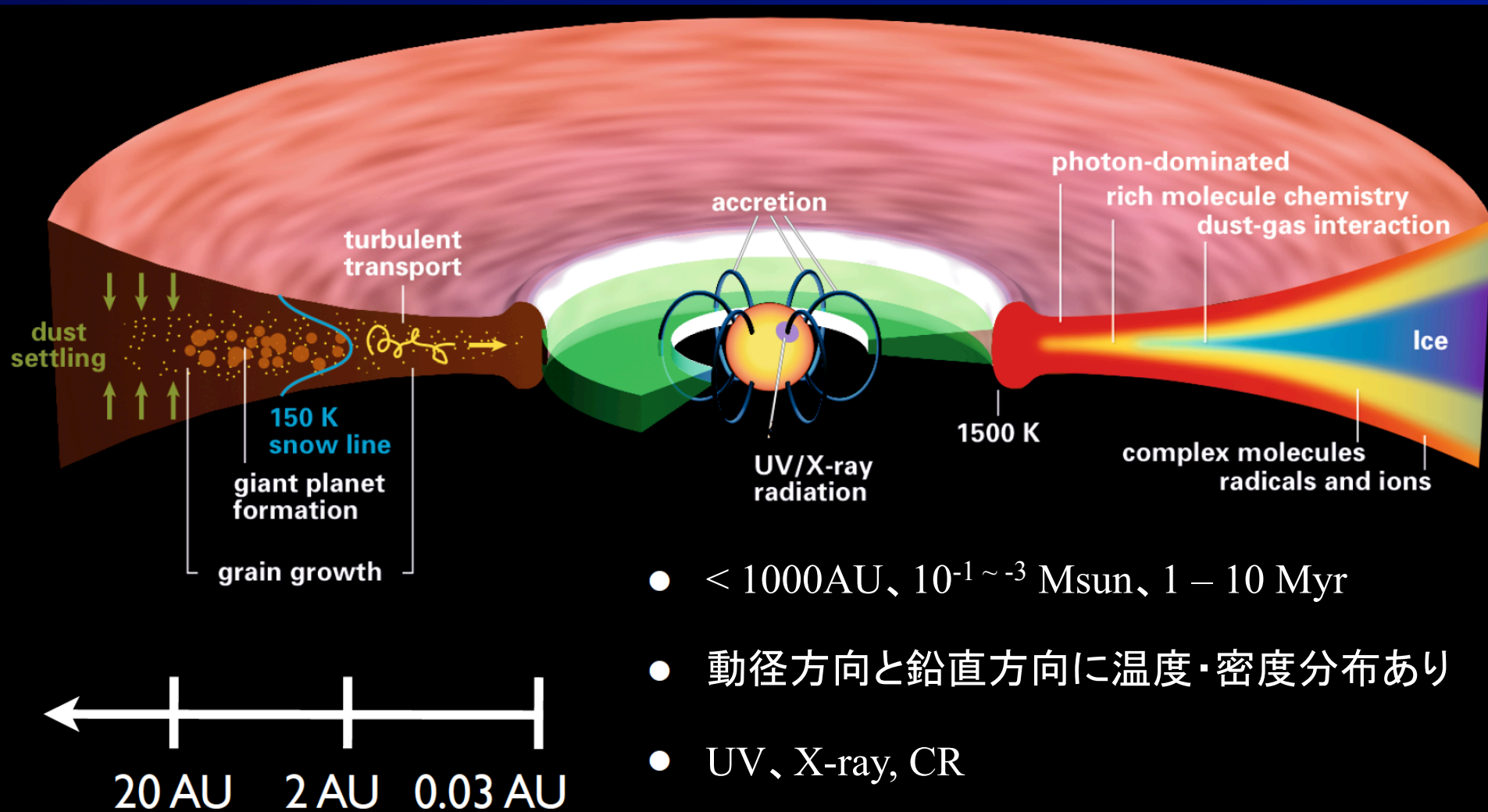
フォーマルハウト



Boley et al. 2013

奥住さんレビュー

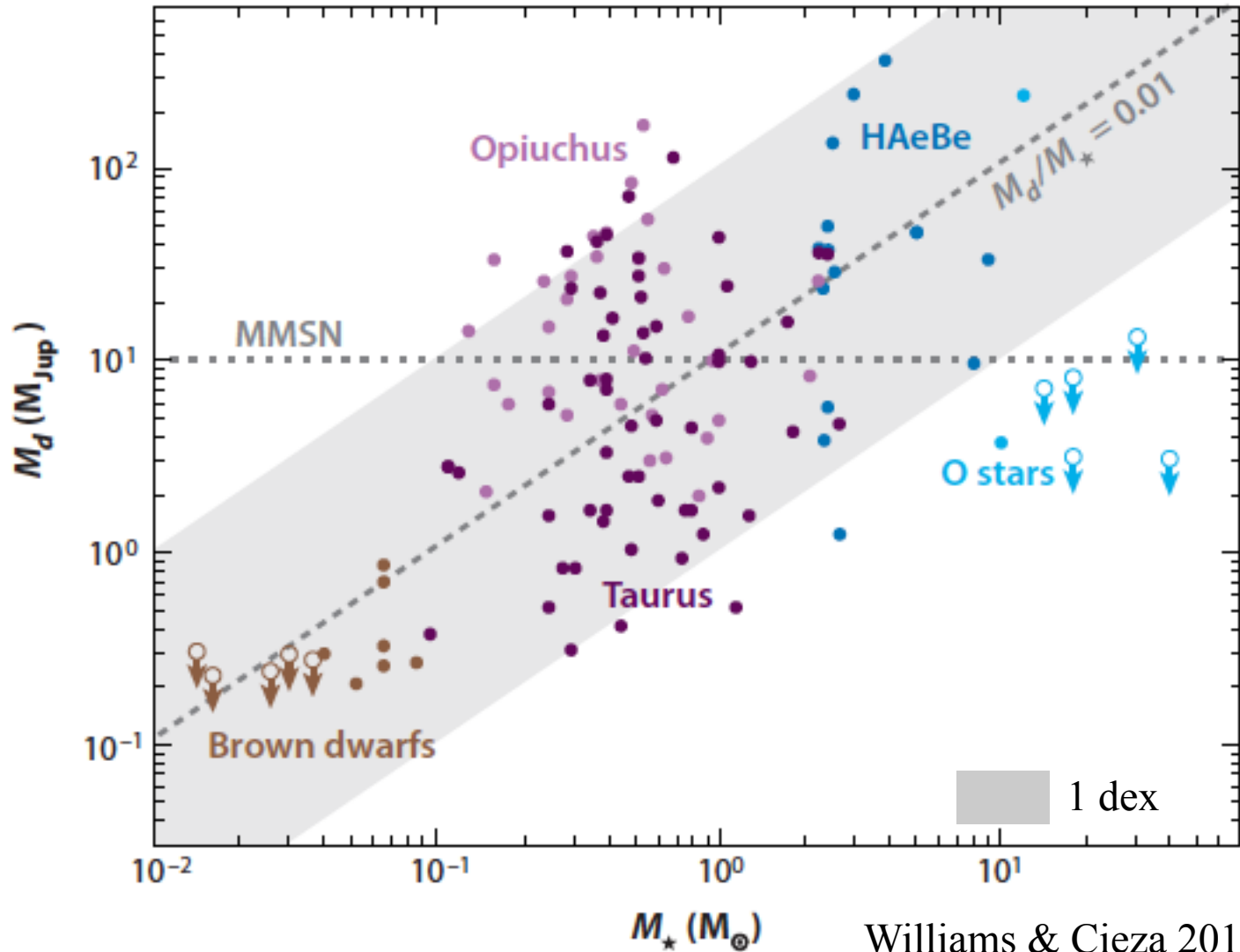
# 原始惑星系円盤概要



- $< 1000\text{AU}$ 、 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{ Msun}$ 、 $1 - 10 \text{ Myr}$
- 動径方向と鉛直方向に温度・密度分布あり
- UV、X-ray, CR
- 運動、組成

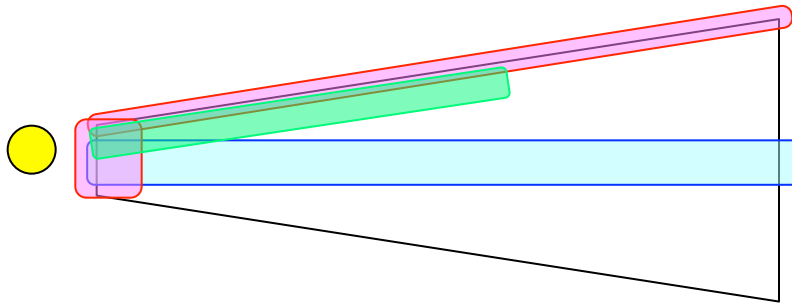


# 円盤の質量分布

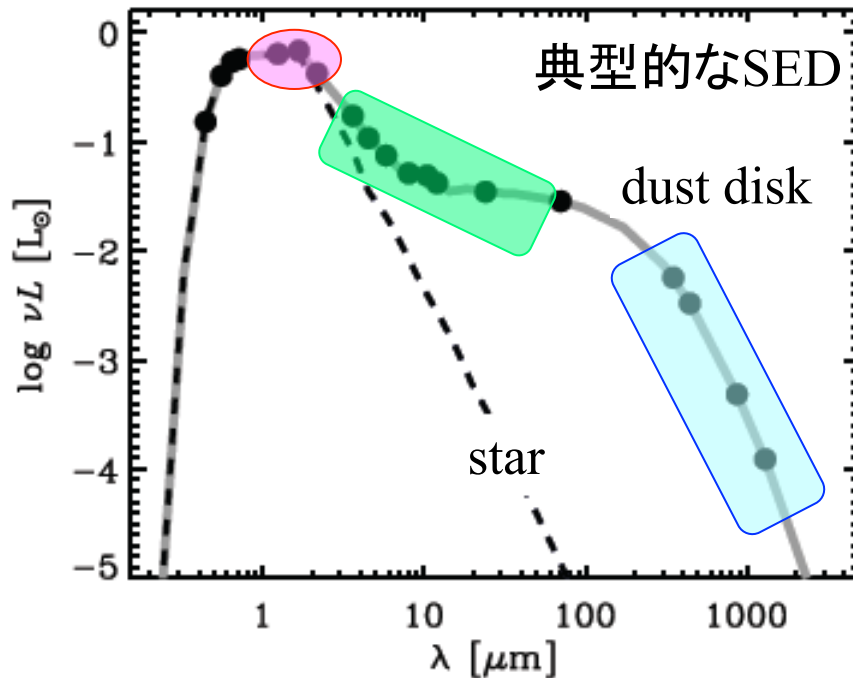


# 円盤の観測位置とSEDとの関係

SED:天体を波長ごとの強度分布で表したもの  
黒体放射であればプランクの式で表されるカーブになる



近赤外 : 星近傍からの熱放射  
~数AU  
: 円盤表面の散乱光  
中間赤外 : ~数10からの熱放射  
電波 : 円盤赤道面からの熱放射



波長によって見ている場所が異なる。

Dullemond et al. 2007参考

# Transitional Disk

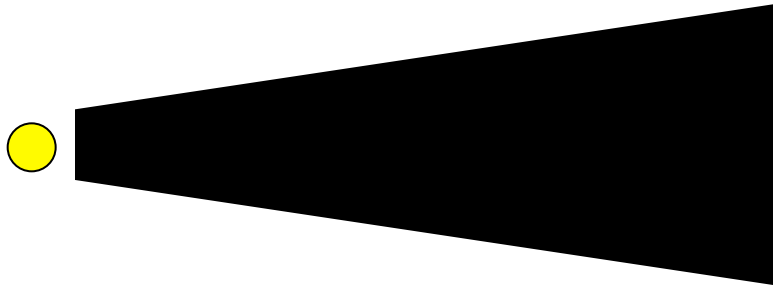
# Transitional Diskの発見

IRASサーベイの結果、少数のサンプルに中心に穴が開いている天体がある事が判明した。

Strom et al. 1989

“The presence of IR excesses for  $\lambda > 10 \mu\text{m}$ ... and the absence of excess emission at  $\lambda < 10 \mu\text{m}$ ... may diagnose disk clearing in the inner regions of the disk. If so, these observations may represent the first astrophysical evidence of disks in transition from massive, optically thick structures... to low-mass, tenuous, perhaps postplanet-building structures.”

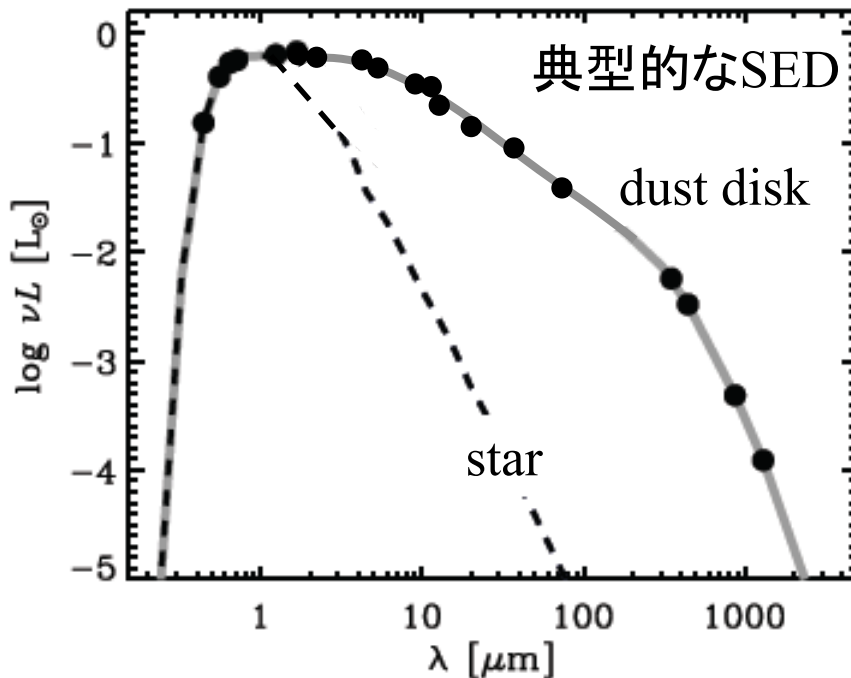
# SEDから得られる円盤構造



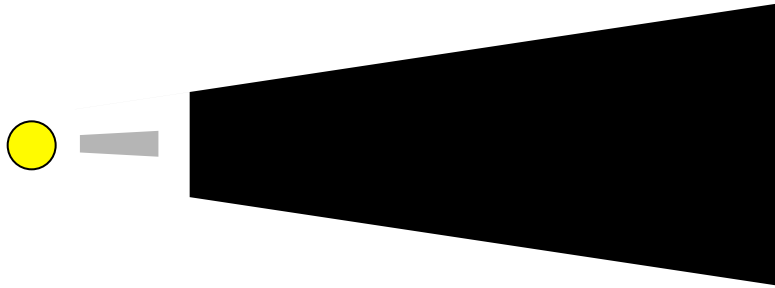
## Primordial Disk

穴やスパイラル構造のない  
スムーズな密度分布を持つ  
円盤。

SEDでは近赤外領域で明る  
さの減少が見られないフラッ  
トな曲線を示す。

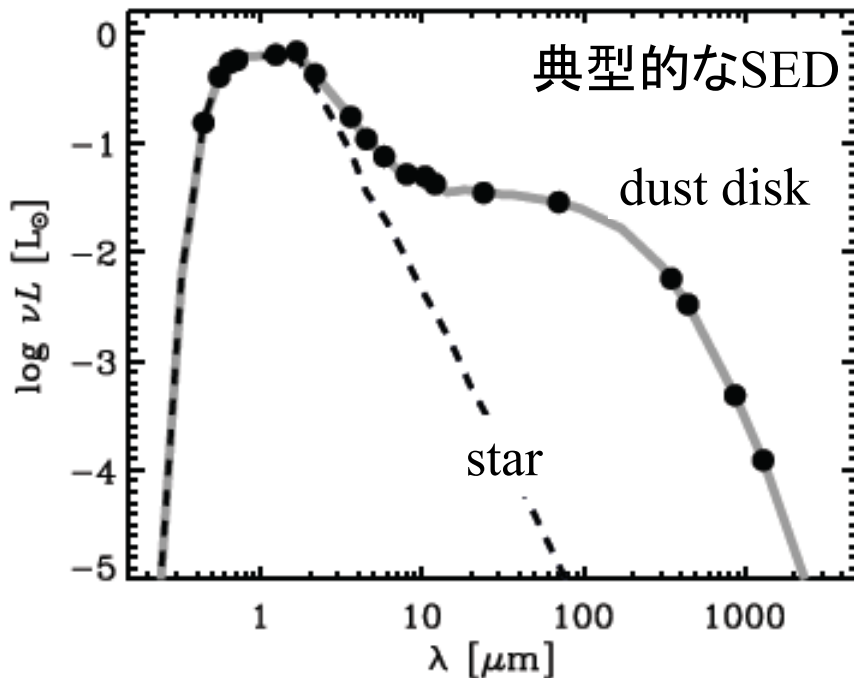


# SEDから得られる円盤構造



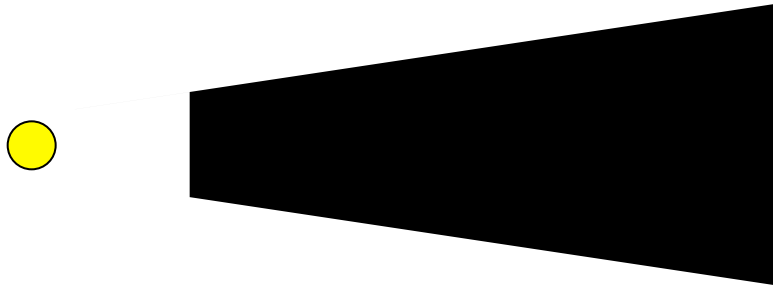
## Pre-transitional Disk

星近傍で穴が開きつつある円盤。

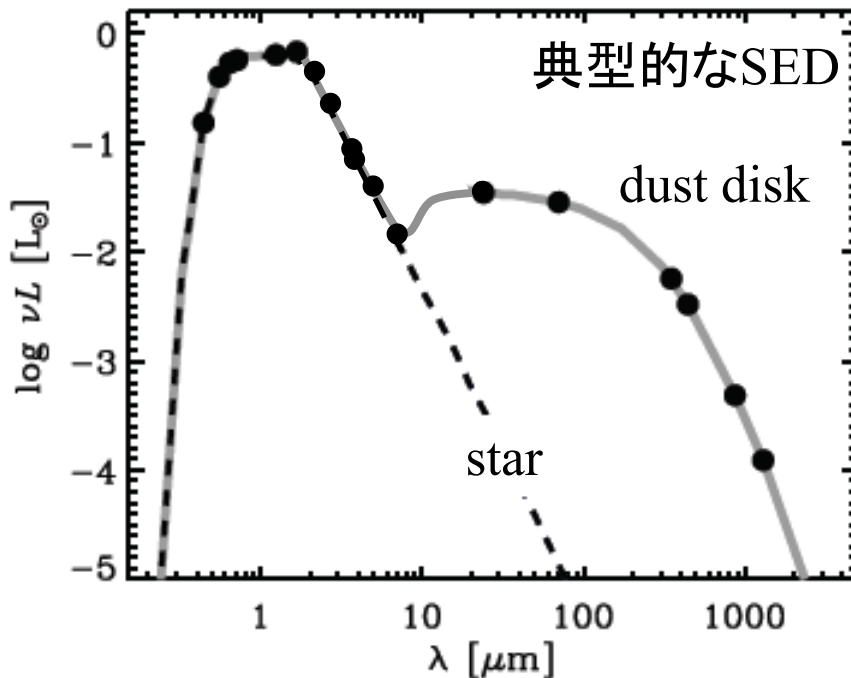


SEDでは近赤外領域で明るさの減少が見られるが、中心星の表面は見えない。

# SEDから得られる円盤構造

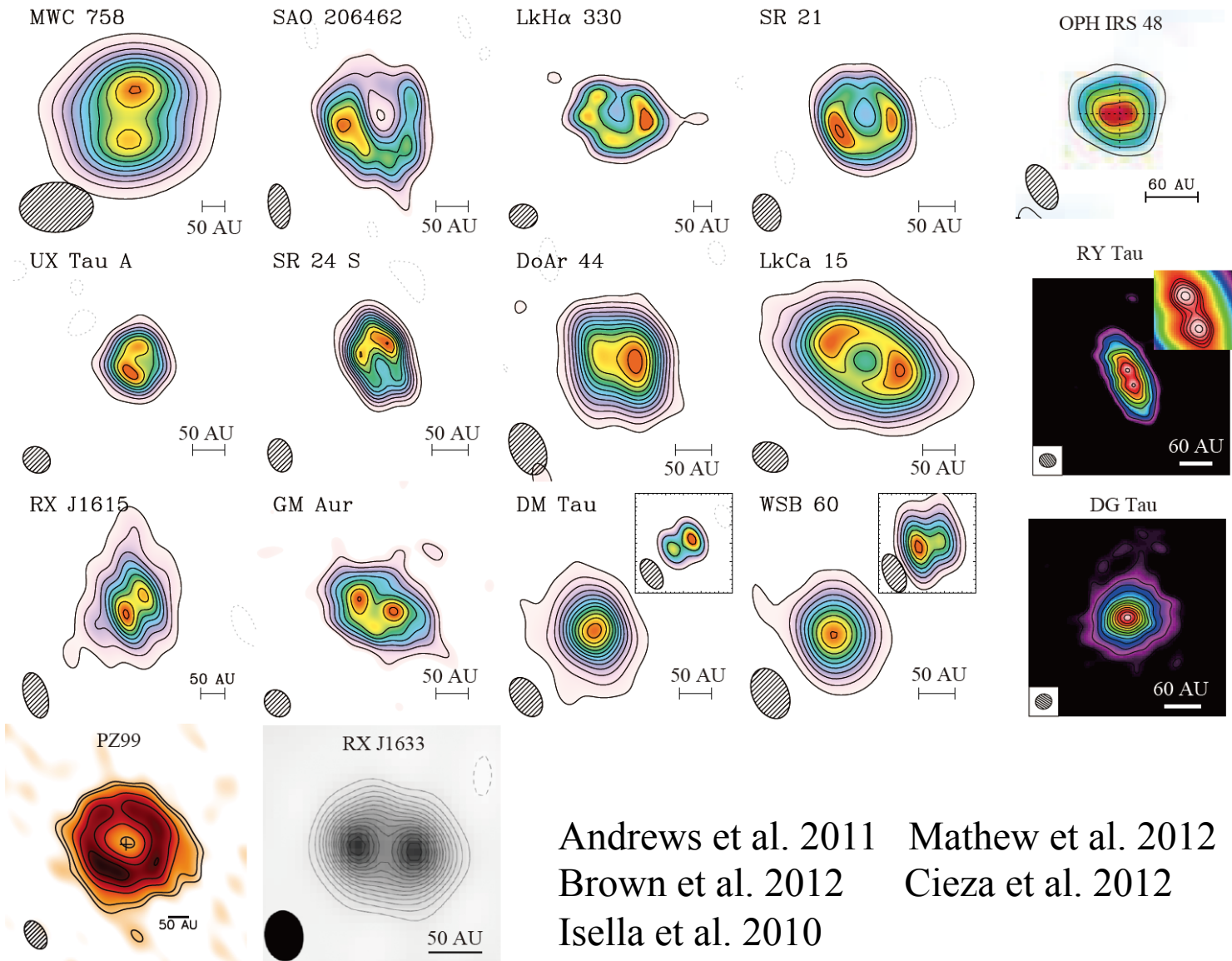


Transitional Disk  
星近傍穴がある円盤。



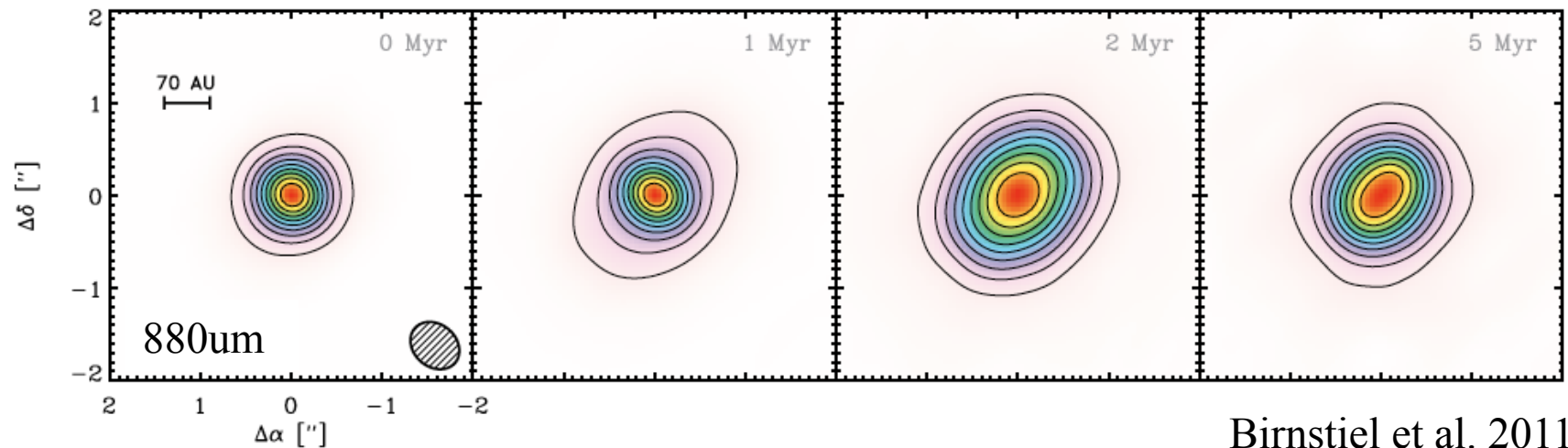
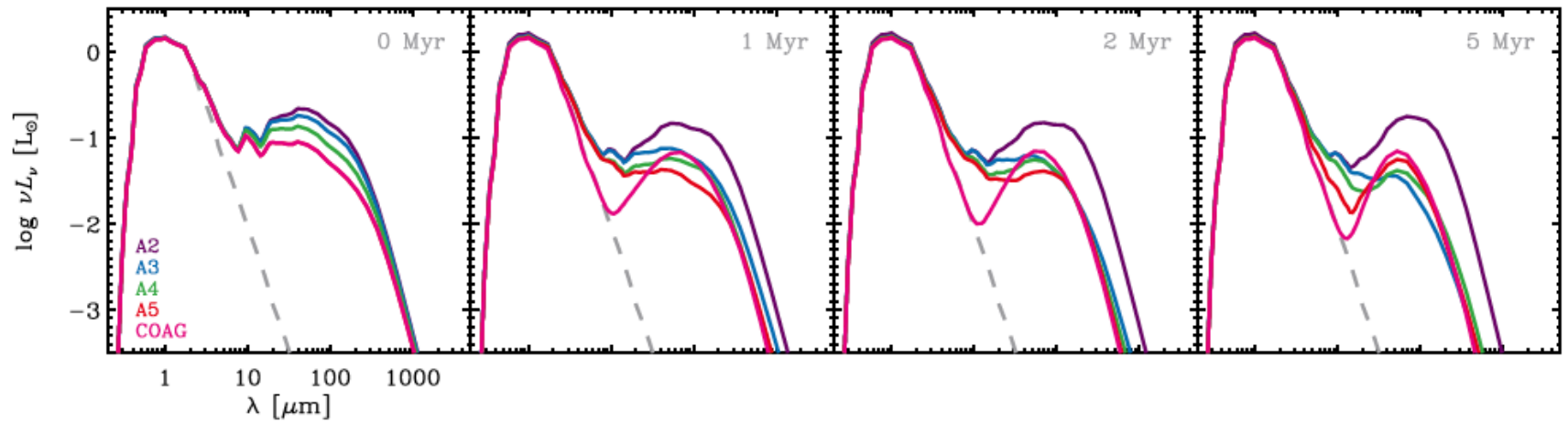
SEDでは近赤外領域で明るさの減少が見られ中心星の黒体放射が見られる。

# SMAの原始惑星系円盤一覽





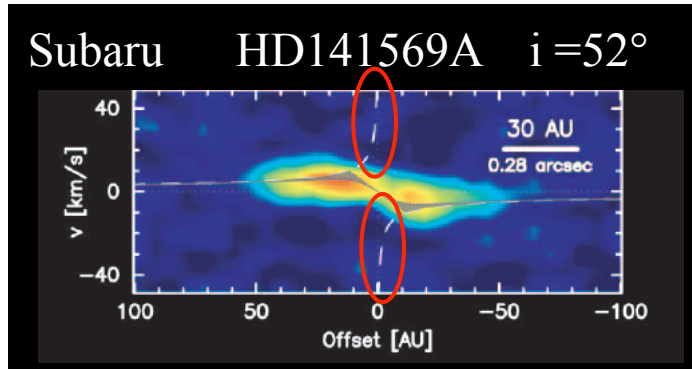
# Transitional Diskの形成メカニズム ダスト成長(Grain Growth)



Birnstiel et al. 2011

SEDは再現するがsubmmのデータが再現しない。

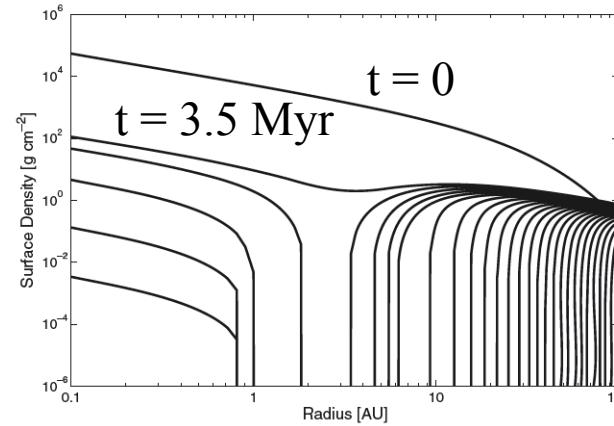
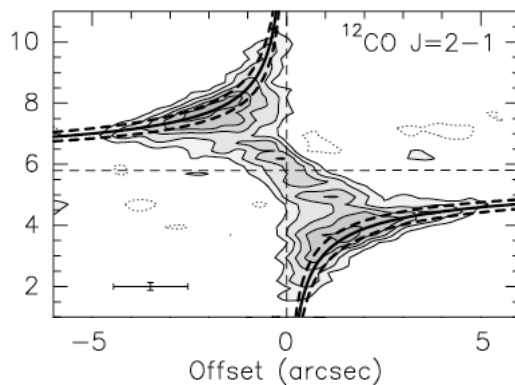
# Transitional Diskの形成メカニズム 光蒸発(Photoevaporation)



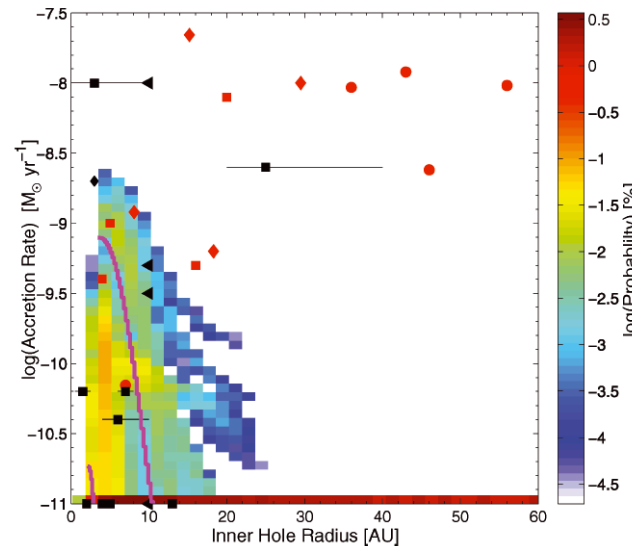
CO(v=2-1)のPV図

$r \sim 11$  AUで光蒸発によるclearing  
が発生している(Goto et al. 2006)。

典型的なfull diskのPV図



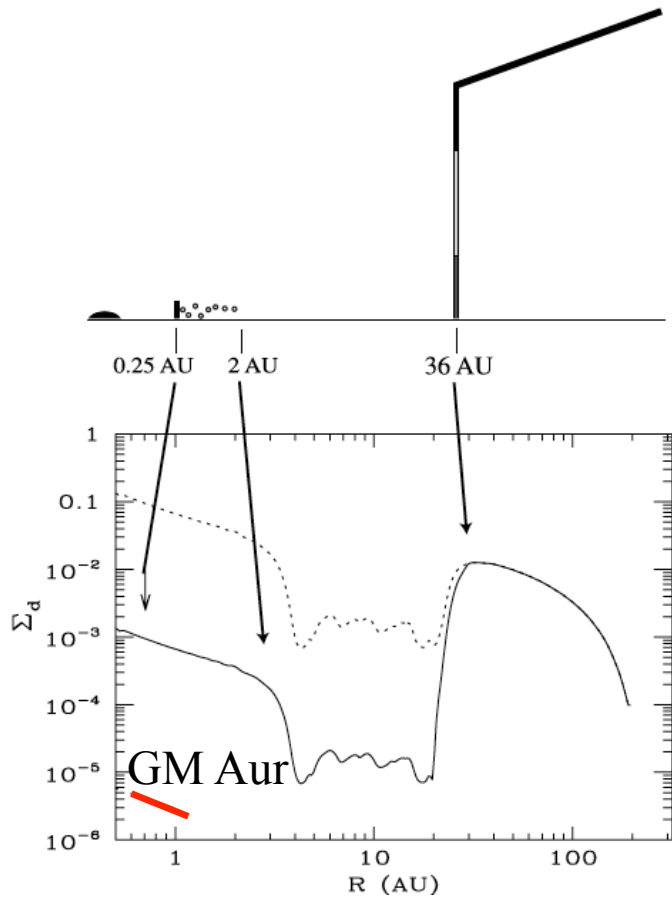
数10AUスケールの  
穴が形成されない



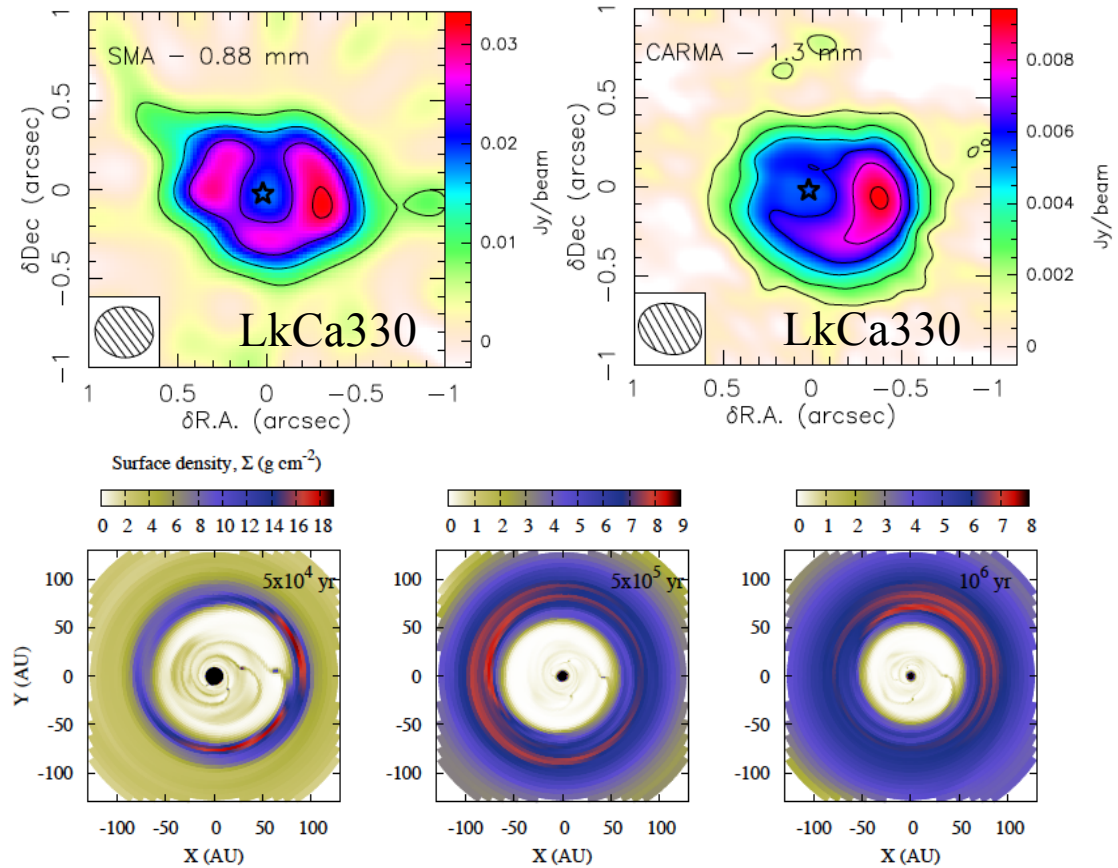
数AUの穴をTDは  
再現できそうだが  
それ以外は非常に  
困難である。

Owen et al. 2011

# Transitional Diskの形成メカニズム 複数の惑星(Multiple Planets)



穴は形成されるが、更に $10^3$ - $5$ の減少が必要。  
Zhu et al. 2011

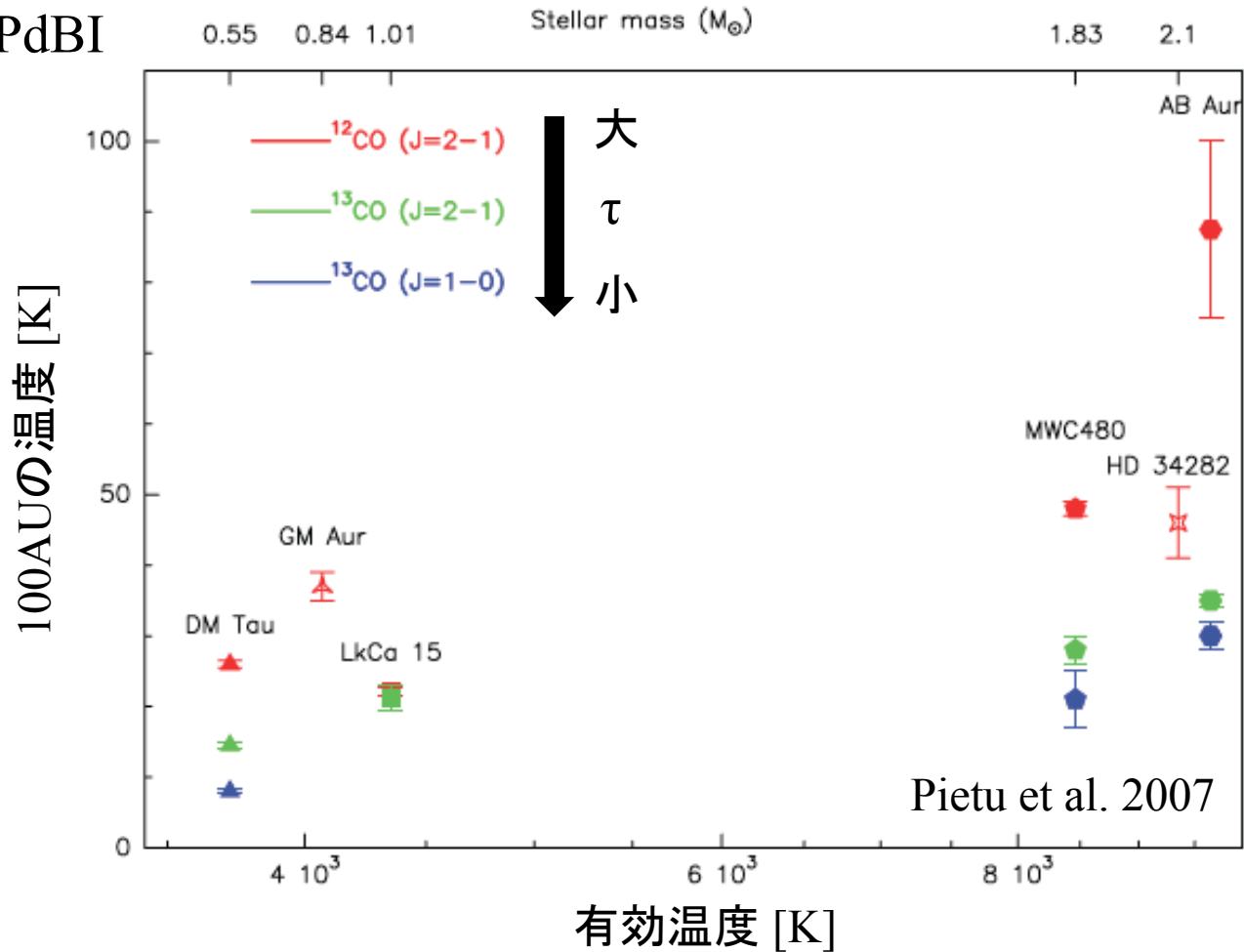


複数の惑星でmm波submm波の観測データを再現可能。  
Isella et al. 2013

観測例 1  
～ 円盤の物理構造 ～

# 円盤の温度

IRAM/PdBI

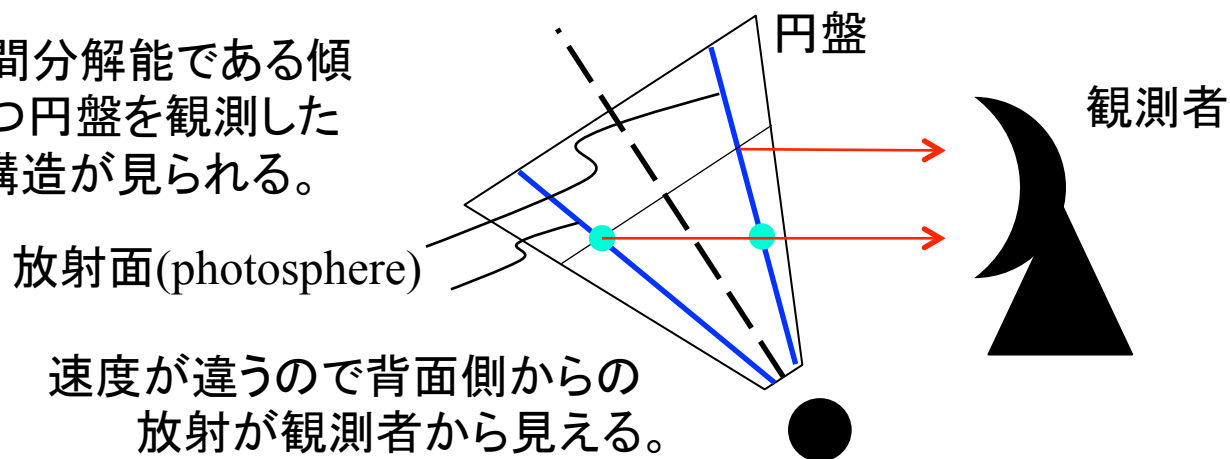


Herbig Ae型星  $T \sim 20 - 100 \text{ K}$

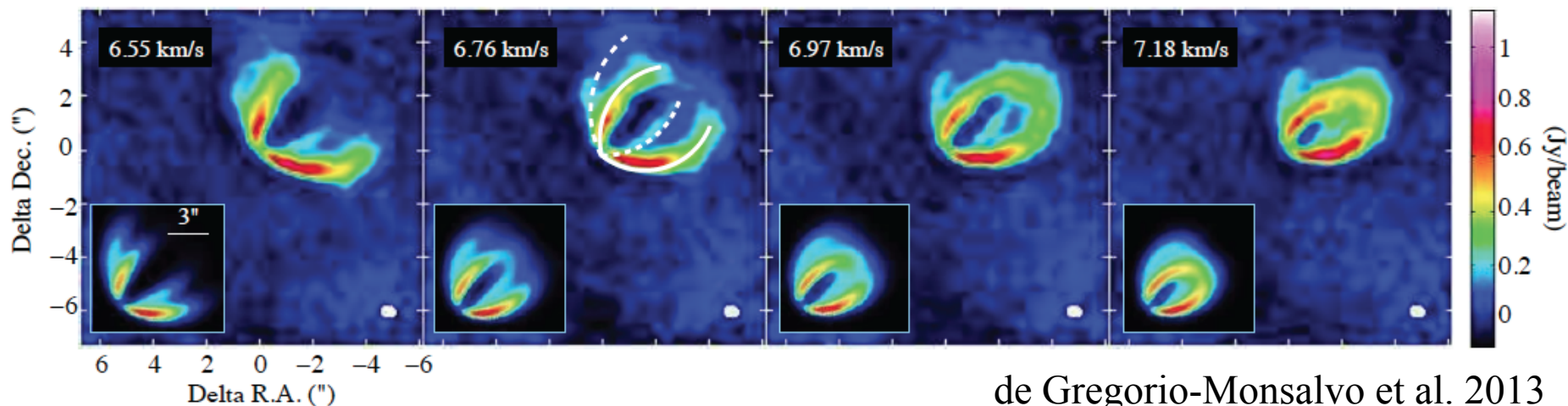
T Tauri型星  $T \sim 10 - 30 \text{ K}$

# HD 163296の円盤の層構造

十分な空間分解能である傾斜角を持つ円盤を観測した場合、層構造が見られる。



ALMA SV band7



直接円盤の層構造を観測で確認した。

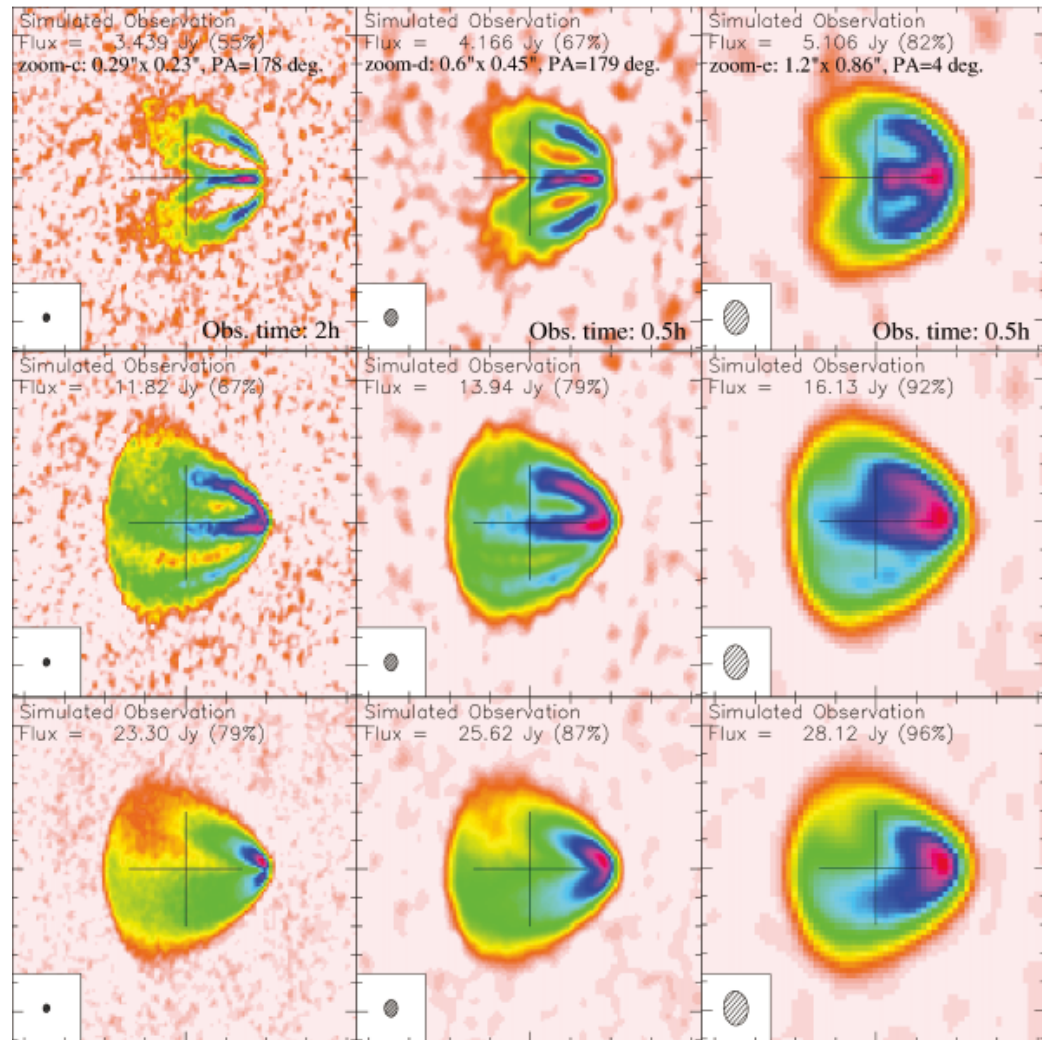
# 円盤の層構造 simulation

高 ← 空間分解能 → 低

存在量分布あり  
温度分布あり

存在量分布なし  
温度分布あり

存在量分布なし  
温度分布なし



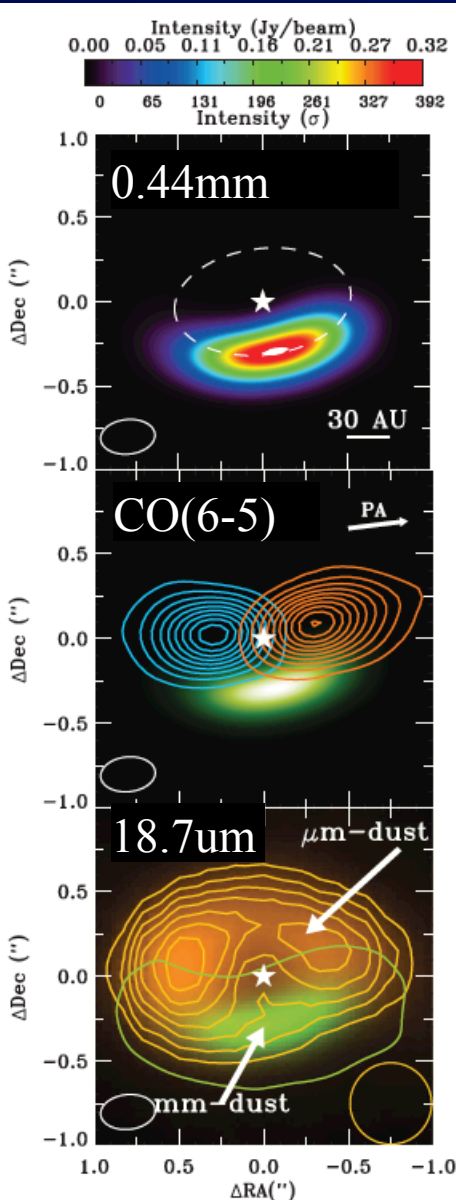
# Dust Trap (Pressure Bump)

ALMA cycle0 band9

Oph IRS 48 Transitional Disk

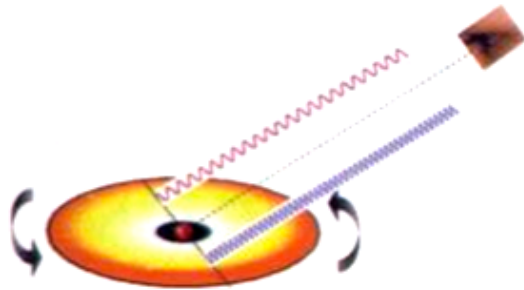
- 45 – 80AUにかけて局所的なmmサイズのダストが溜まっている(9 Me)。
- ガスとumサイズのダストはドーナッツ状に存在する。
- Pressure bumpの有力候補。

van der Marel et al. 2013



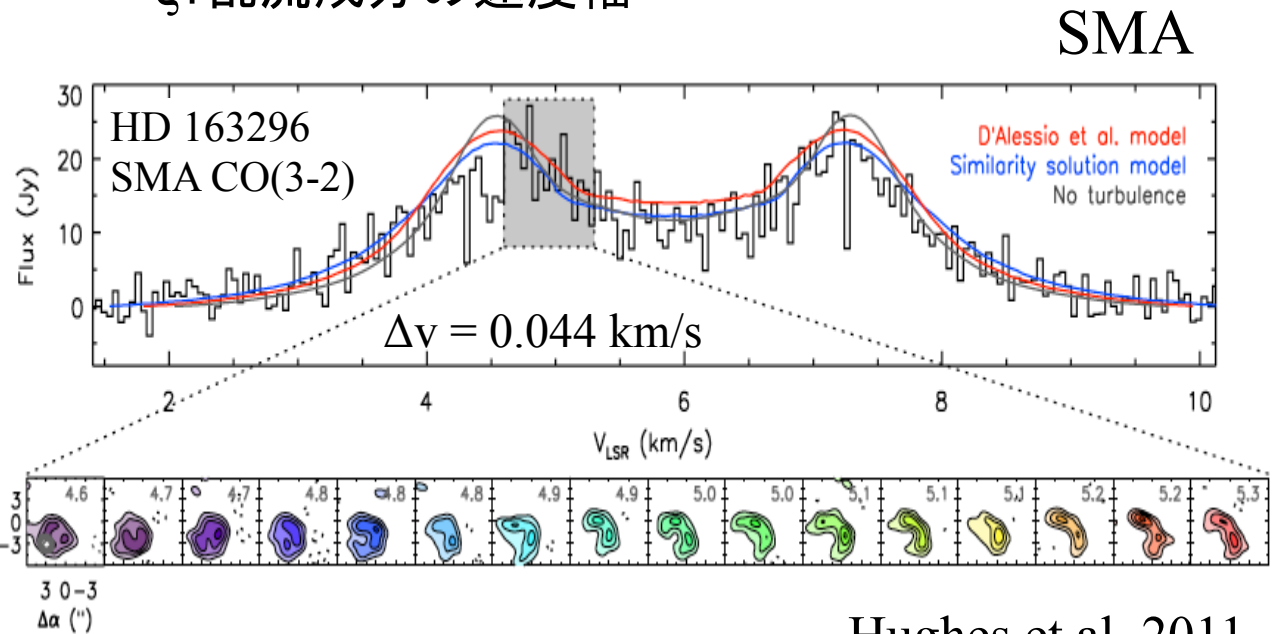


# 円盤の乱流成分



$$\Delta v(r) = \sqrt{\frac{2k_B T(r)}{\mu m_H} + \xi^2}$$

$\xi$ : 乱流成分の速度幅



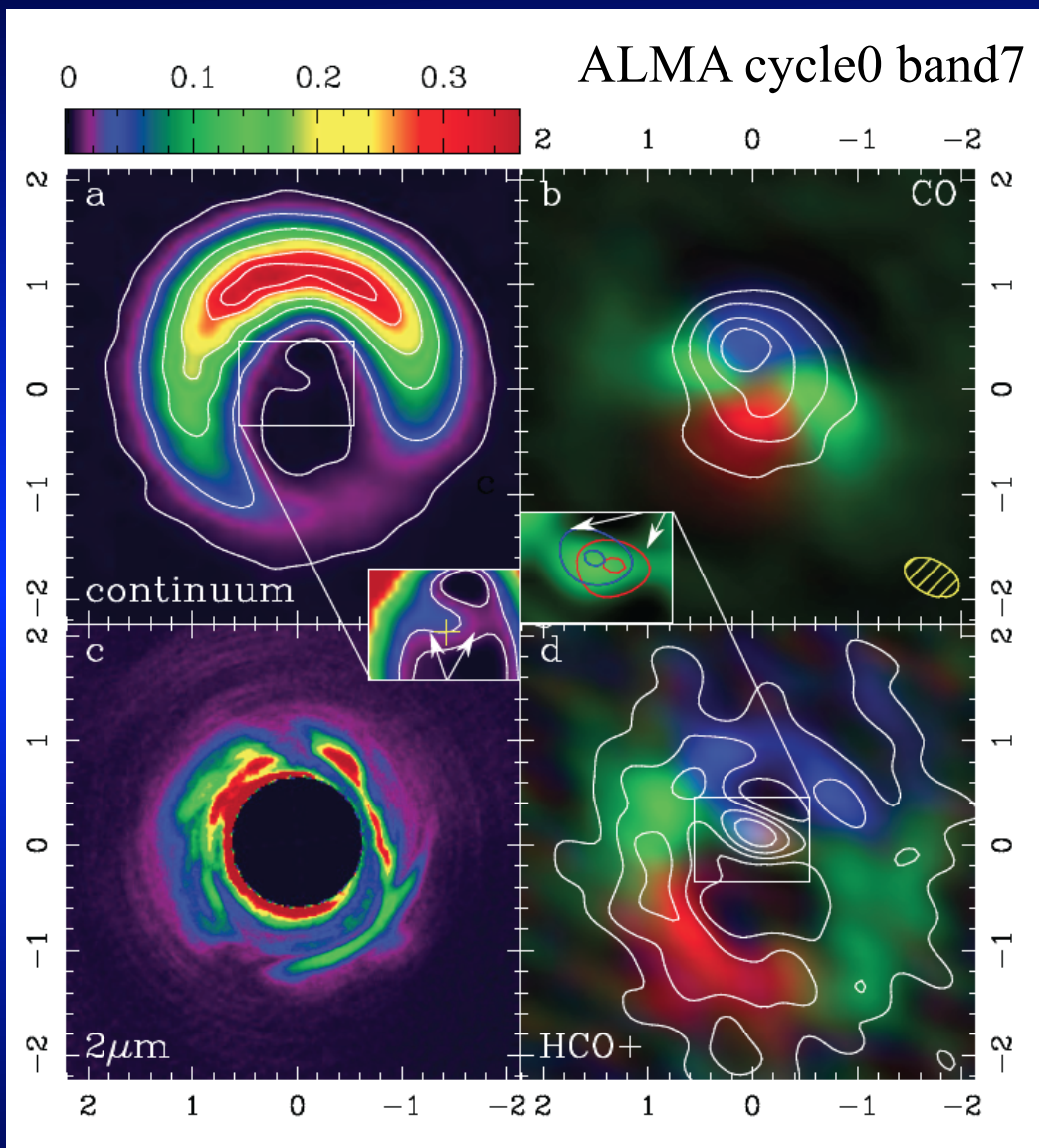
Hughes et al. 2011

乱流成分 0.4Cs

参考 Guilloteau et al. 2012 PdBI CS(3-2)

DM Tau 0.4 – 0.5Cs

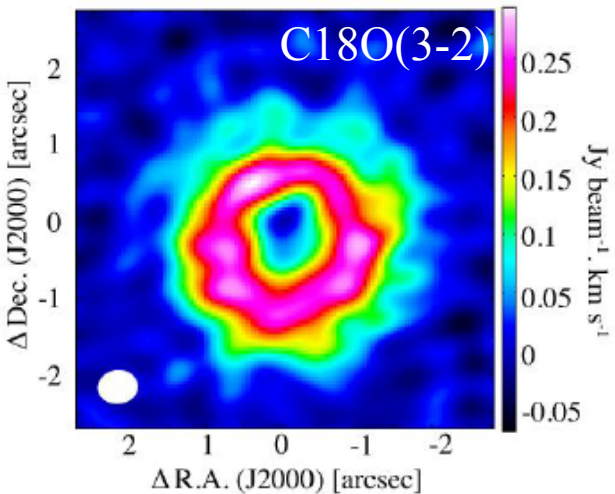
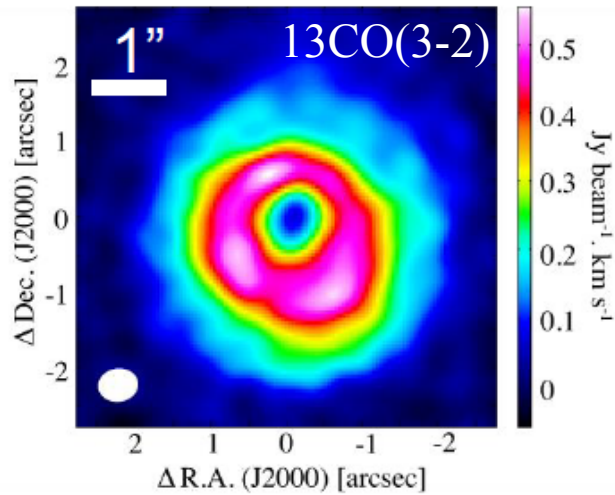
# HD142527 円盤からのガス流入



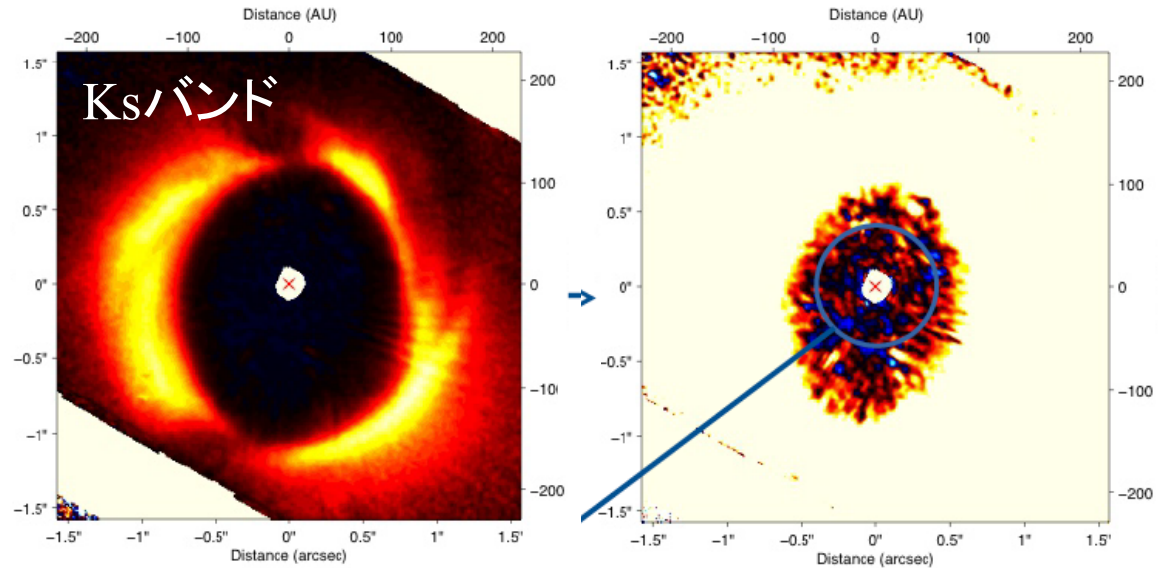
円盤から惑星へのガス流入?

# HD142527 その他の観測結果

ALMA



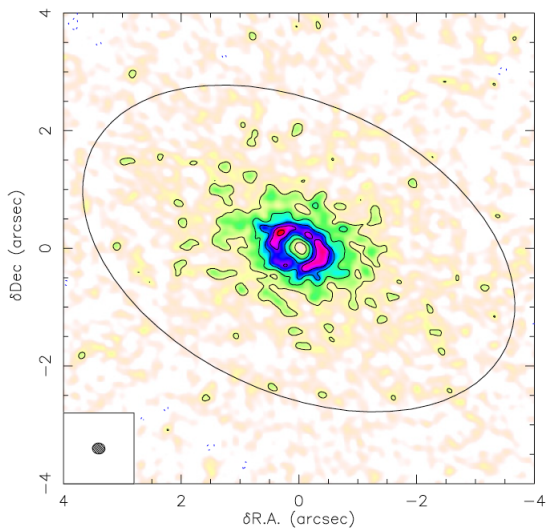
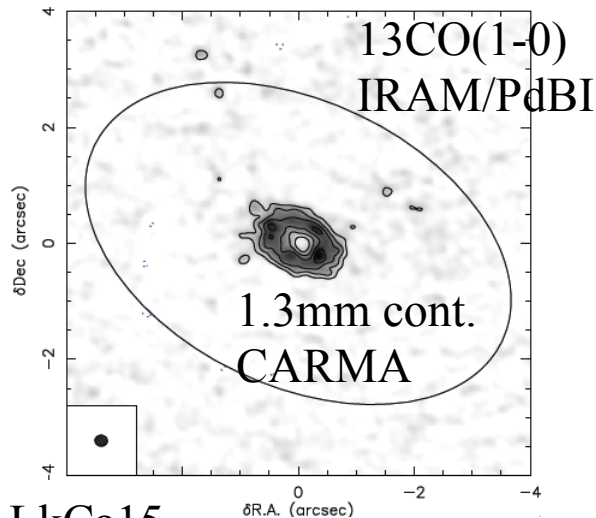
VLT/NACO



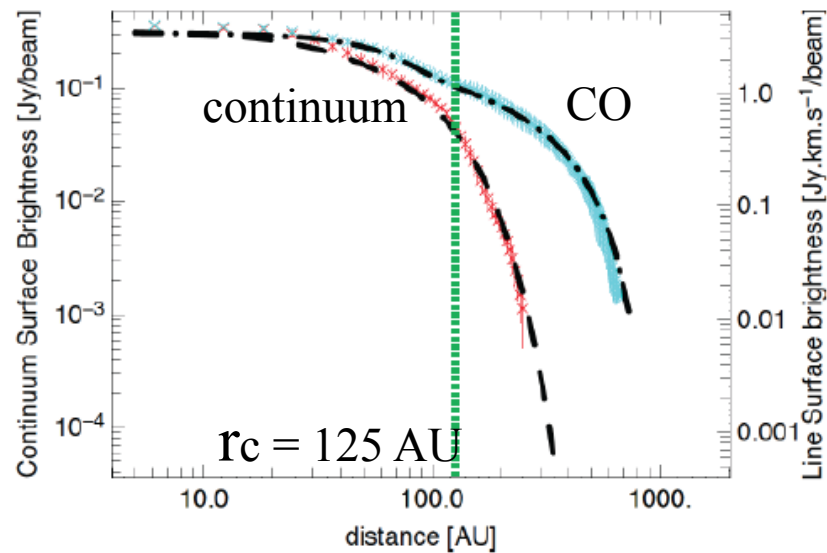
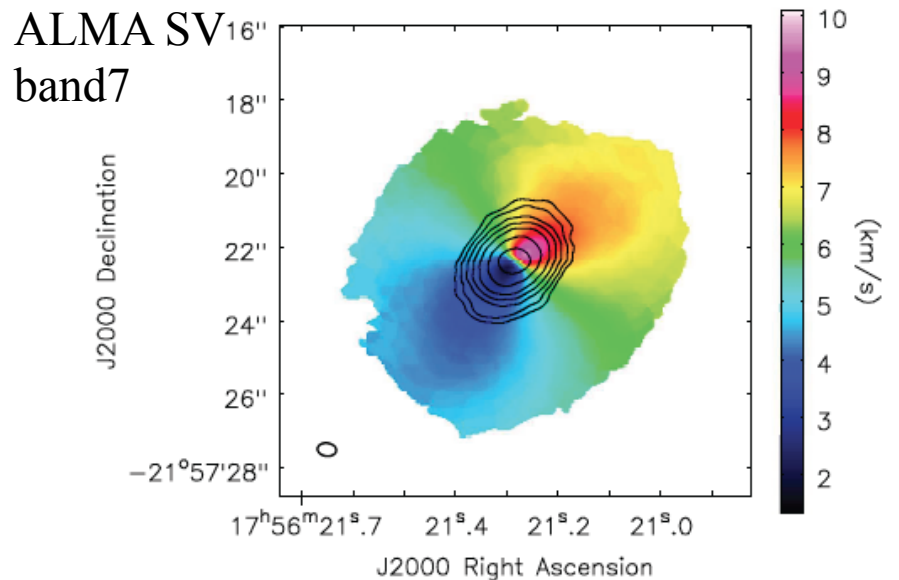
NIRの観測でも物の流れを示すものは見られない。

Avenhaus et al. in prep.

# LkCa15とHD163296 ダスト成長1

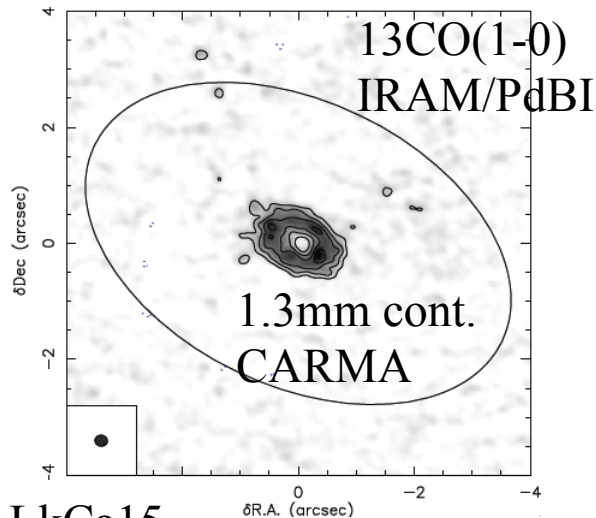


dust growthなしのsimulation  
Isella et al. 2012

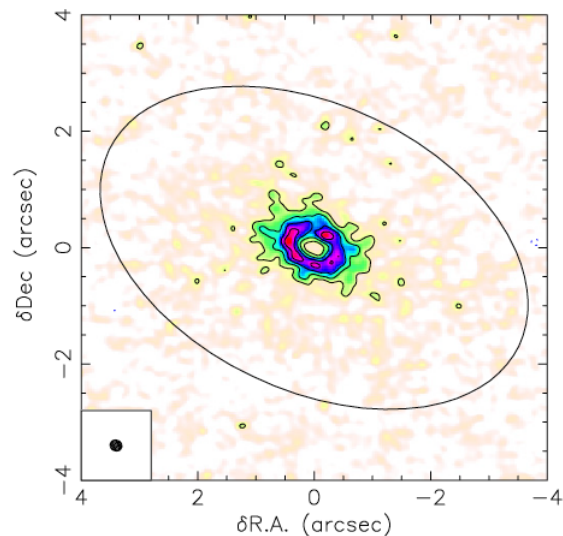


de Gregorio-Monsalvo et al. 2013

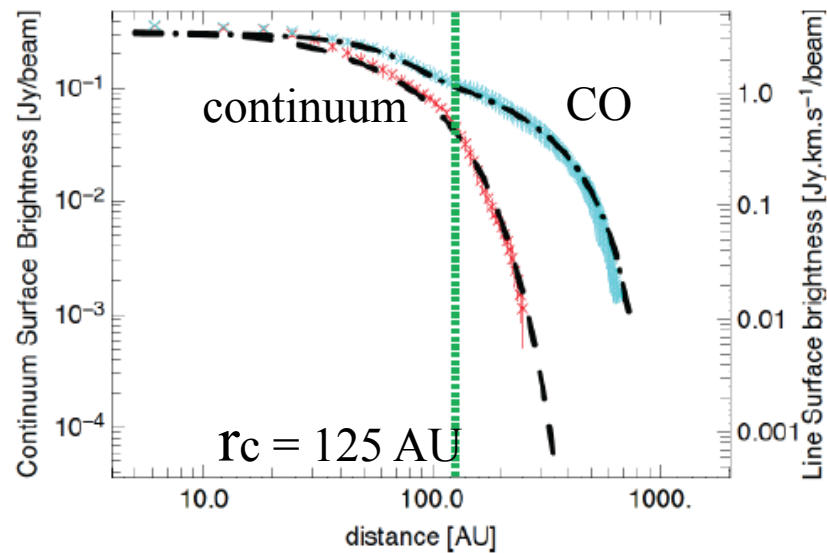
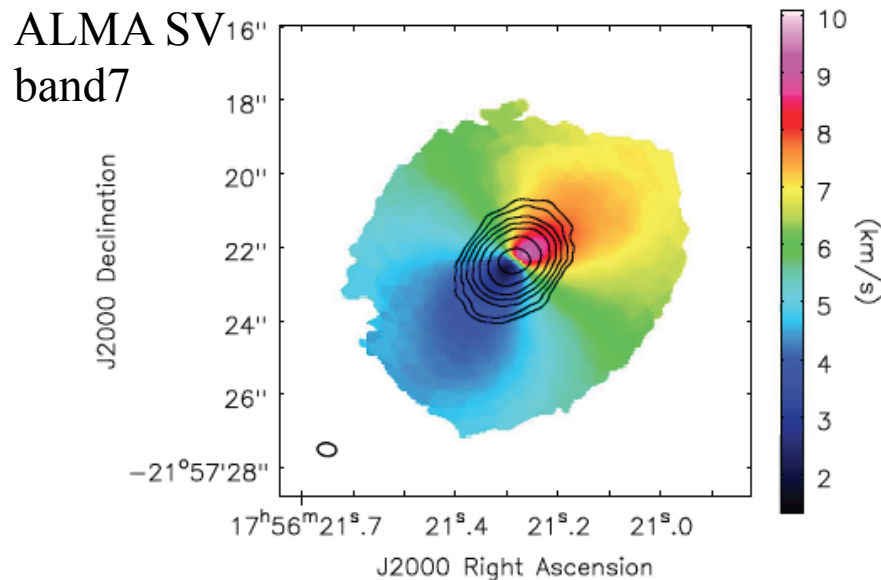
# LkCa15とHD163296 ダスト成長2



LkCa15



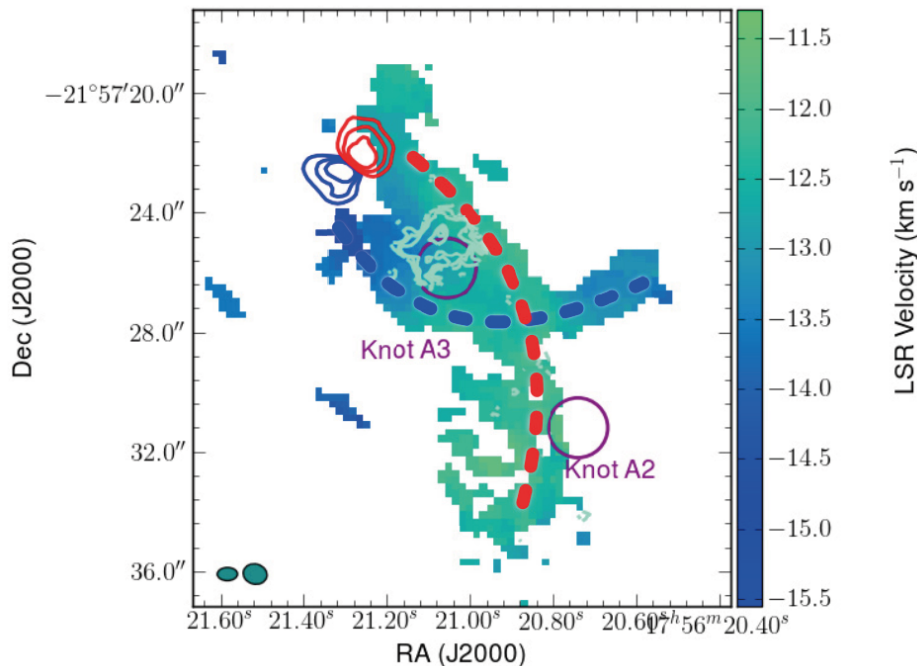
dust growthありのsimulation  
Isella et al. 2012



de Gregorio-Monsalvo et al. 2013

# HD 163296 円盤風(?)

ALMA SV band6 & 7



Klaassen et al. 2013

CO3-2(band7)ではスポット状の造で  
CO2-1(band6)では連続的な帯状の  
構造をしている。

resolve outの影響

Knot A2とA3の位置は2012年の時  
点でproper motionから予想される  
位置を示している。

- morphologyが似ている。
  - band7のemissionはknotの位置とほぼ一致している。
  - 速度成分が一致している。  
redとblueの方向が円盤のものと一致(但しmean vel. = -18.6 km/s)
- 円盤風の可能性が高い。

# 大質量星の周りのケプラー円盤

天体: G35.20-0.74N

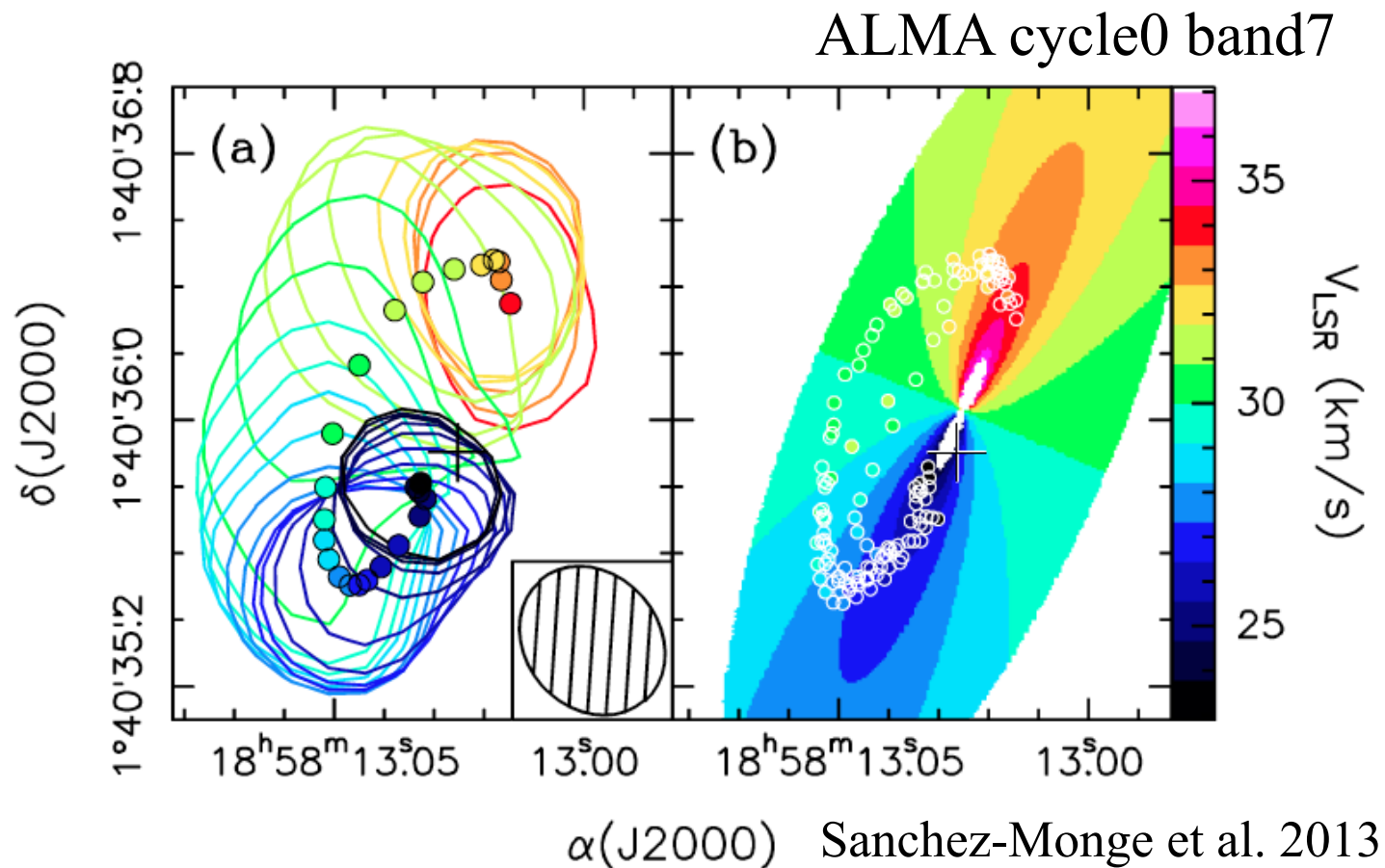
距離:  $2.19^{+0.24}_{-0.20}$  pc

質量:  $18 \pm 3$  Msun

光度:  $\sim 3 \times 10^4$  Lsun

円盤質量: 3 Msun

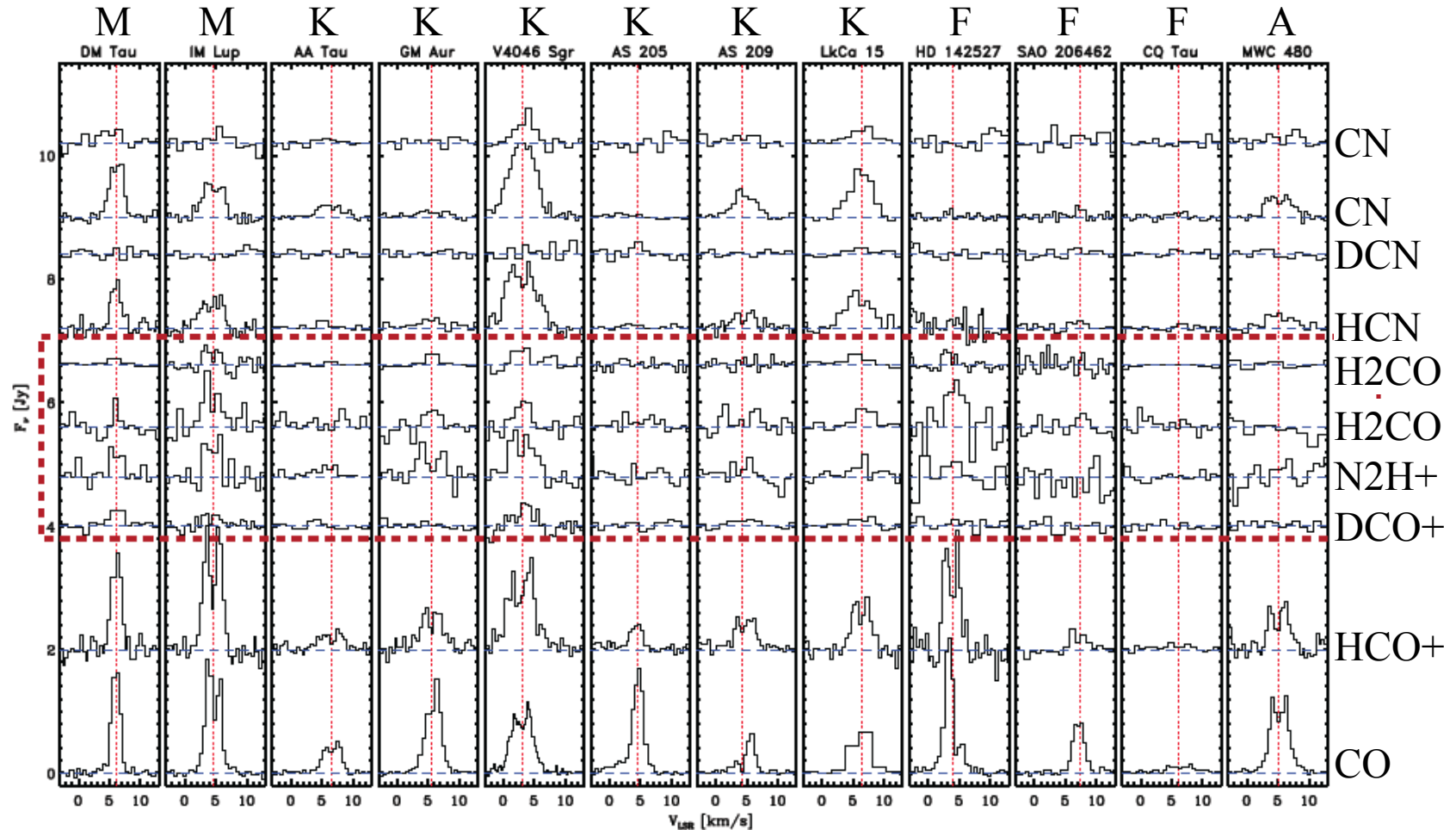
円盤サイズ: 2500 AU以上



観測例 2  
~ chemistry ~



# 円盤で検出された主な分子

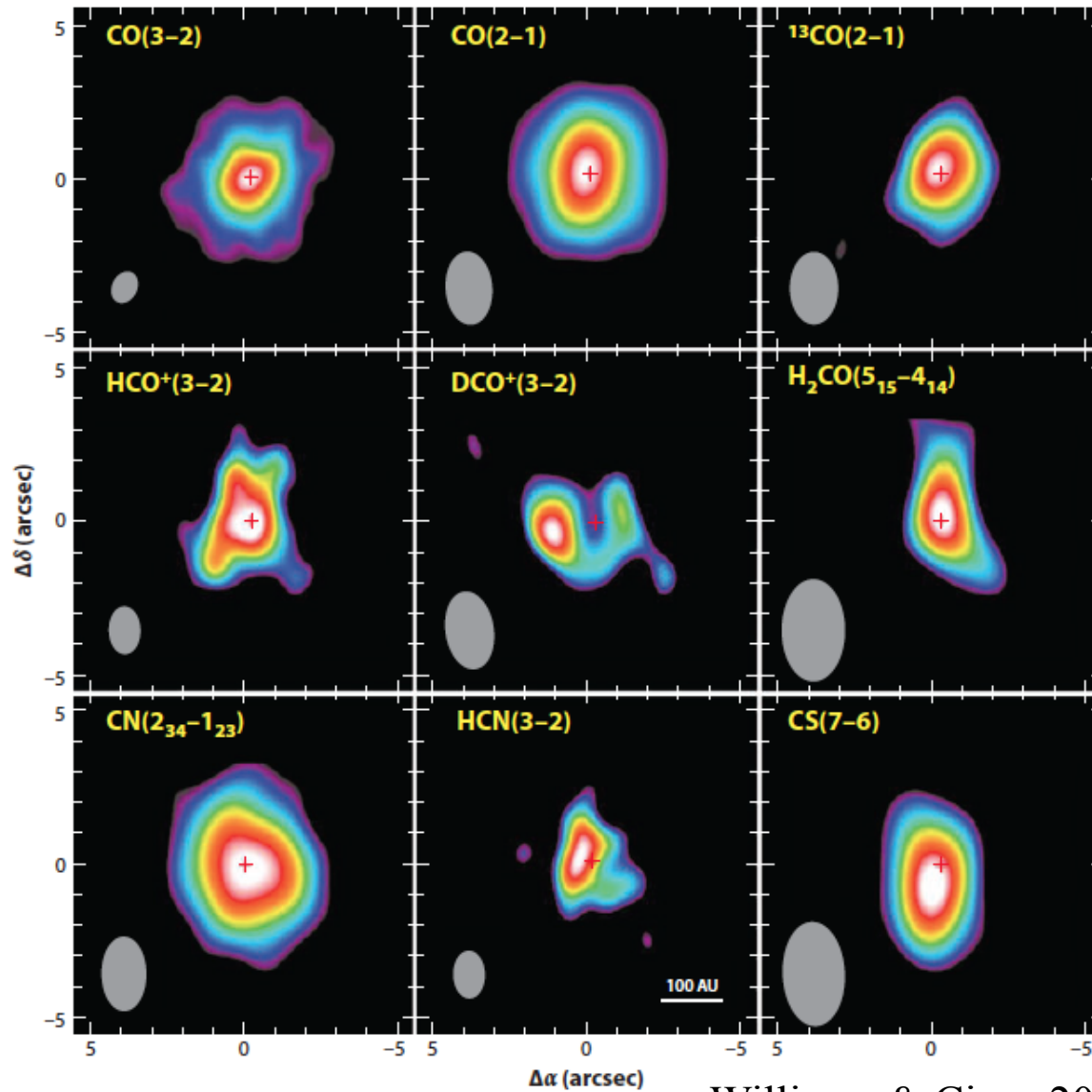


T Tau型星 :CO, HCO+, CN, N2H+, CCH, CS, H2CO, DCO+, DCN, HD, HC3N

Herbig型星:CO, HCO+, CN, HCN, CS, H2CO

T Tauri型星の方が分子が豊富に存在する。 Öberg et al. 2010, 2011

# TW Hyaの例



Williams & Cieza 2011

# Herbig型星 vs T Tauri型星の分子量

Molecular Species	AB Aur	DM Tau
	N/N( <sup>13</sup> CO)	N/N( <sup>13</sup> CO)
H <sub>2</sub>	$1.5 \times 10^6$	$1.0 \times 10^7$
<sup>13</sup> CO	1	1
HCO <sup>+</sup>	$1.5 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$
HCN	$1.3 \times 10^{-5}$	$7.0 \times 10^{-4}$
CS	$< 8.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-4}$
CCH	$< 5.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$
CH <sub>3</sub> OH	$< 2.0 \times 10^{-1}$	0

Schreyer et al. 2008, Pietu et al. 2005

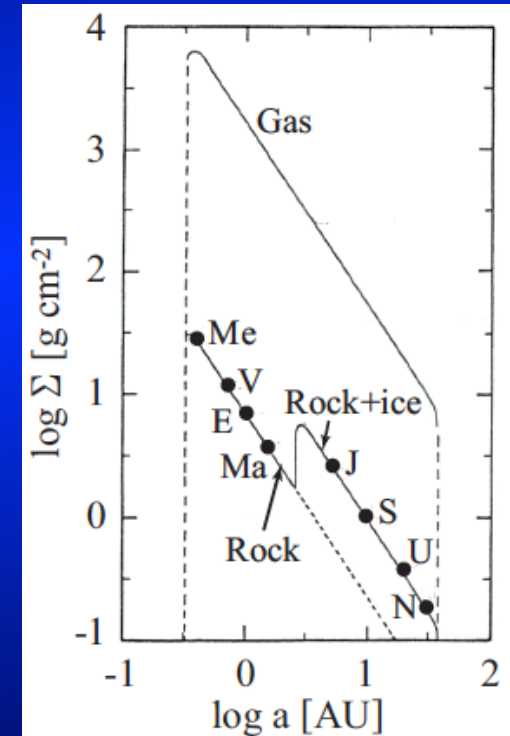
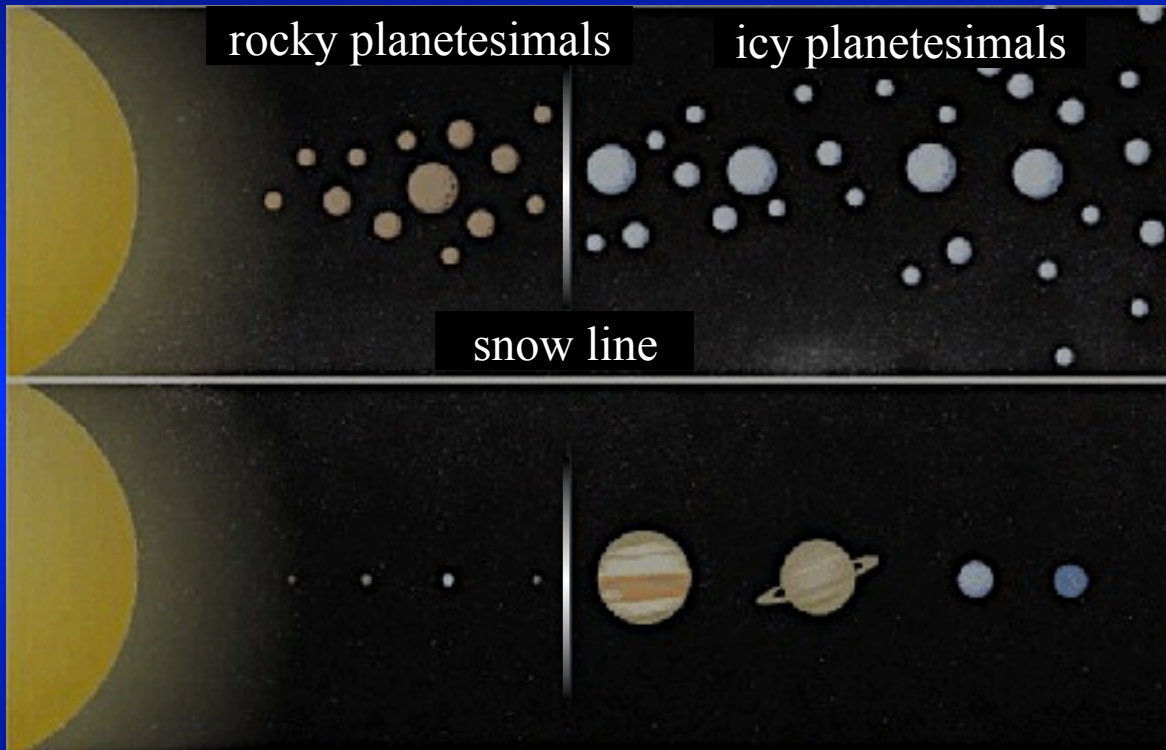
Herbig型星の方が分子が少ない。

Herbig型星では分子が気体で存在しダストに吸着していない。

grain surface chemistryが起きにくい。

# スノーライン

スノーラインは惑星系形成を考える上で非常に重要  
→ どこにどの種の惑星が形成されるかを左右する。



Hayashi 1981

スノーラインを観測したい

H<sub>2</sub>Oのスノーライン、本田さんの講演

# HD 163296 COのスノーライン1

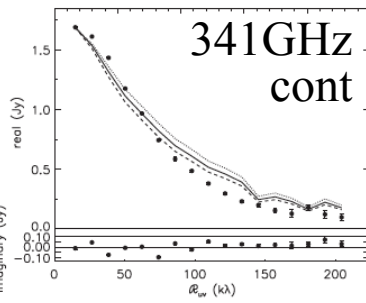
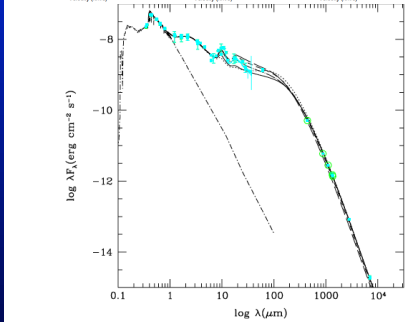
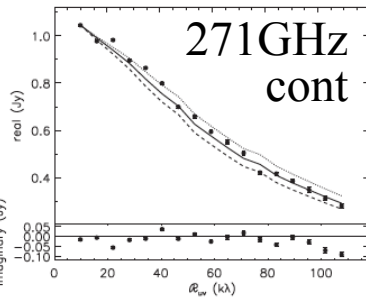
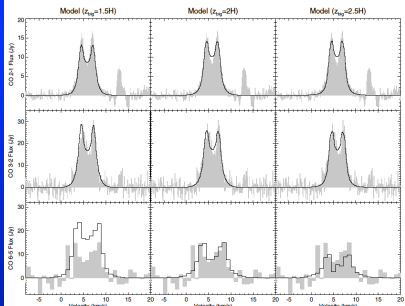
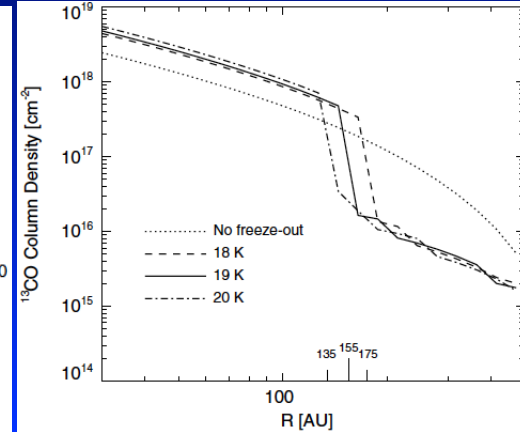
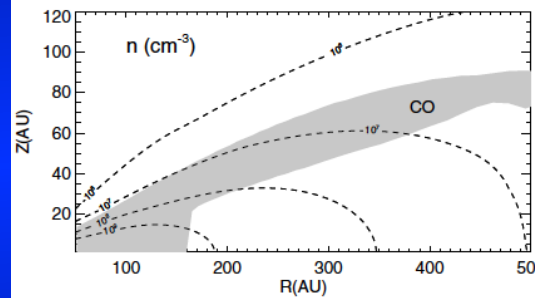
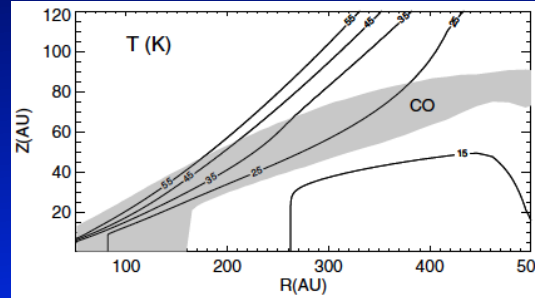
SMA

Continuum and Emission Line Results

$\lambda$ (mm)	Beam	P.A.	Flux (Jy)
1.36	$3''.5 \times 2''.2$	$55^\circ 8'$	$0.615 \pm 0.004$
1.33	$4''.7 \times 2''.8$	$24^\circ 2'$	$0.670 \pm 0.007$
1.11	$3''.0 \times 1''.9$	$57^\circ 8'$	$1.039 \pm 0.007$
0.88	$1''.8 \times 1''.3$	$47^\circ 6'$	$1.74 \pm 0.12$
0.44	$2''.7 \times 2''.2$	$-6^\circ 9'$	$7.5 \pm 0.5$

Transitions	Beam	P.A.	Integrated intensity <sup>a</sup> (Jy km <sup>-1</sup> )
CO 2-1	$2''.1 \times 1''.8$	$10^\circ 5'$	$54.17 \pm 0.39$
CO 3-2	$1''.7 \times 1''.3$	$46^\circ 7'$	$98.72 \pm 1.69$
CO 6-5	$2''.7 \times 1''.4$	$1^\circ 8'$	$58.66 \pm 6.44$
<sup>13</sup> CO 2-1	$1''.9 \times 1''.8$	$5^\circ 5'$	$18.76 \pm 0.24$
C <sup>18</sup> O 2-1	$1''.9 \times 1''.8$	$5^\circ 5'$	$6.30 \pm 0.16$
C <sup>17</sup> O 3-2	$3''.2 \times 2''.2$	$13^\circ 1'$	$11.64 \pm 0.76$

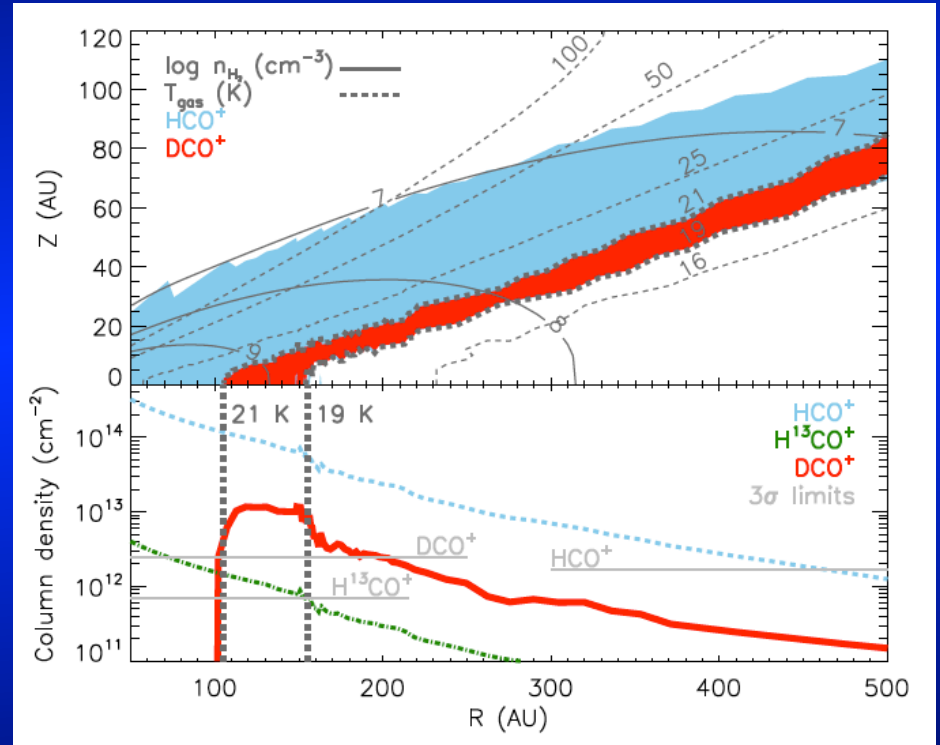
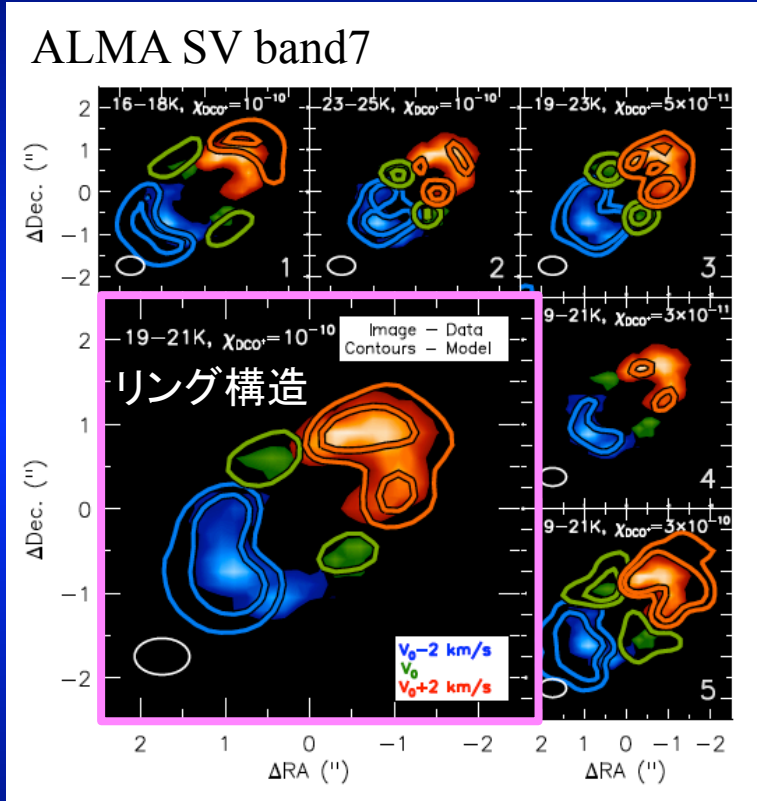


$^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 67 \pm 8$   
 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O} = 444 \pm 88$   
 $^{18}\text{O}/^{17}\text{O} = 3.8 \pm 1.7$

COのスノーライン: 155 AU

# HD 163296 COのスノーライン2

$\text{H}_3^+ + \text{HD} \rightarrow \text{H}_2\text{D}^+ + \text{H}_2 + 220\text{K}$  (Wootten 1987, Roberts & Miller 2000)  
 $\text{H}_2\text{D}^+ + \text{CO} \rightarrow \text{H}_2 + \text{DCO}^+$  COが凍る $\sim 20\text{K}$ で効率的に $\text{DCO}^+$ が生成される (Caselli et al. 1999, Pagani et al. 2012)。



Mathews et al. 2013

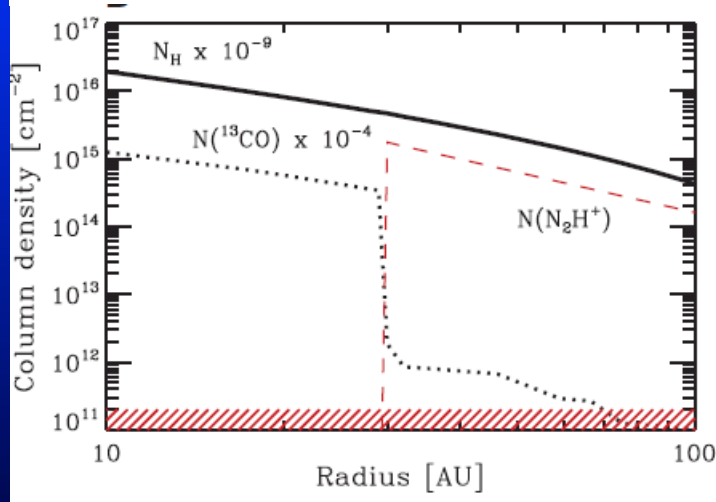
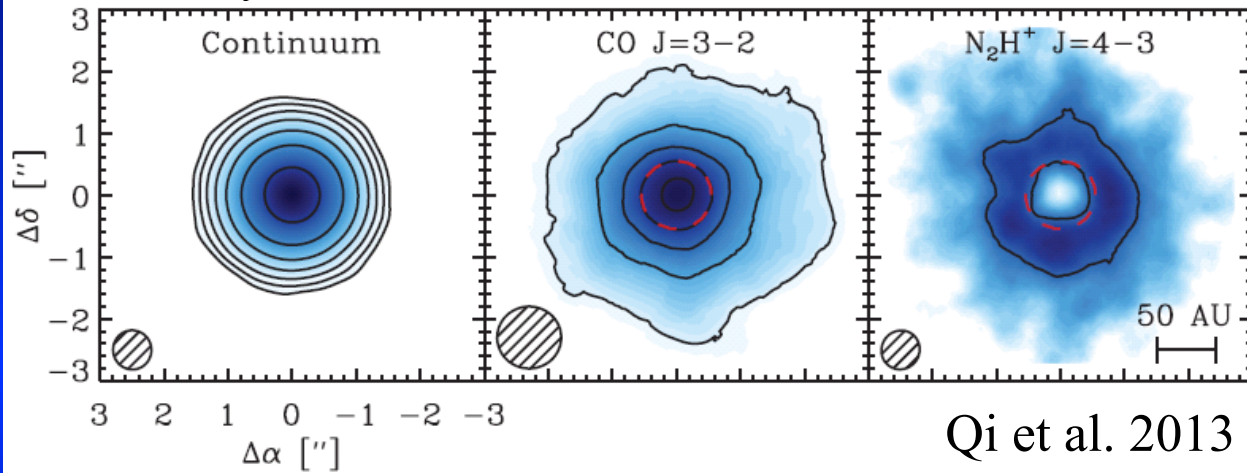
$[\text{DCO}^+]/[\text{HCO}^+] = 0.3 \times 10^4$  大きい。  
 $\text{DCO}^+$ がCOの凍結領域付近(110 – 160 AU)で増加している。  
 $\rightarrow$  COのスノーラインを検出した。

# TWHya COのスノーライン



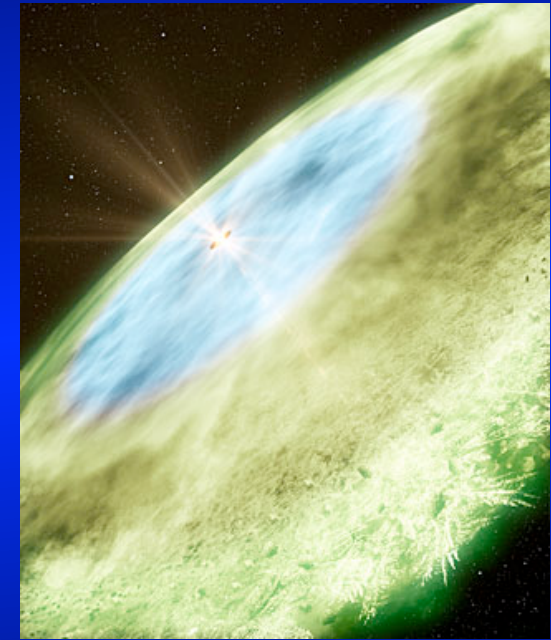
$\text{N}_2\text{H}^+$ が多く存在すればCOはdepletionしている事を意味する。

ALMA cycle0 band7



COが減少している  
ところで $\text{N}_2\text{H}^+$ が  
増加している。

COスノーライン  $R \sim 30$  AU  
chemistryならではの手法

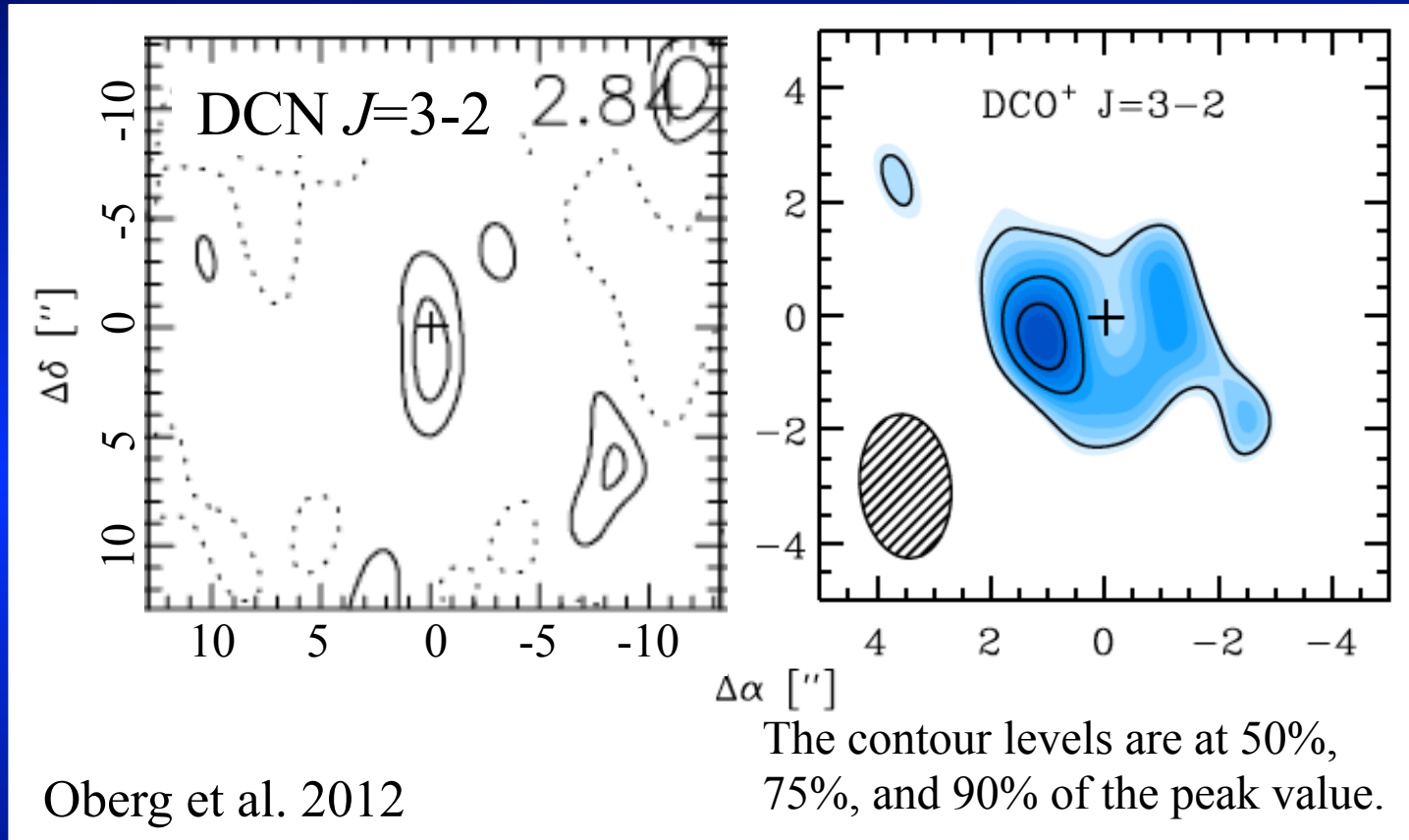


B. Saxton & A. Angelich/  
NRAO/AUI/NSF/ALMA  
(ESO/NAOJ/NRAO)

Qi et al. 2013c

# Deuterium Enhancement TW Hya (1)

DCN ( $J=3-2$ ) 217.238 GHz @ ALMA band 6

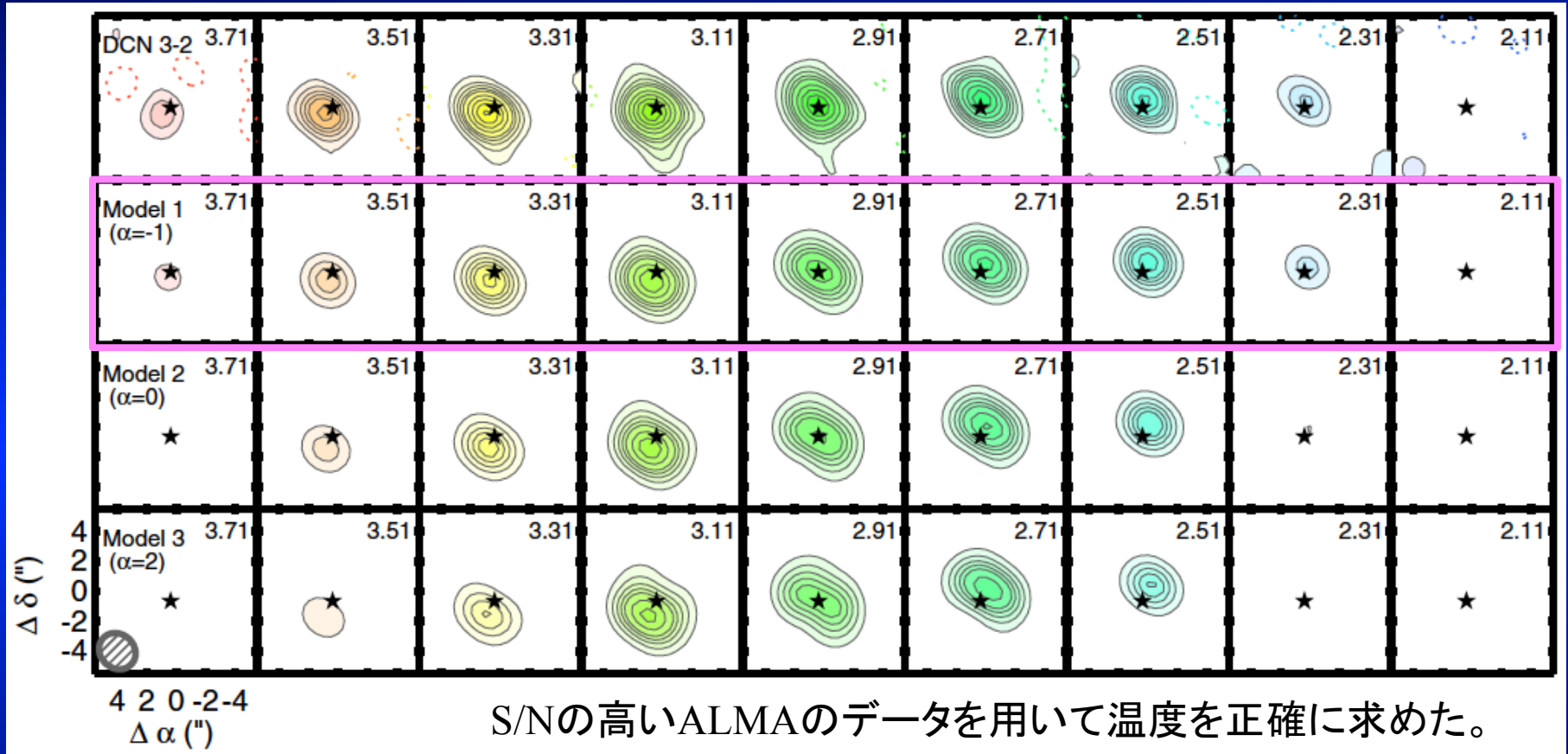


- The image with higher S/N ratio was obtained.
- It becomes capable of applying to the model fitting much better.



# Deuterium Enhancement TW Hya (2)

Multiple pathways to deuterium enhancements in protoplanetary disks.



DCN forms at higher temperature than DCO+. Oberg et al. 2012

DCN formation : via  $\text{CH}_2\text{D}^+$  at  $T > 30 \text{ K}$

DCO+ formation : via  $\text{H}_2\text{D}^+$  at  $T < 30 \text{ K}$

# 円盤で初めてのc-C3H2の検出

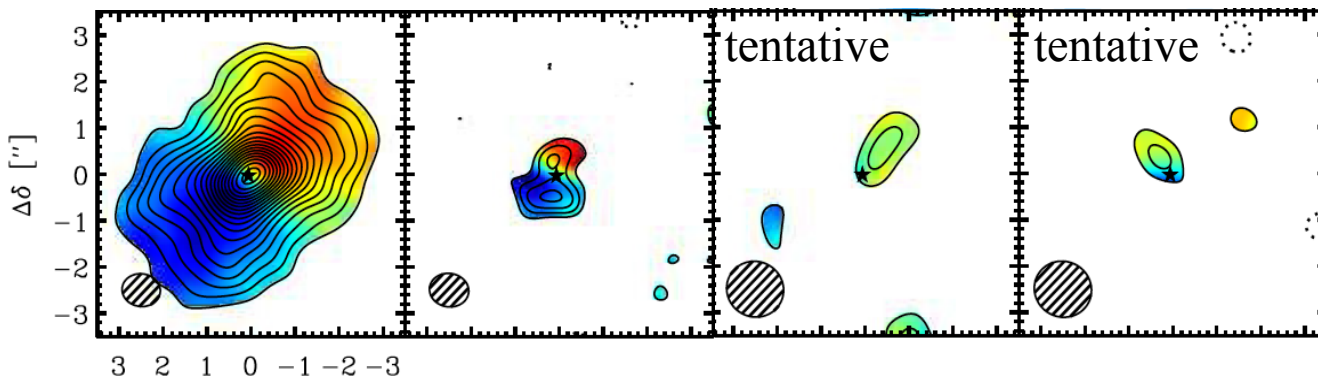
ALMA SV band6 HD163296

12CO(3-2)

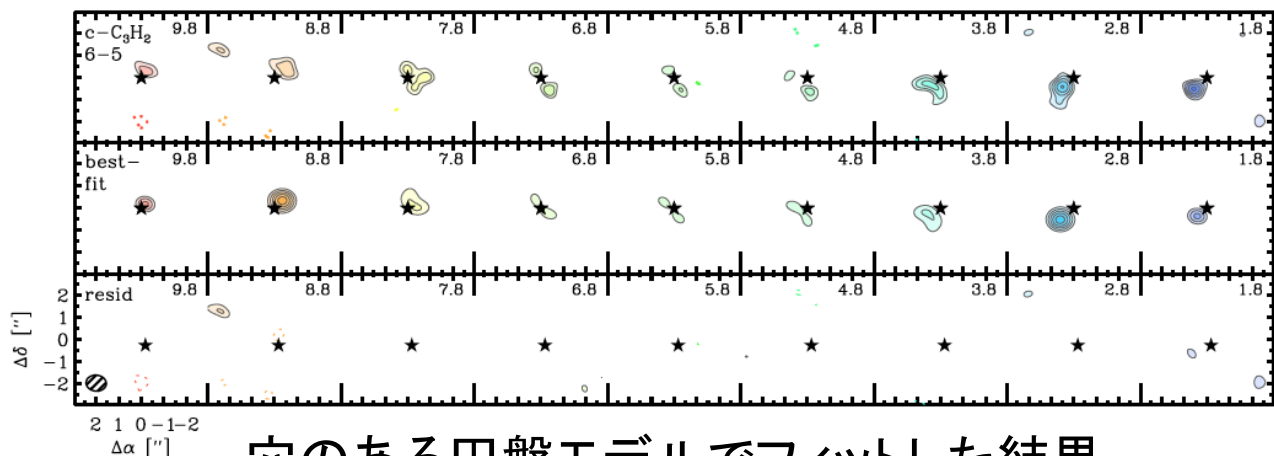
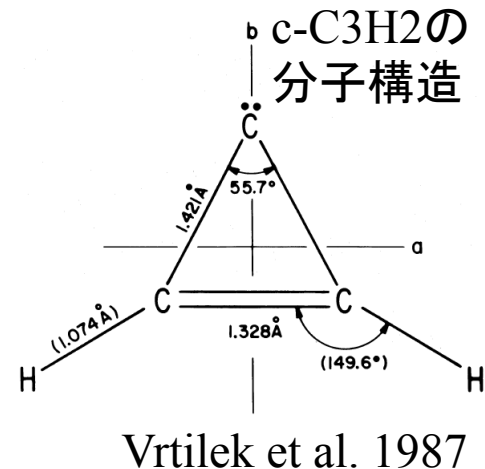
c-C3H3(6-5)

c-C3H3(5-4)

c-C3H3(3-2)



ダブルピークを検出 → 穴が開いている可能性あり



観測

モデル

残差

穴のある円盤モデルでフィットした結果

内径 = 30 AU、外径 = 165 AU (COの円盤サイズは500AU以上)

MWC 480, LkCa15, GO TauでH3CNの検出 (Chapillon et al. 2012)

# 円盤の外縁部の構造

# Similarity Solution Disk Model

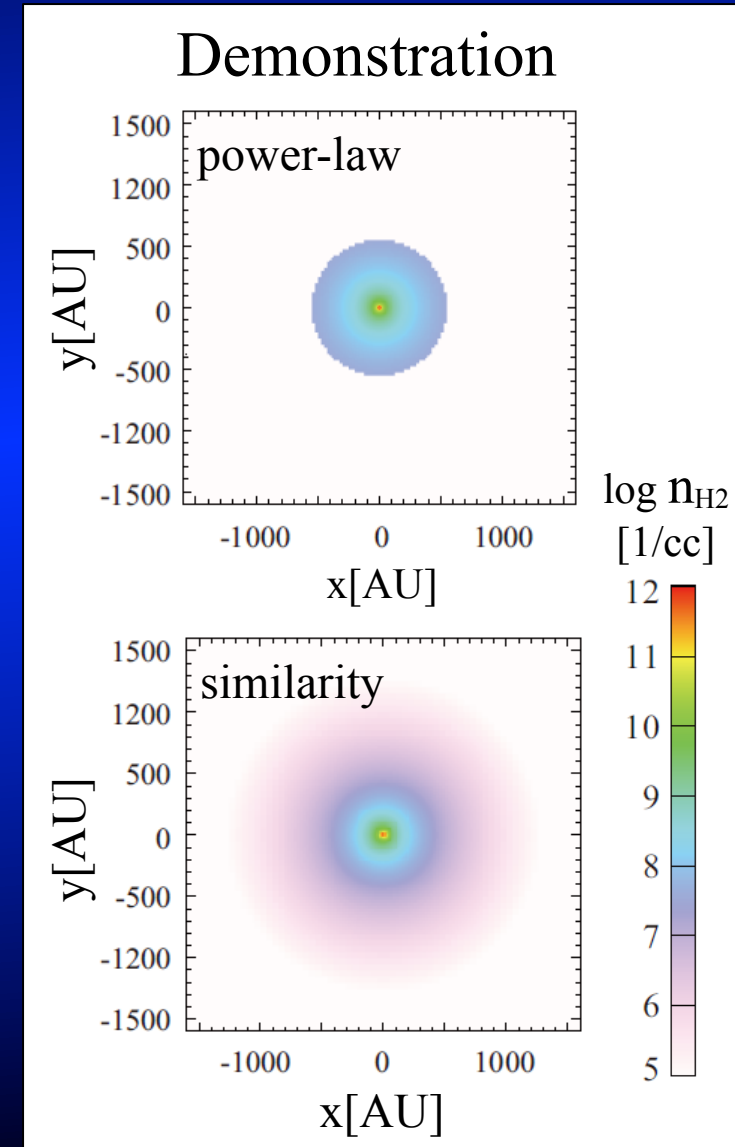
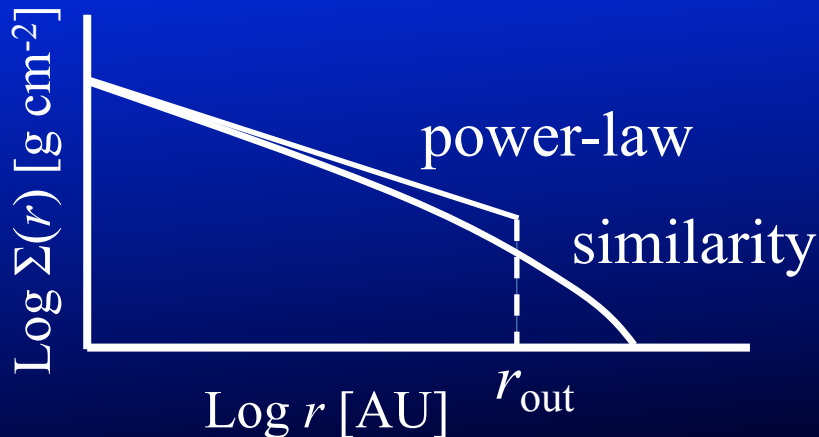
- Similarity solution for the surface density (Hughes et al. 2008)

$$\Sigma(r) = \frac{C_1}{r^p} \exp\left[-\left(\frac{r}{C_2}\right)^{2-p}\right]$$

$C_1$  normalized surface density

$C_2$  distance where  $\Sigma(r)$  starts decreasing exponentially

- Radial temperature distribution  
Same as power-law disk model
- Difference between the two models  
truncation caused by power-law

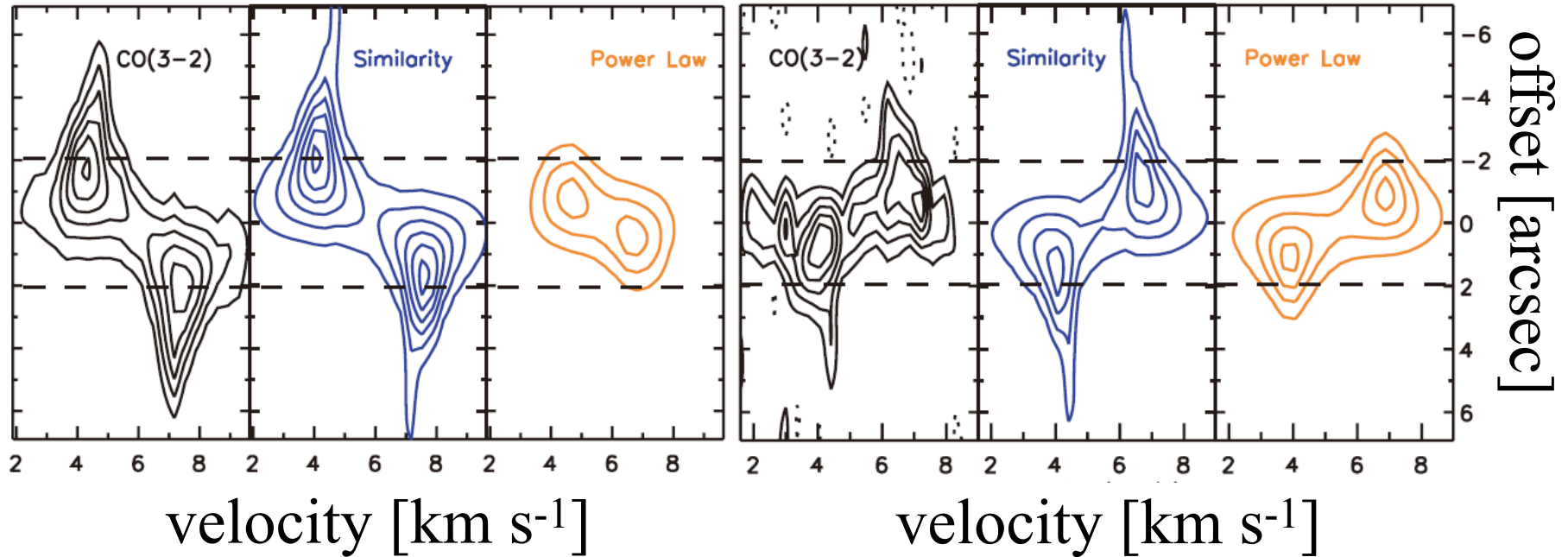


# Similarity Solutionの成功例1

SMA

HD163296

HD31648



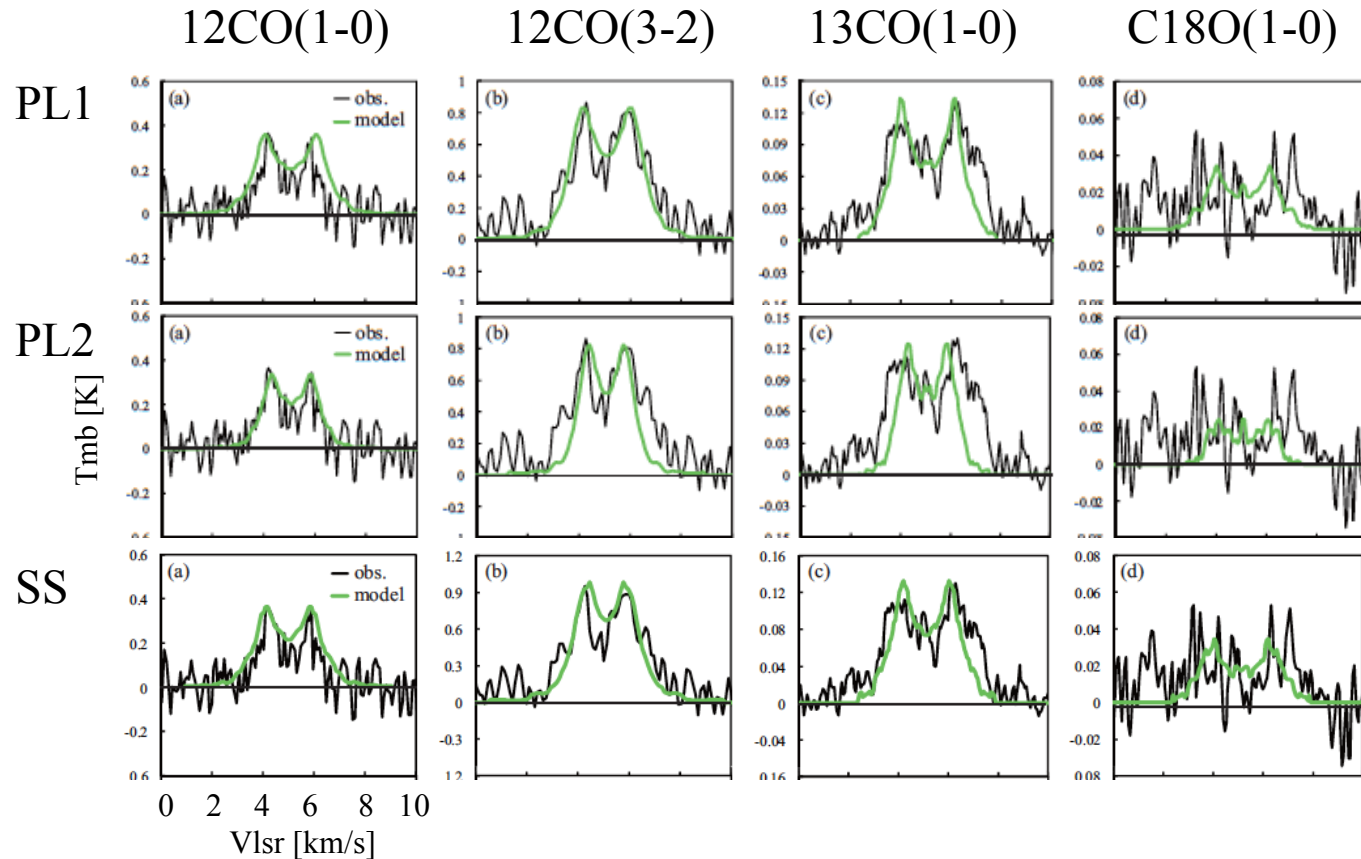
Hughes et al. 2008

Power lawよりもSimilarity Solutionの方が観測をよく再現する。

# Similarity Solutionの成功例2

NRO45/ASTE

MWC 480

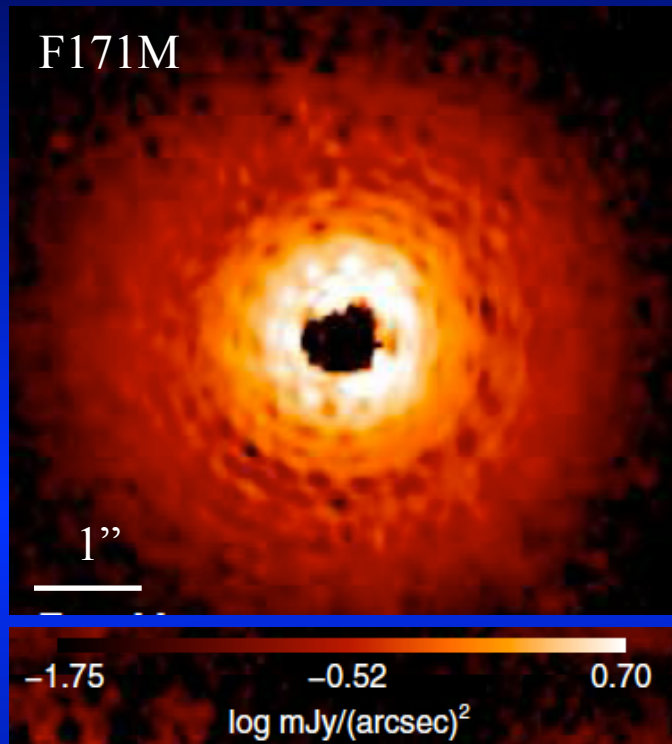


複数のガス輝線でもsimilarity solutionが有効であることを確認

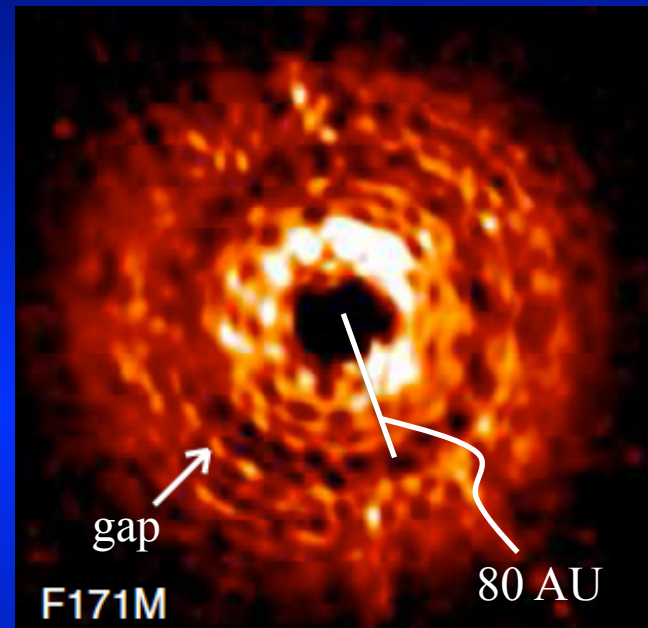
# TW Hyaの最新結果1

HST

F171M



$r^2$ の重みをつけるとgapが顕著に見える。イメージング手法の一つ



Debes et al. 2013

# TW Hyaの最新結果2

- 電波では $\Sigma(r)$ が緩やかに減少するモデルとよく合うが、NIRでは急激な減少の方がよく合う。
  - 層構造があることを指示している。
- 6 – 28地球質量の惑星が80AUの場所にあると思われる。
- 太陽系では木星が形成されるtime scaleは $10^7$ 年程度。しかしTW Hyaでは $7 \times 10^6$ 年で海王星軌道の約3倍の場所で海王星型惑星が形成されていると思われる。
  - 惑星形成論で予測されるtime scaleと合わない。早く惑星を形成させるメカニズムが必要である。可能性として円盤の一部でgravitational instabilityが発生していれば、中心星から離れたところでも短時間で惑星を形成する事ができる。



# まとめ

1. Transitional Diskの詳細構造が明らかになってきた。形成メカニズムについてはまだ不明。  
grain growth、photoevaporation、multiple planetsによる効果を調べたが、どれも完全に説明することは困難。
2. 温度や密度の層構造  
HD163296で円盤の層構造を直接確認した。
3. COのスノーラインの検出。  
chemistryの力を駆使
4. 円盤外縁部の構造  
電波ではexponential tailの構造だが、NIRではtruncationに近い構造と一致する。