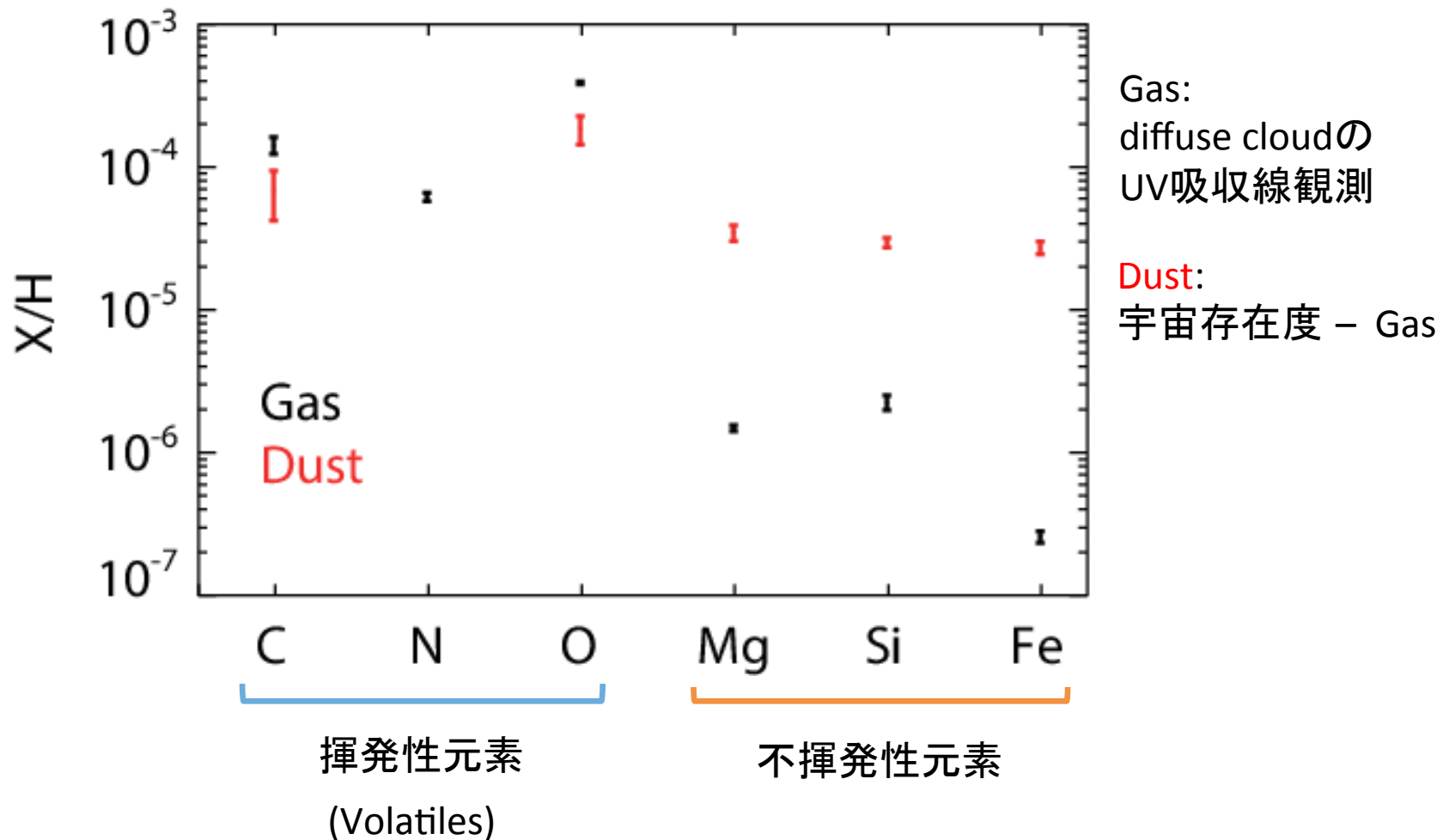


# 原始惑星系円盤の揮発性物質： 観測とモデル

古家健次

筑波大学 計算科学研究センター

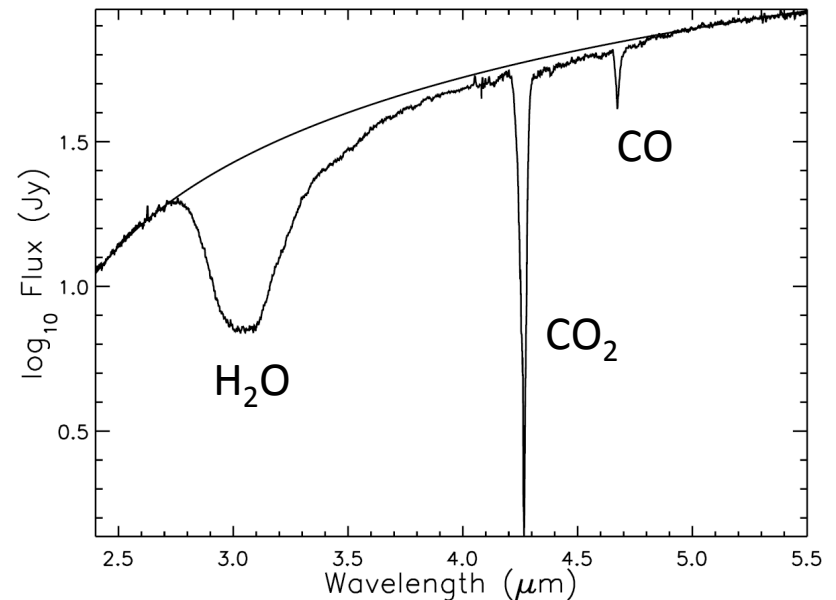
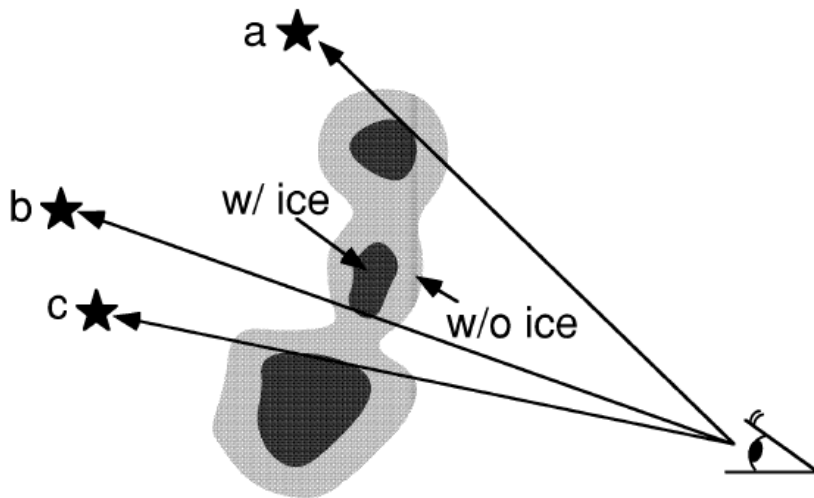
# Diffuse ISMの元素存在度



(Przybilla et al. 2008 and references therein)

# 揮発性元素キャリア (分子雲・分子雲コア)

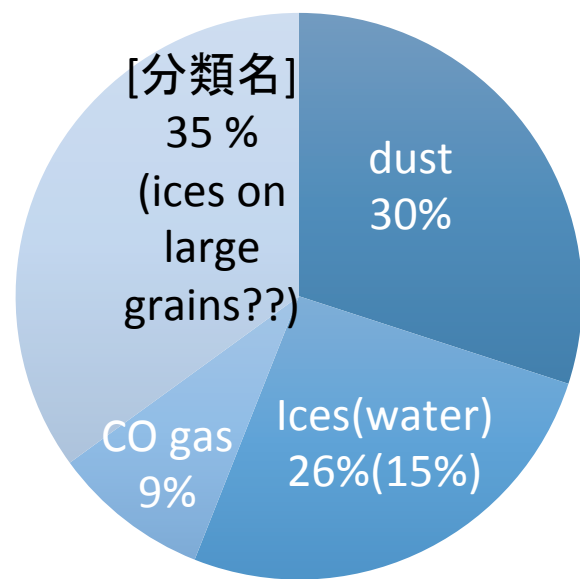
- 揮発性元素(C, N, O)の主なキャリア  
→ ガス、氷分子 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  etc.)



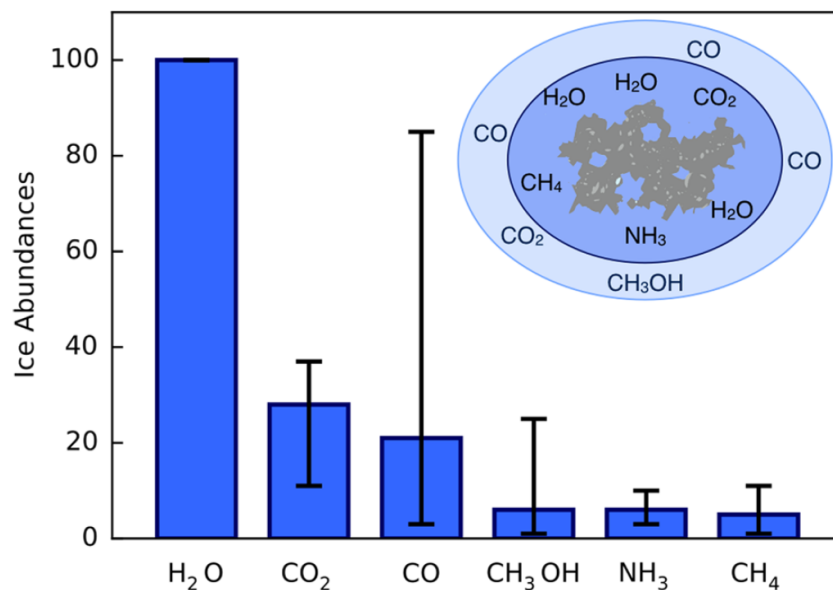
(Gibb et al. 2004)

# 揮発性元素キャリア (分子雲・分子雲コア)

- 揮発性元素(C, N, O)の主なキャリア  
→ ガス、氷分子 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  etc.)

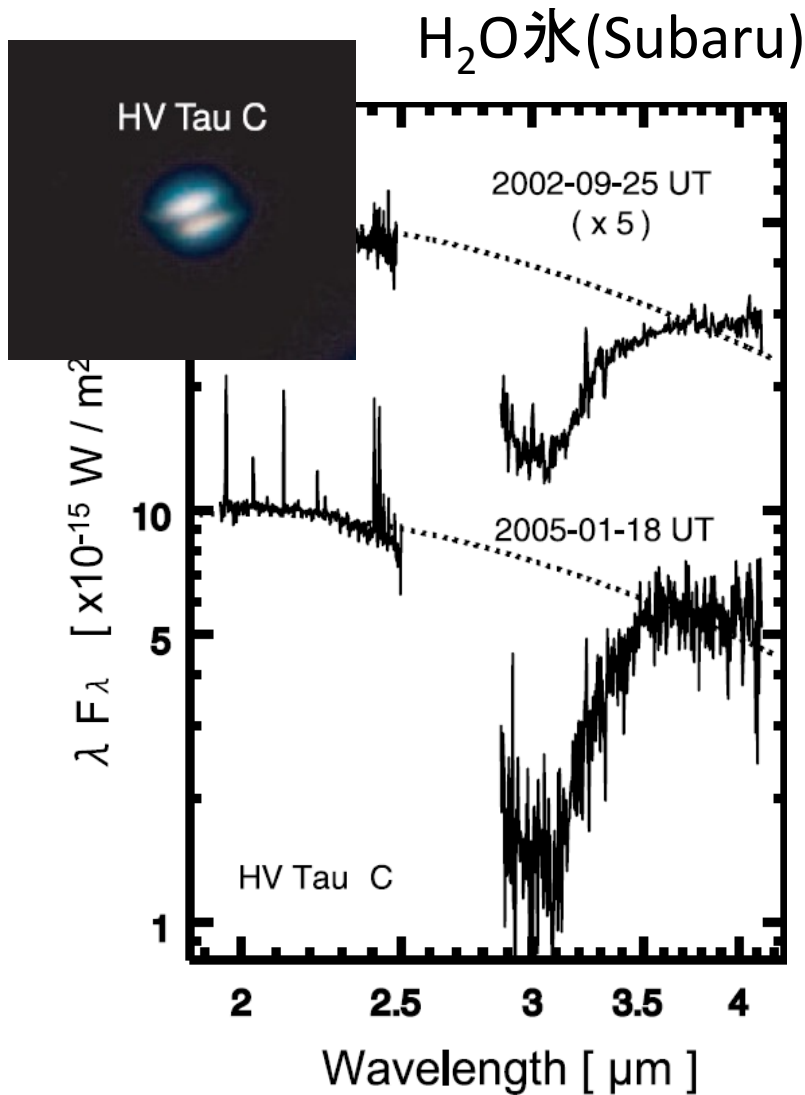


分子雲における酸素の存在形態  
(Whittet et al. 2007)

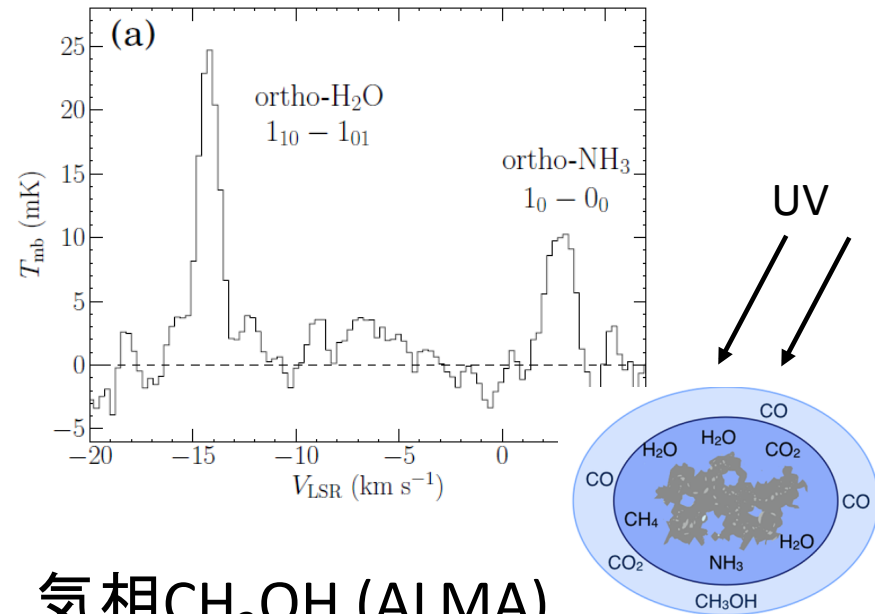


星形成領域の氷の組成  
(Öberg 2016)

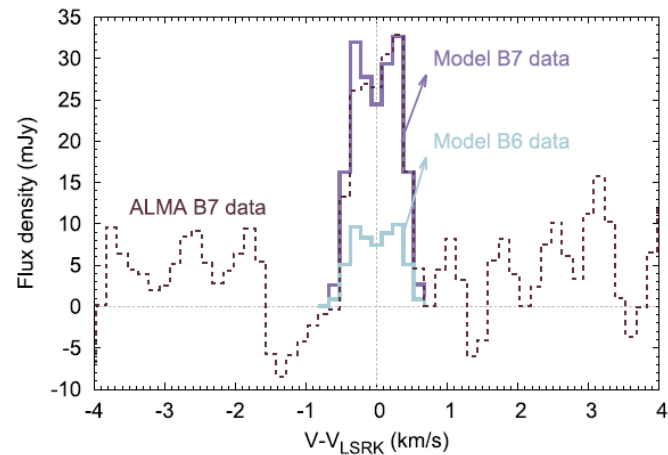
# 円盤観測



# 気相H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> (Herschel)



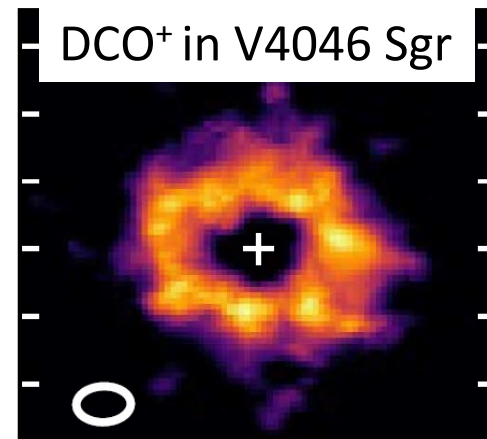
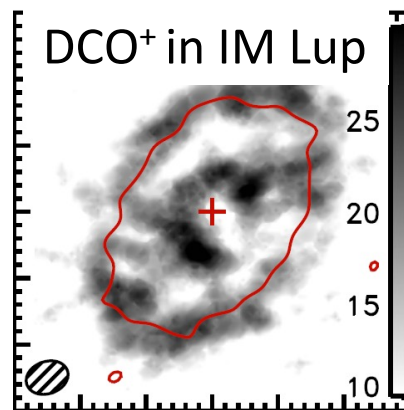
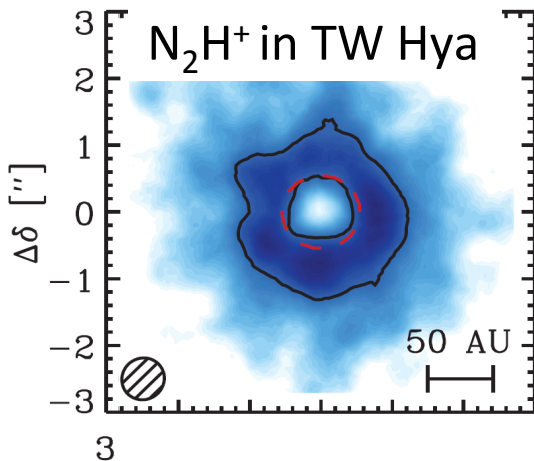
# 気相CH<sub>3</sub>OH (ALMA)



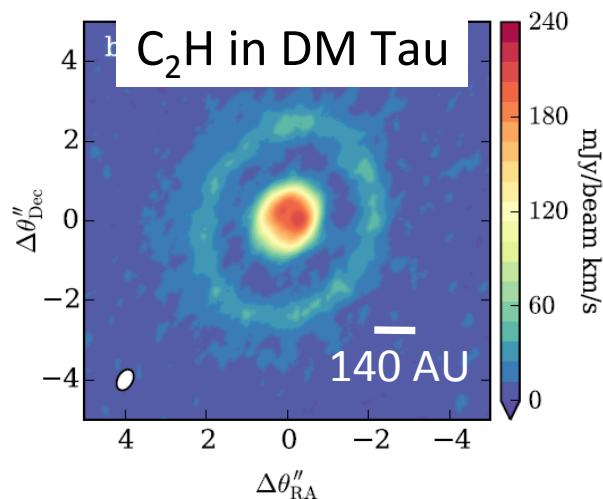
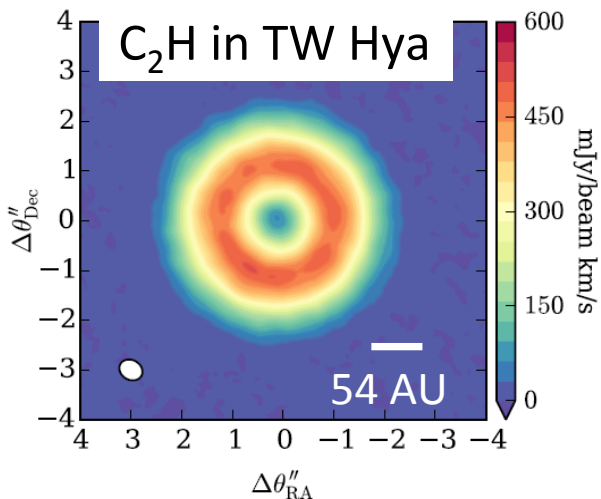
(Terada et al. 2007~, Honda et al. 2008~, Hogerheijde et al. 2011, Salinas et al. 2016)

# ALMA observations

CO スノーライン

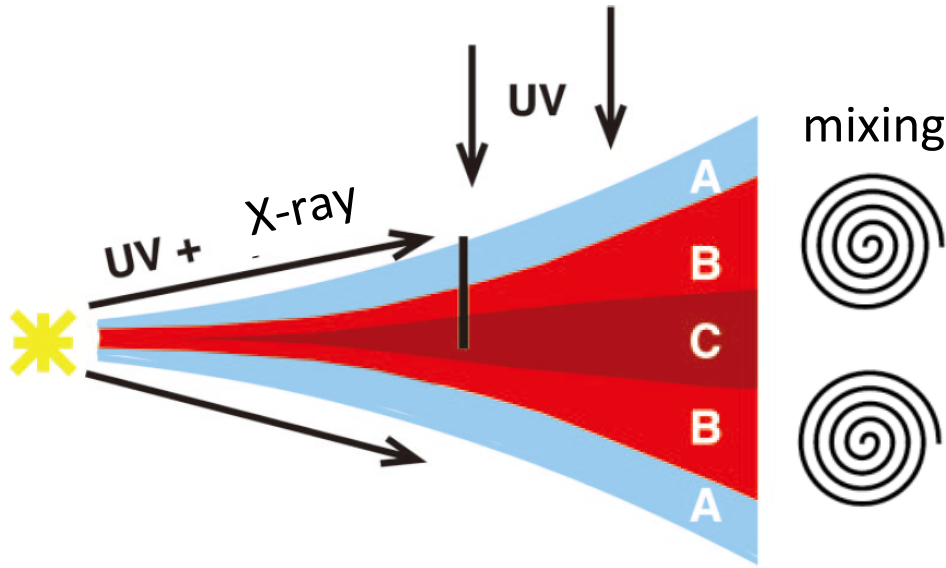


氷ダスト進化



(Qi et al. 2013; Oberg et al. 2015; Bergin et al. 2016; Huang et al. 2017)

# 円盤鉛直化学構造：三層モデル



(A) 光解離領域

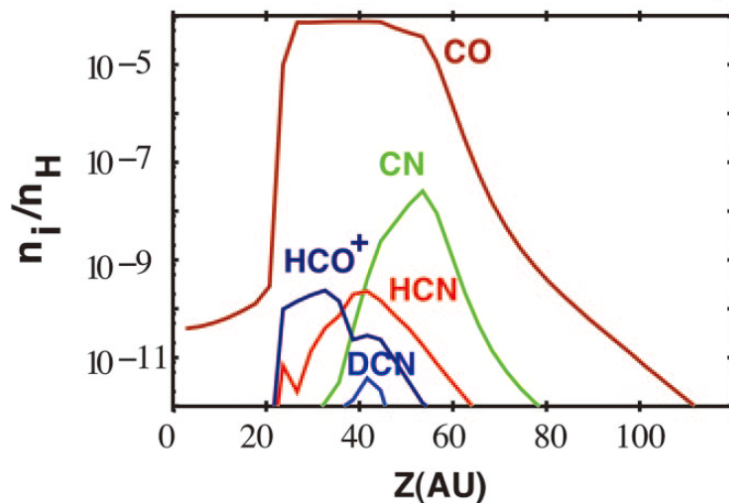
イオン・原子

(B) 分子層

ガス分子・イオン分子

(C) 赤道面

氷分子



(e.g., Aikawa et al. 2002; van Zadelhoff et al. 2003; van Dishoeck 2006)

# Outline

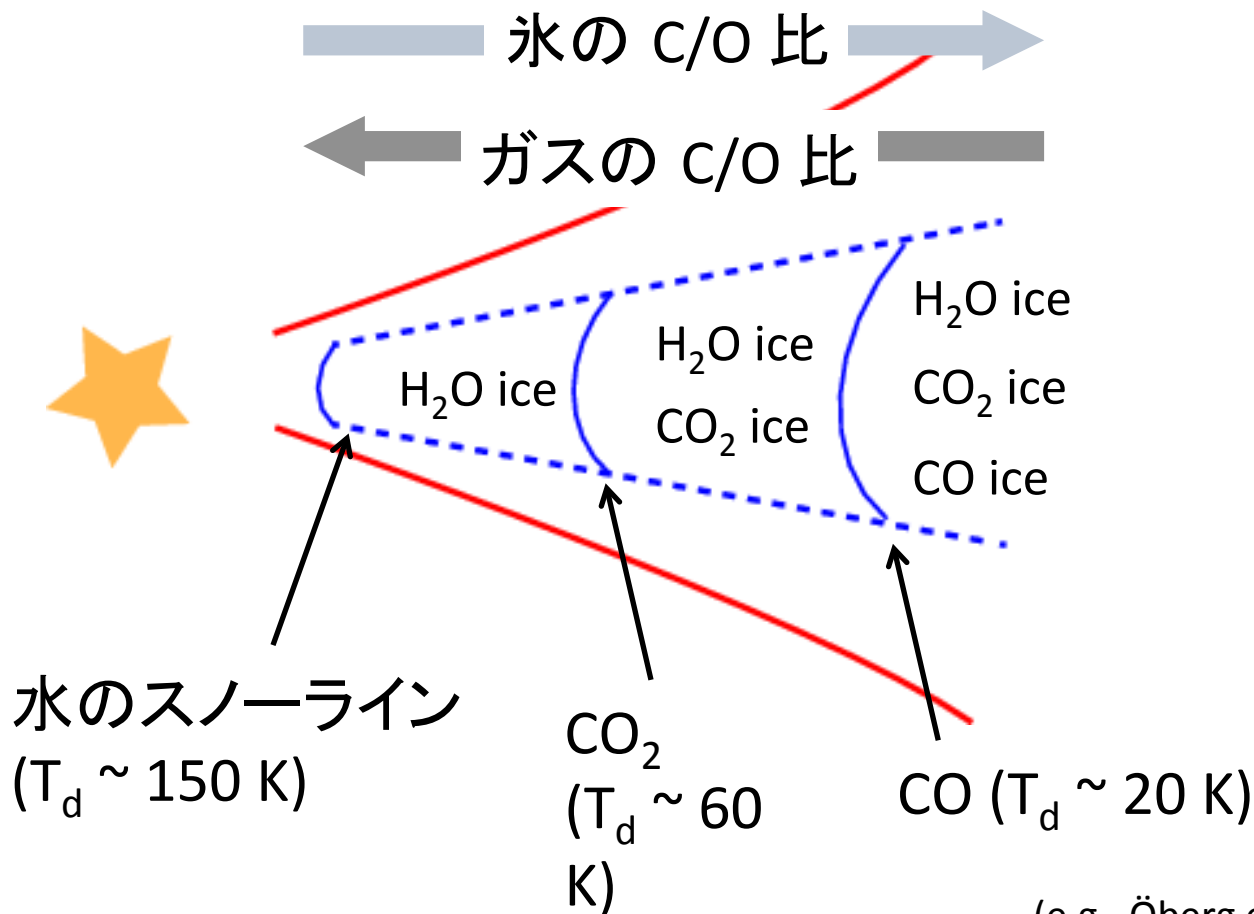
- イントロ
- COスノーライン (H<sub>2</sub>Oスノーライン → 野津氏)
- 円盤表層における揮発性元素の枯渇
- 複雑な有機分子、水素・窒素同位体



# スノーライン

= 氷の昇華半径

→スノーライン外側では主に氷、内側ではガスとして存在

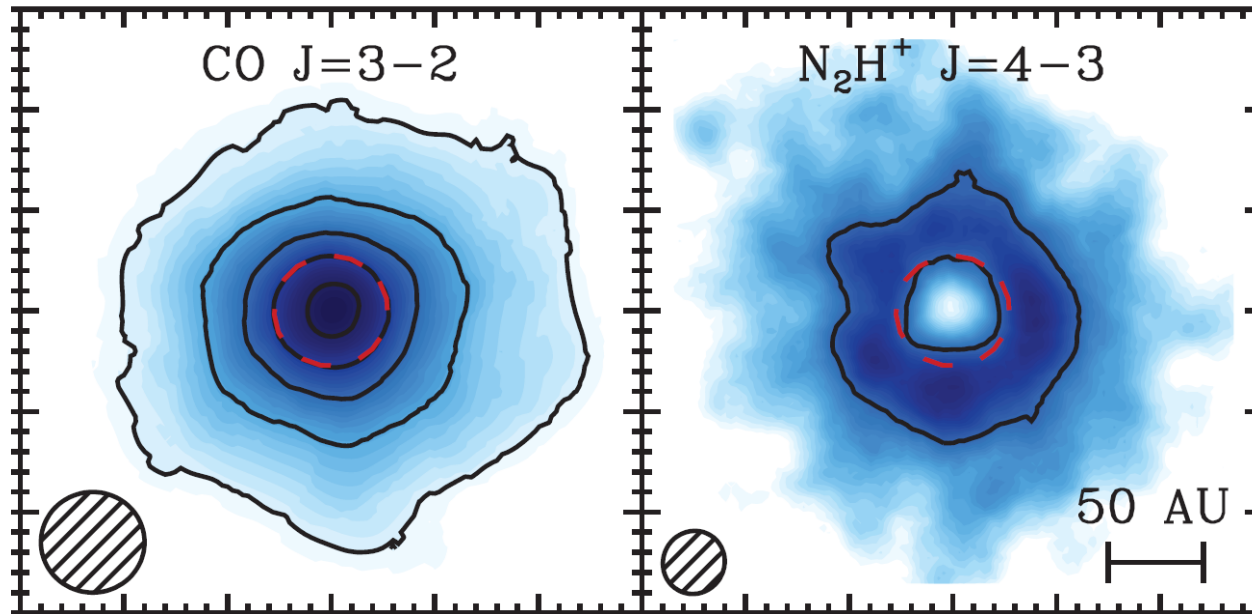


(e.g., Öberg et al. 2012)

# スノーラインの観測

- 直接撮像 ( $\text{H}_2\text{O}$ はALMAでも難しい)
- 間接的な観測 (野津氏講演)
  - 速度プロファイル  $\rightarrow$  半径構造
  - $E_{\text{up}}$ の異なる多輝線観測

# CO snowline probed by $N_2H^+$ in TW Hya



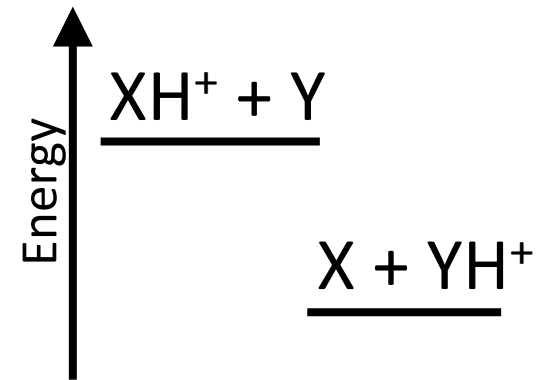
(Qi et al. 2013)

CO ice  $\rightarrow$  CO gas @  $\sim 20$  K

CO + N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>  $\rightarrow$  HCO<sup>+</sup> + N<sub>2</sub>

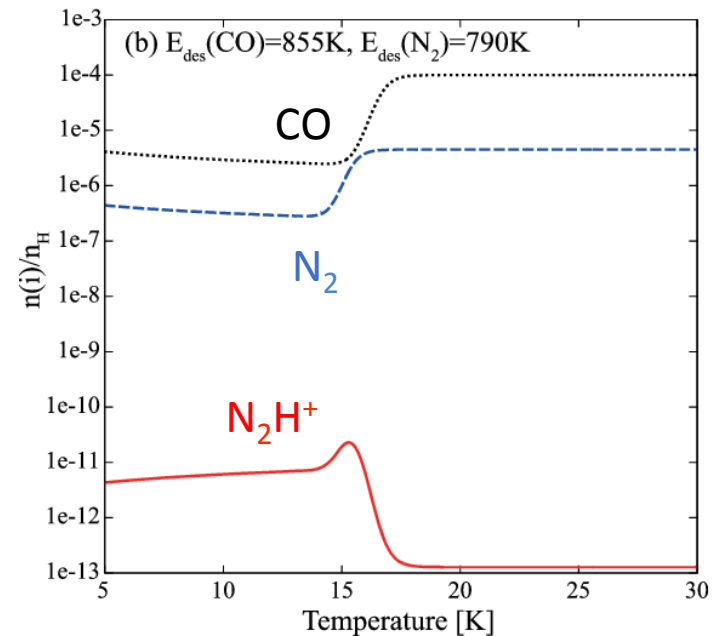
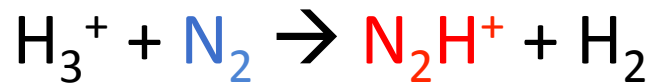
# プロトン親和力 (PA)

- If  $PA(X) < PA(Y)$

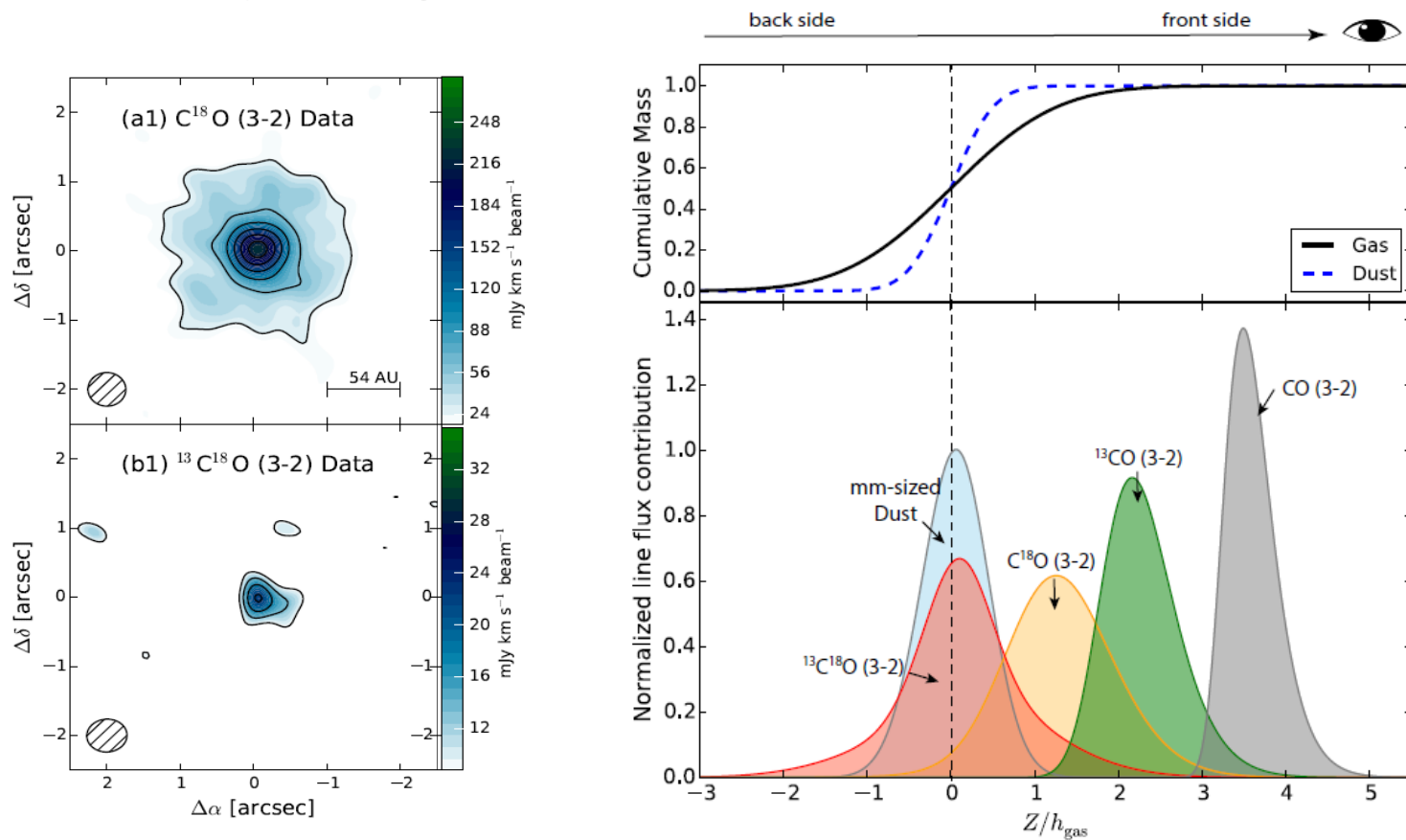


- PA:  $H_2 < N_2 < CO < H_2O$   
(4.4) (5.1) (6.2) (7.2) [eV]

- $T_{\text{sub}} : H_2 < N_2 < CO < H_2O$



# CO isotopologues in TW Hya

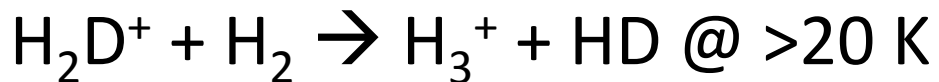
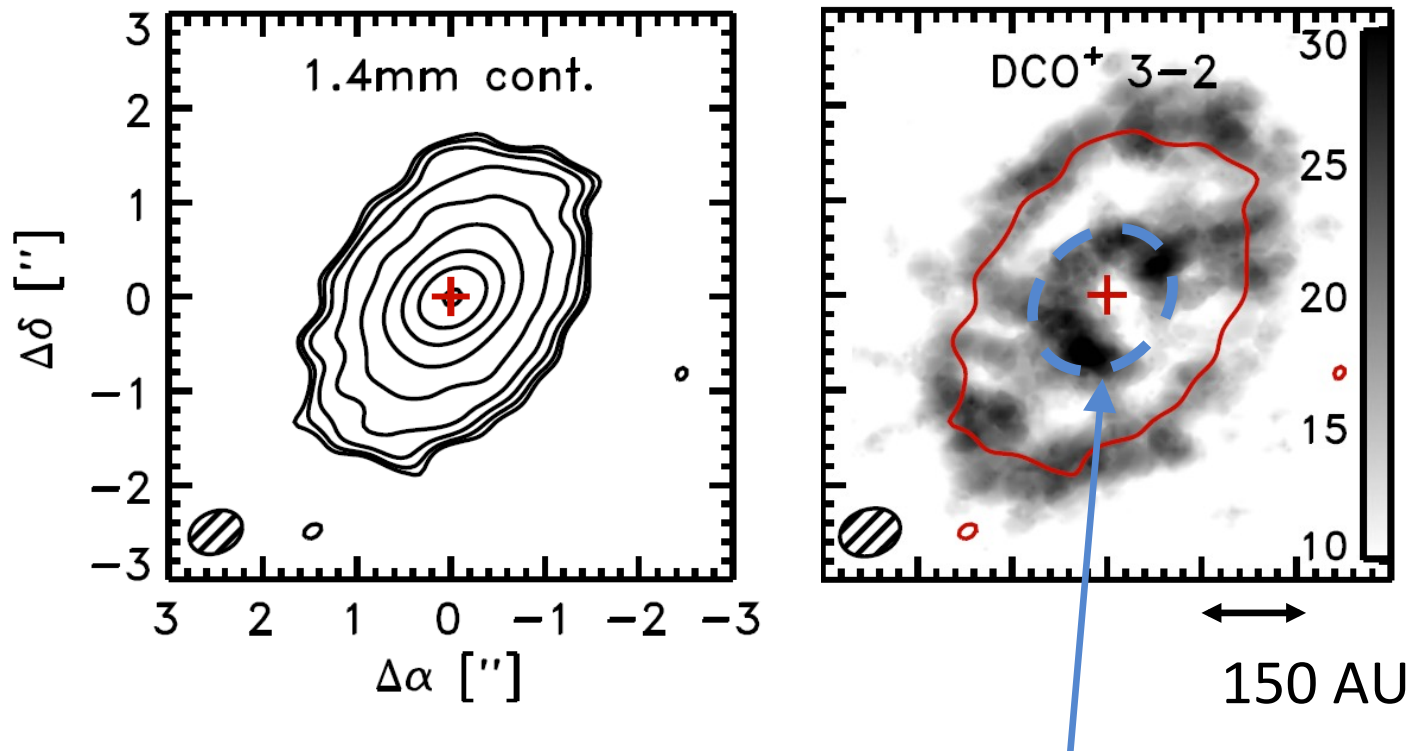


(Zhang et al. 2017)

- $C^{18}O$ は光学的に厚い、mm-dust、 $^{13}C^{18}O$ は薄い
- CO スノーライン  $\rightarrow$  20 AU ( $N_2H^+$ からの見積もりでは 30 AU)

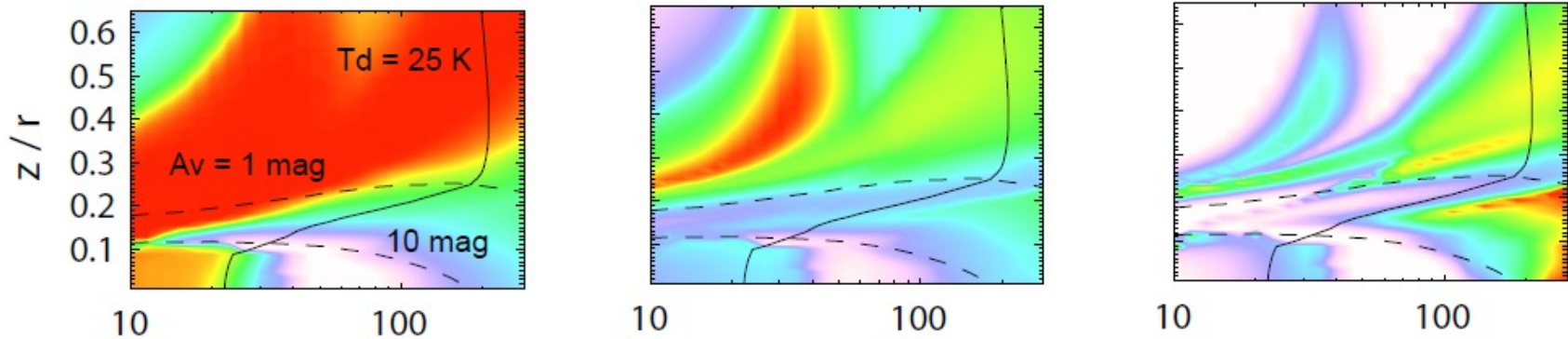
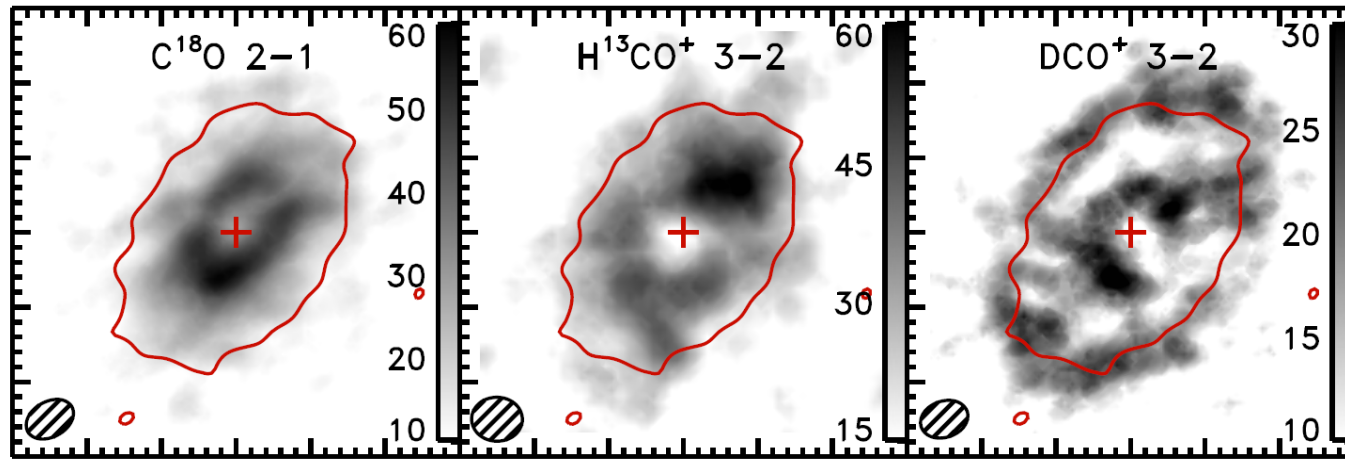
See also Schwarz et al. 2016

# DCO<sup>+</sup> double rings in IM Lup



(Öberg, KF, et al. 2015)

# DCO<sup>+</sup> double rings in IM Lup

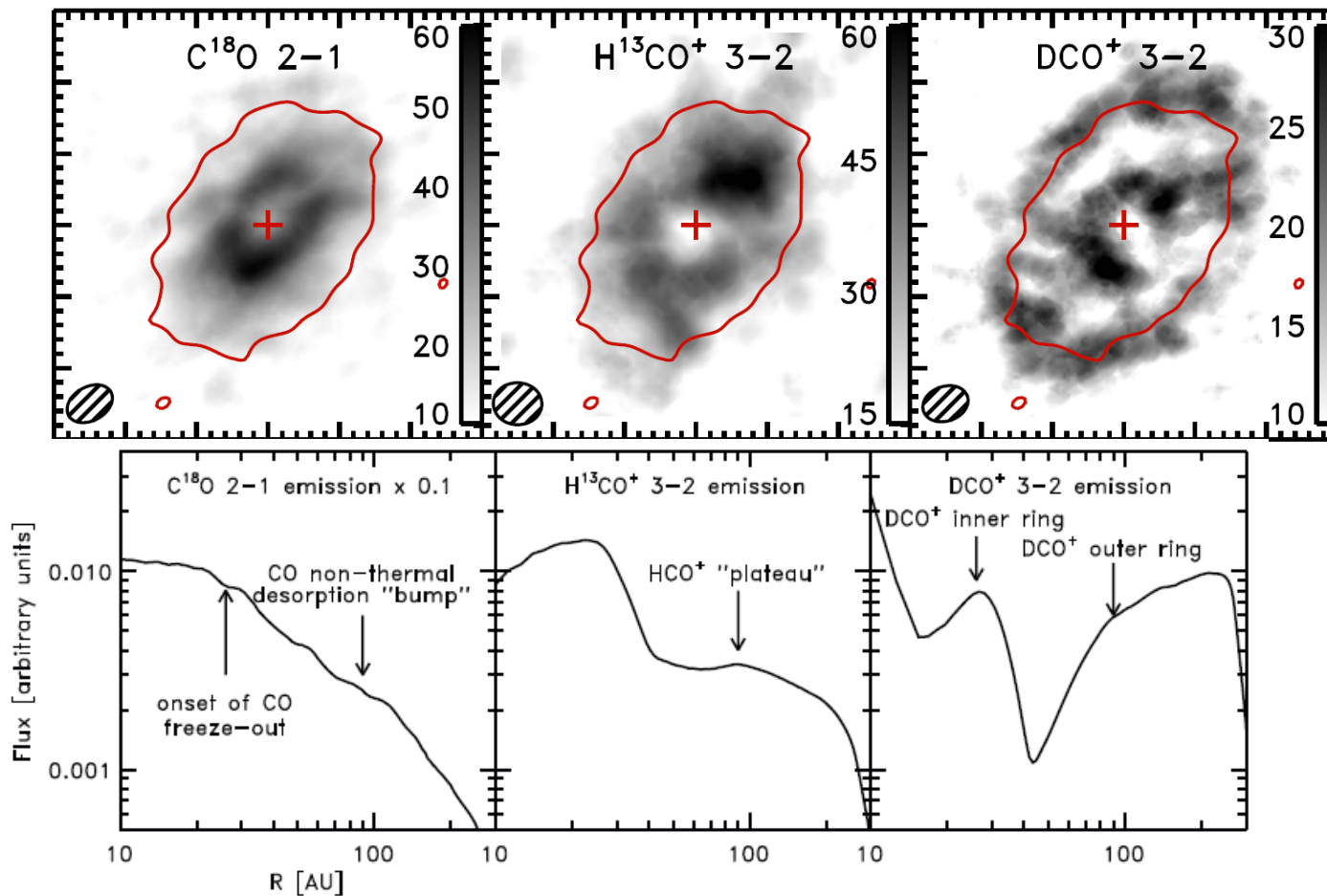


COの光脱離



(Öberg, KF, et al. 2015)

# DCO<sup>+</sup> double rings in IM Lup



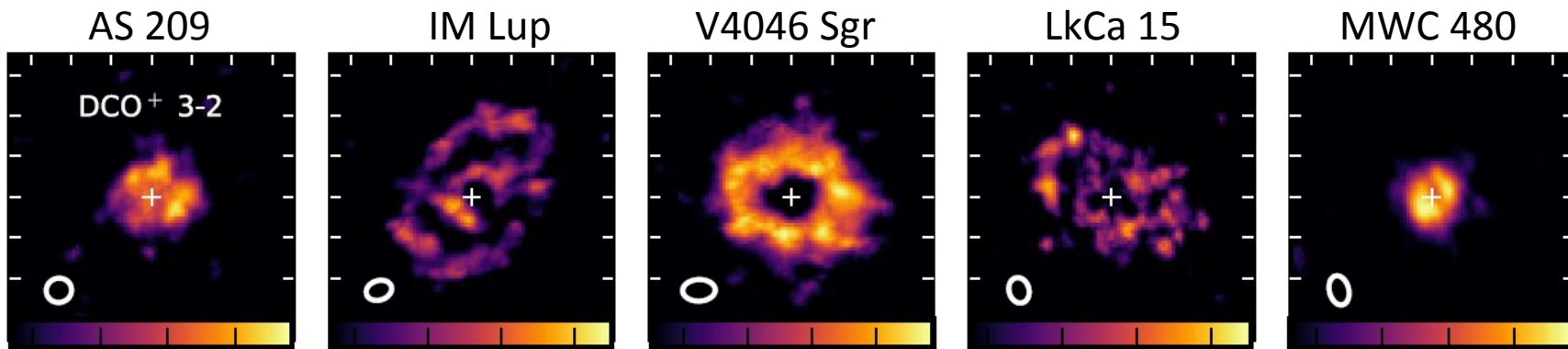
COの光脱離



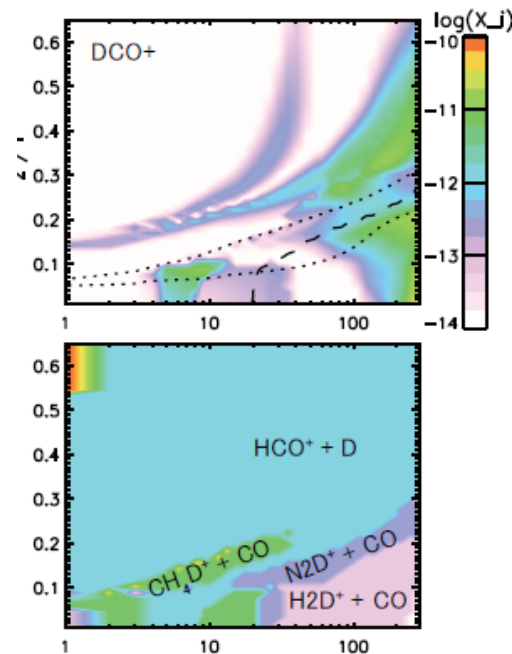
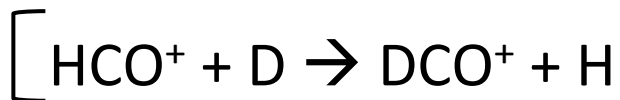
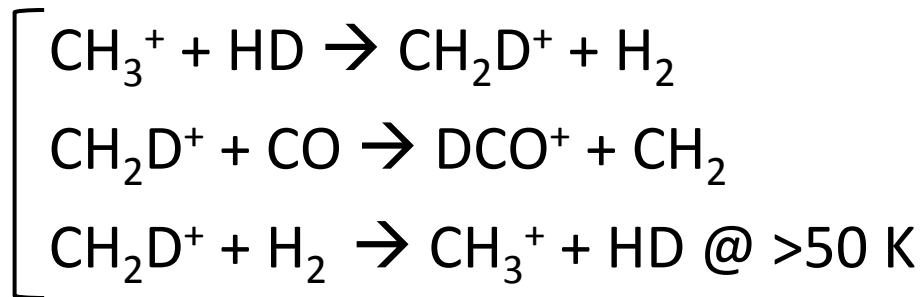
(Öberg, KF, et al. 2015)



# Multiple DCO<sup>+</sup> formation pathways



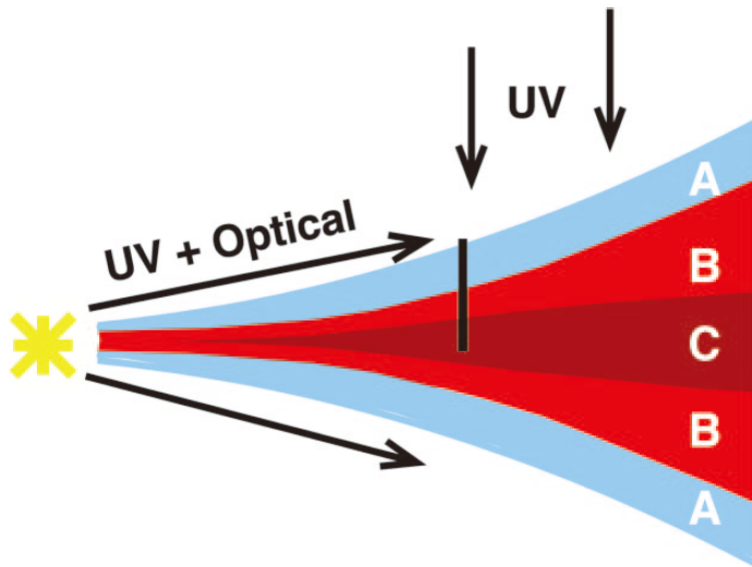
(Huang et al. 2017)



(Aikawa, KF, Herbst in prep., see also Favre et al. 2015)

# Outline

- イントロ
- COスノーライン (H<sub>2</sub>Oスノーライン → 野津氏)
- 円盤表層における揮発性元素の枯渇
- 複雑な有機分子、水素・窒素同位体

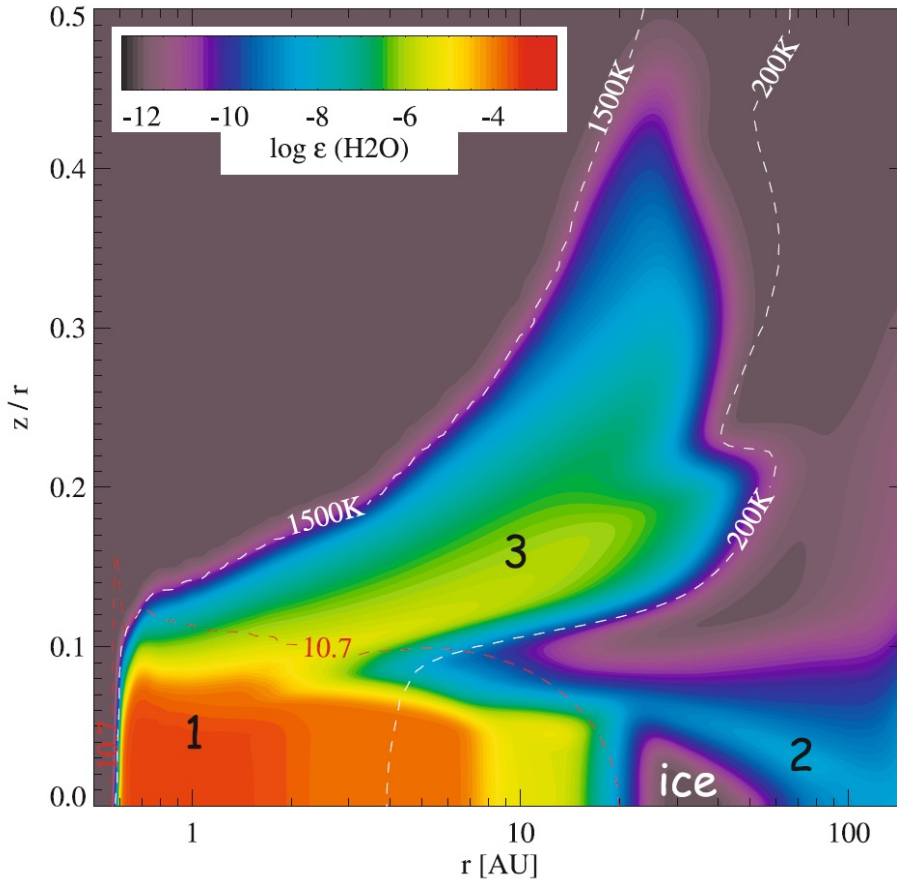


(A) 光解離領域: OI, Cl, C+

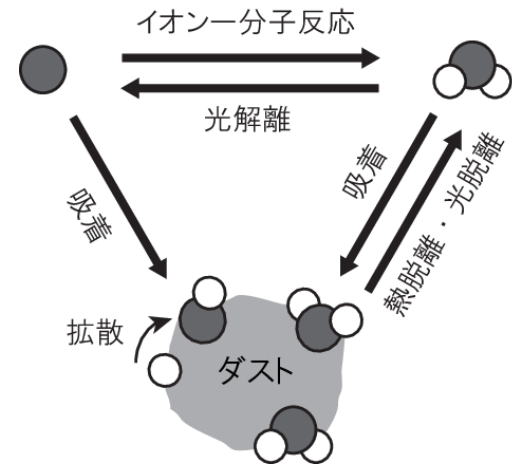
(B) 分子層: H<sub>2</sub>O, CO

(C) 赤道面

# 気相のH<sub>2</sub>Oの分布

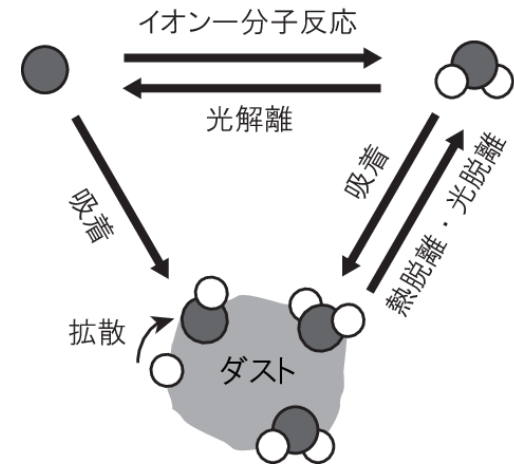
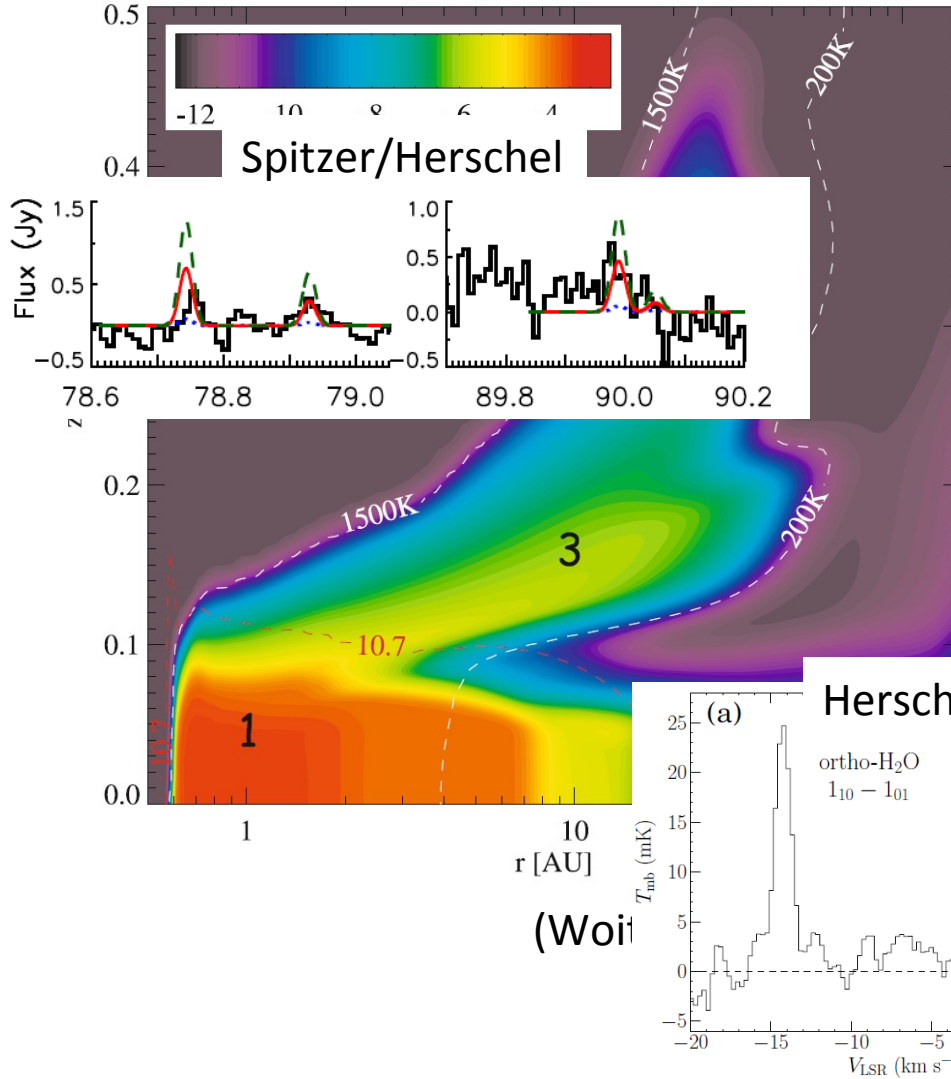


(Woitke et al. 2009)



1. スノーライン内側
  - 氷分子の昇華
  - $H_2O(\text{gas})/H_2O(\text{ice}) \gg 1$
2. 円盤外縁部
  - 氷分子の光脱離
  - $H_2O(\text{gas}) = \text{a fraction of } H_2O(\text{ice})$
3. 円盤内側大気
  - 高温化学反応 vs.
  - 中心星からのUV

# 気相のH<sub>2</sub>Oの分布



## 1. スノーライン内側

- 氷分子の昇華

$$\text{H}_2\text{O}(\text{gas})/\text{H}_2\text{O}(\text{ice}) \gg 1$$

## 2. 円盤外縁部

- 氷分子の光脱離

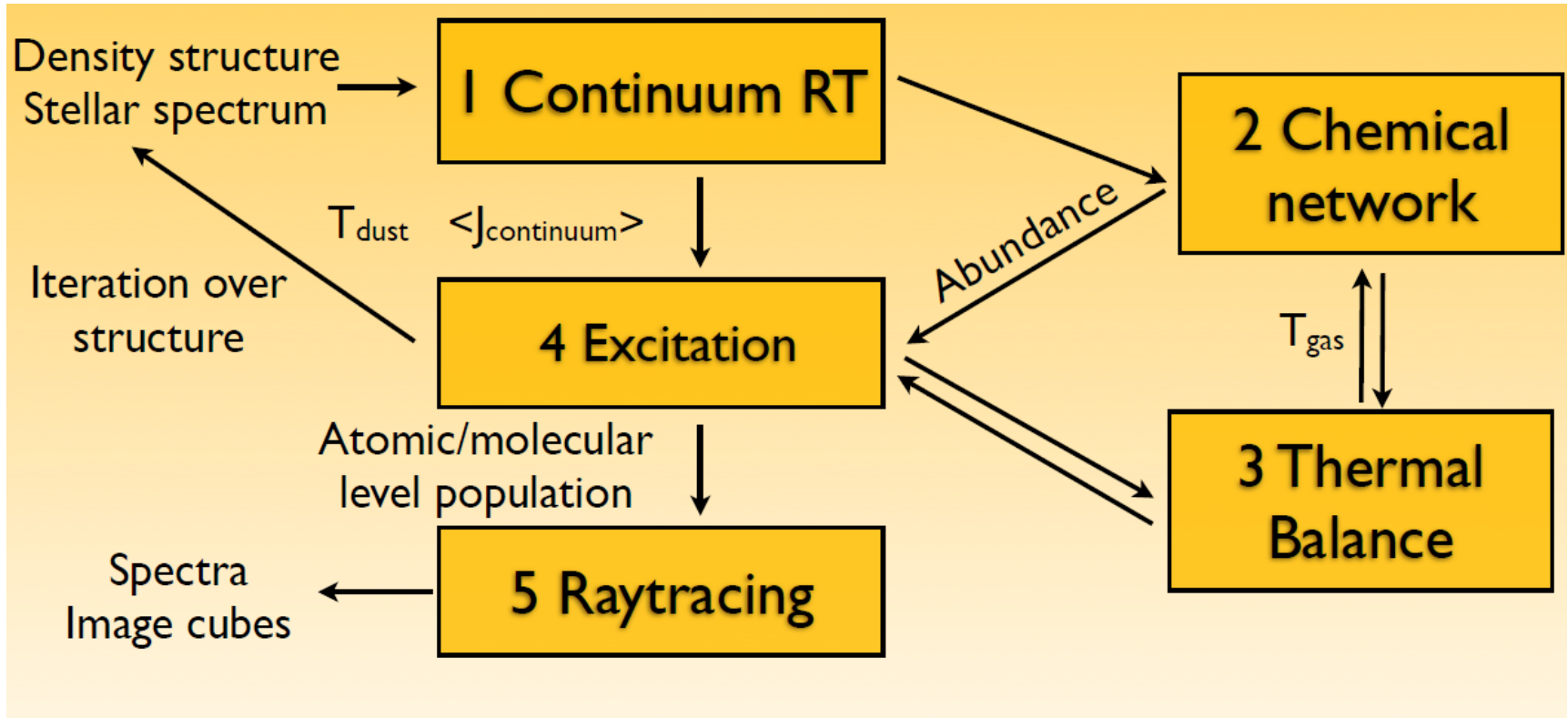
$$\text{H}_2\text{O}(\text{gas}) = \text{a fraction of } \text{H}_2\text{O}(\text{ice})$$

円盤内側大気

・ 高温化学反応 vs.

中心星からのUV

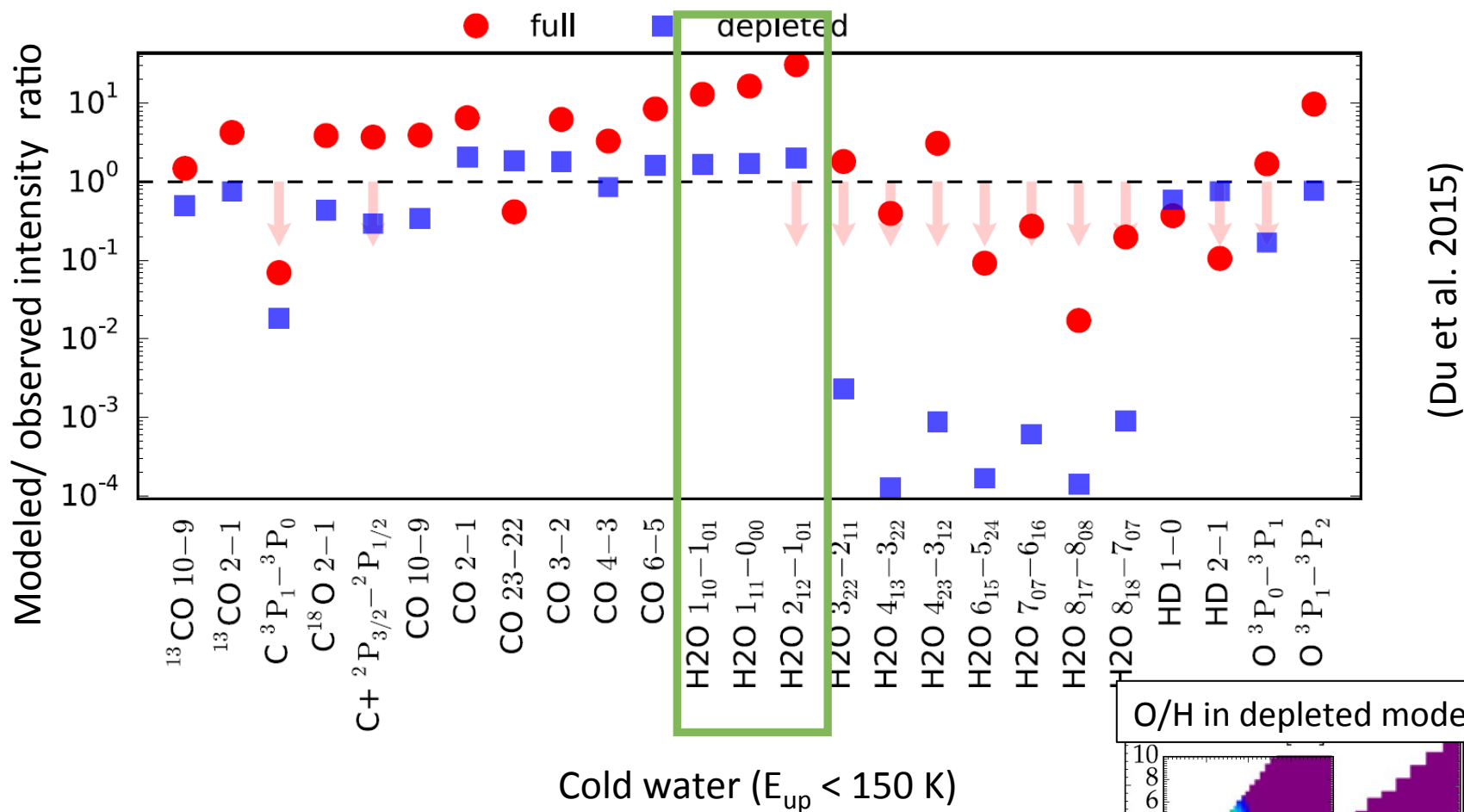
# Thermal-chemical disk model



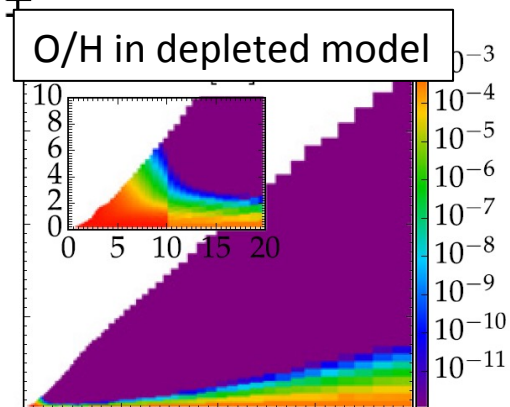
(Figure by Simon Bruderer)

- 中心星(UV, X-rays等)、  
円盤パラメータ(ガス面密度、ダスト分布等)は定常

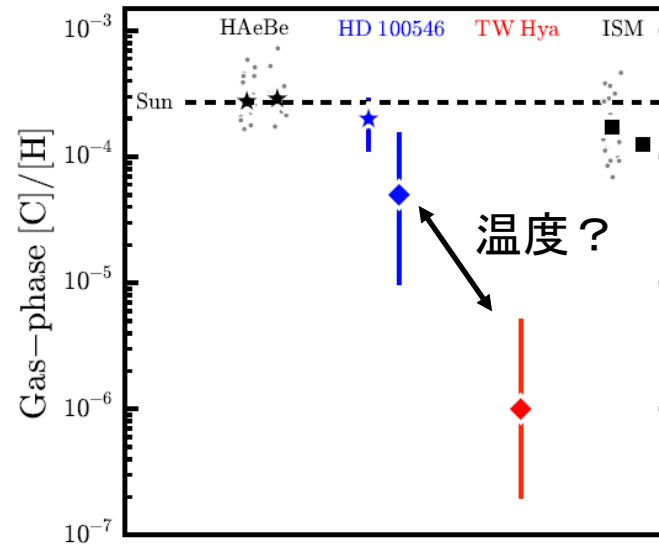
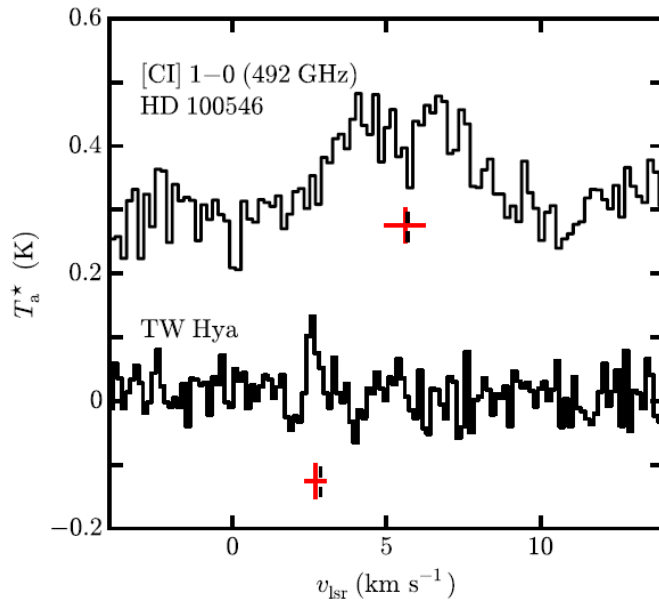
# TW Hya円盤表層での酸素・炭素の枯渇



Cold waterをモデルでは過大評価



# 炭素・酸素の枯渇 in TW Hya and HD 100546



C<sup>+</sup>, C, CO, C<sub>2</sub>H, HD観測、SEDをモデルフィット  
→ 炭素・酸素-poorにしなければ観測と合わない

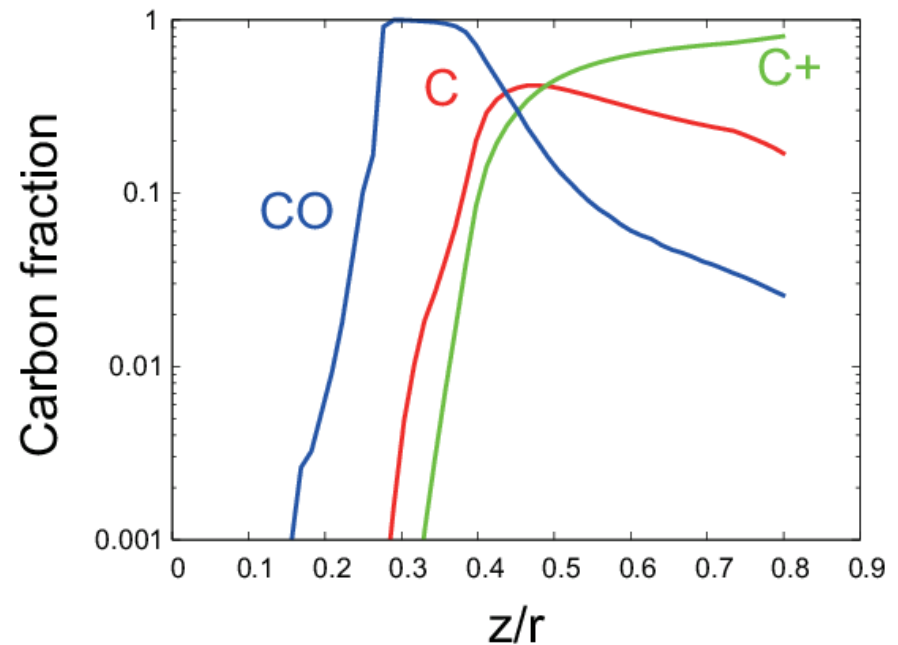
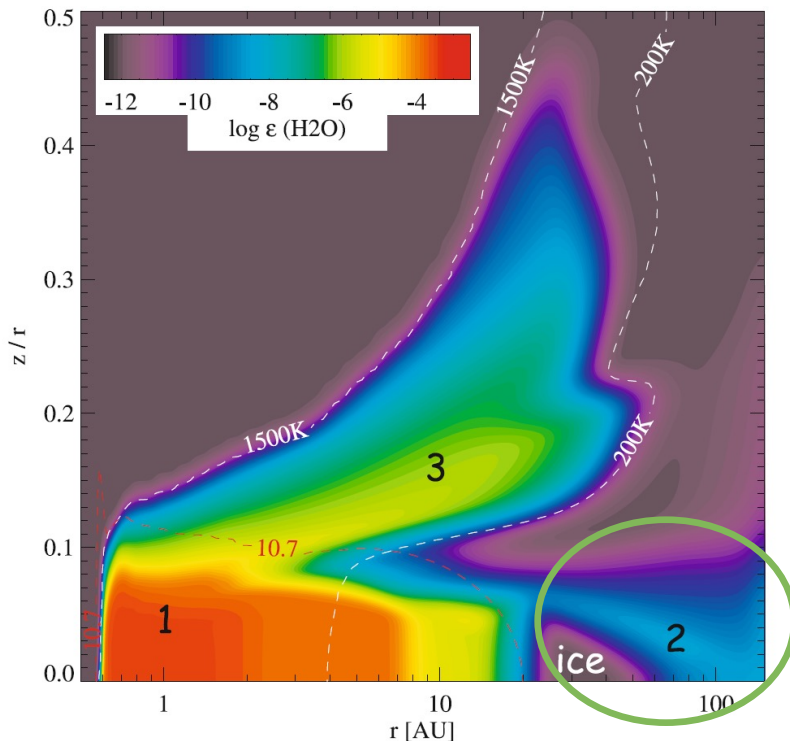
# 円盤表層における酸素・炭素の枯渇：観測からの制約

- TW Hya 円盤表層

$$[C/H] \ll 10^{-4}, [O/H] \ll 10^{-4}, [C/O] > 1$$

- HD 100546 円盤表層

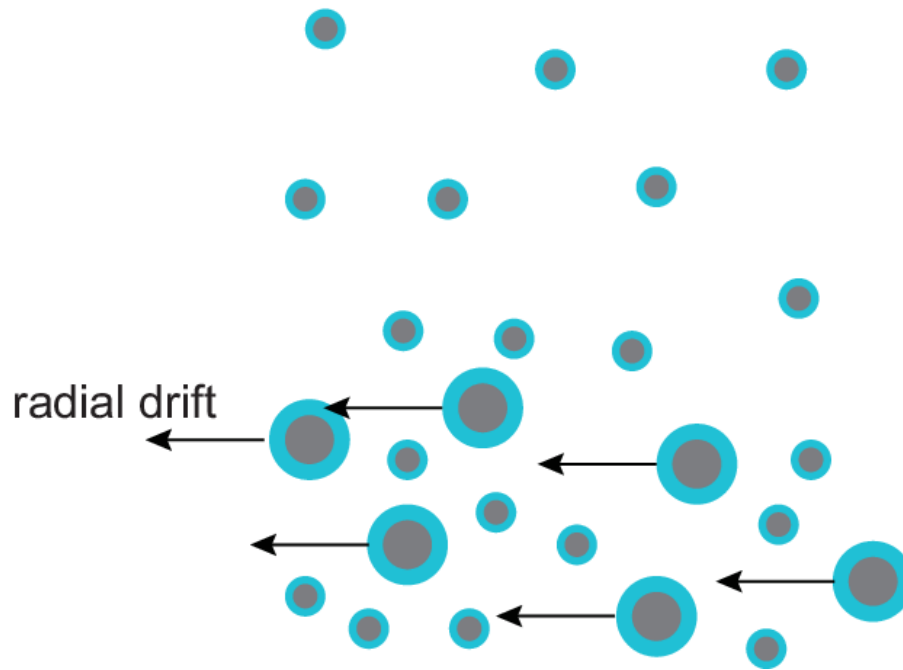
$$[C/H] < 10^{-4}$$





# 円盤表層における揮発性元素の枯渇機構

## 1. 氷ダストの沈殿+ドリフト



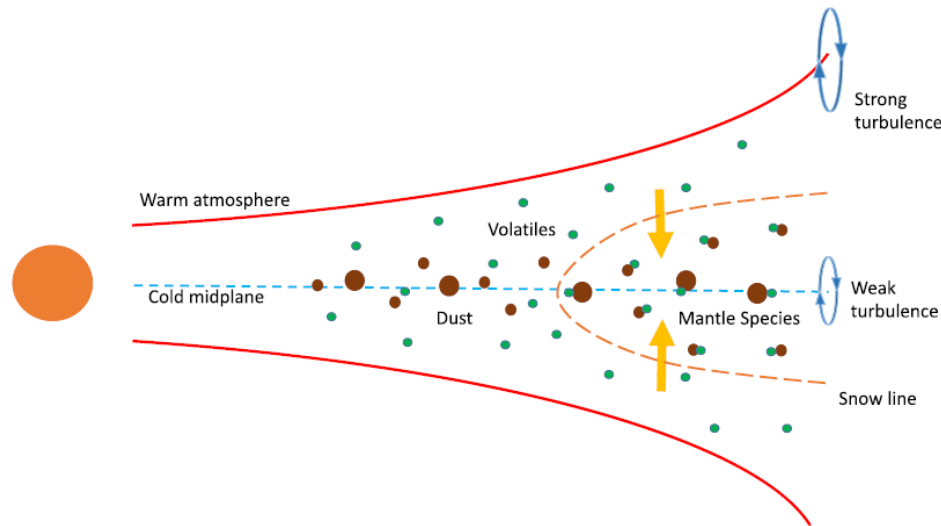
酸素は(定性的には)良さそう、炭素は難しい

(e.g., Meijerink et al. 2009, Hogerheijde et al. 2011, Furuya & Aikawa 2014, Du et al. 2015, Kama et al. 2016, Krijt et al. 2016, Xu et al. 2017)

# 円盤表層における揮発性元素の枯渇機構

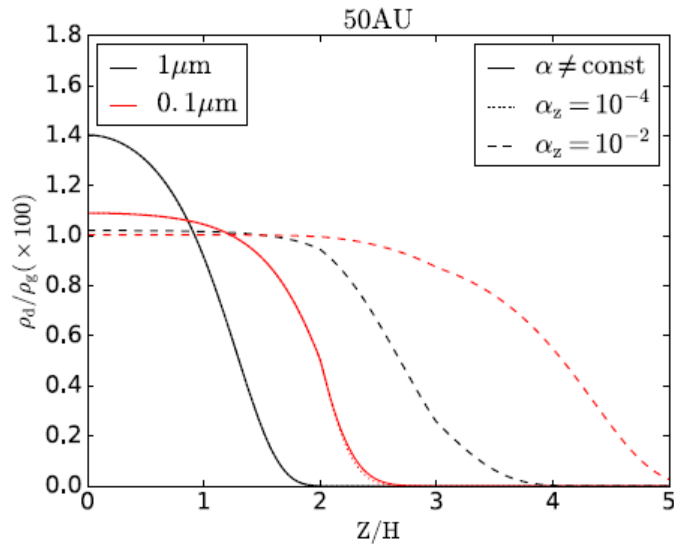
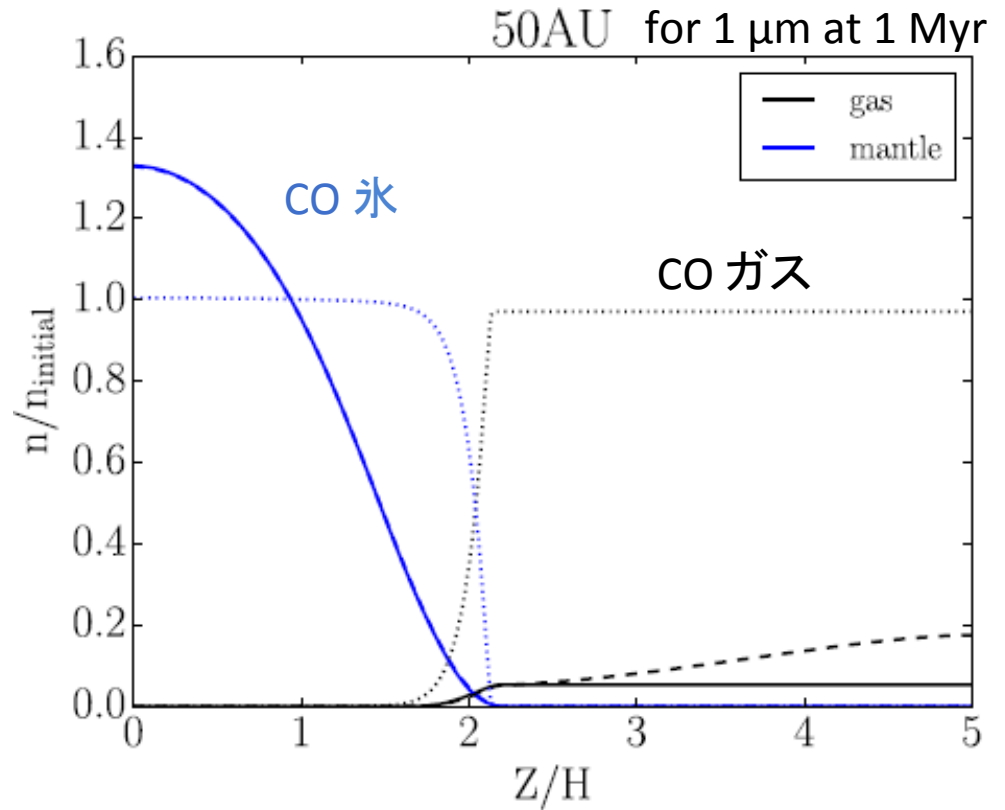
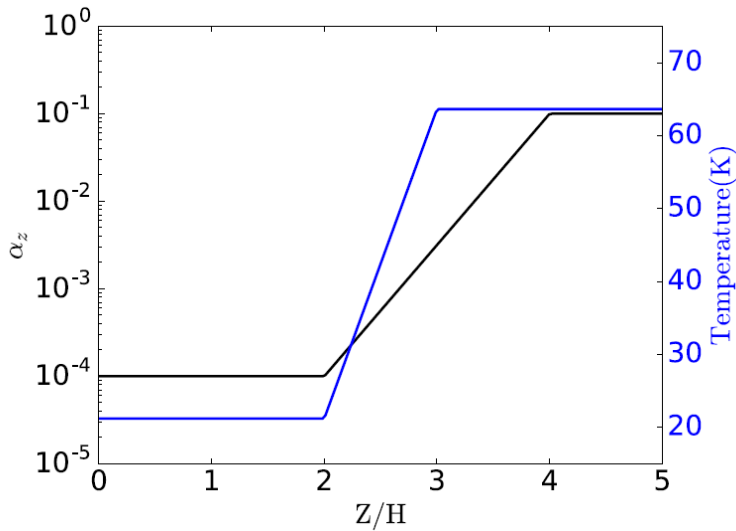
1. 氷ダストの沈殿+ドリフト
2. 乱流によるCOガスの円盤赤道面への輸送  
+ ダスト表面への吸着

- 円盤表面からのCOガスの輸送 vs. 赤道面からのCO氷の巻き上げ



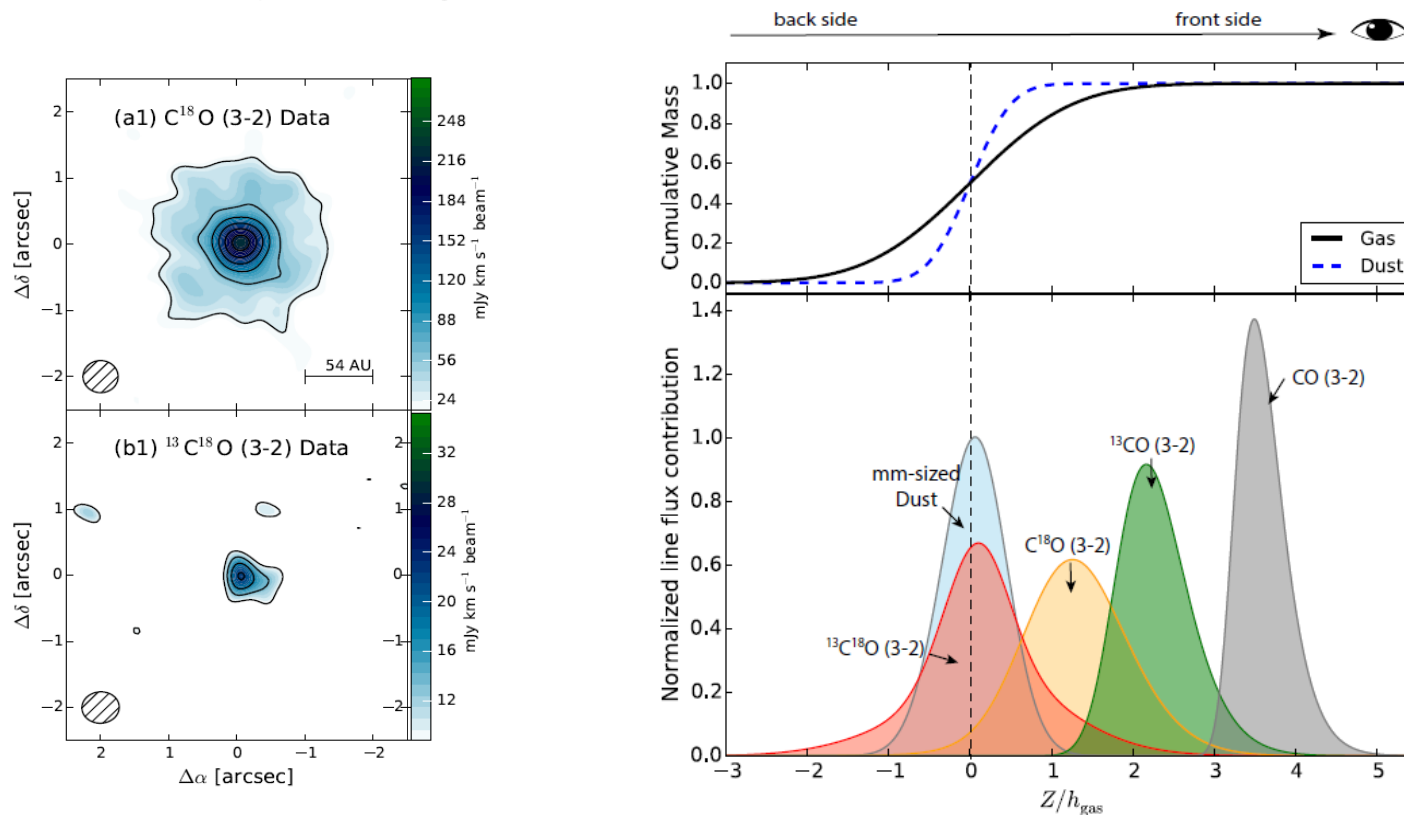
(e.g., Meijerink et al. 2009, Hogerheijde et al. 2011, Furuya & Aikawa 2014, Du et al. 2015, Kama et al. 2016, Krijt et al. 2016, Xu et al. 2017)

# 乱流による円盤赤道面への輸送+ ダスト表面への吸着



- 乱流が赤道面付近で弱く、  
ダストが十分に沈殿していることが重要

# CO isotopologues in TW Hya



(Zhang et al. 2017)

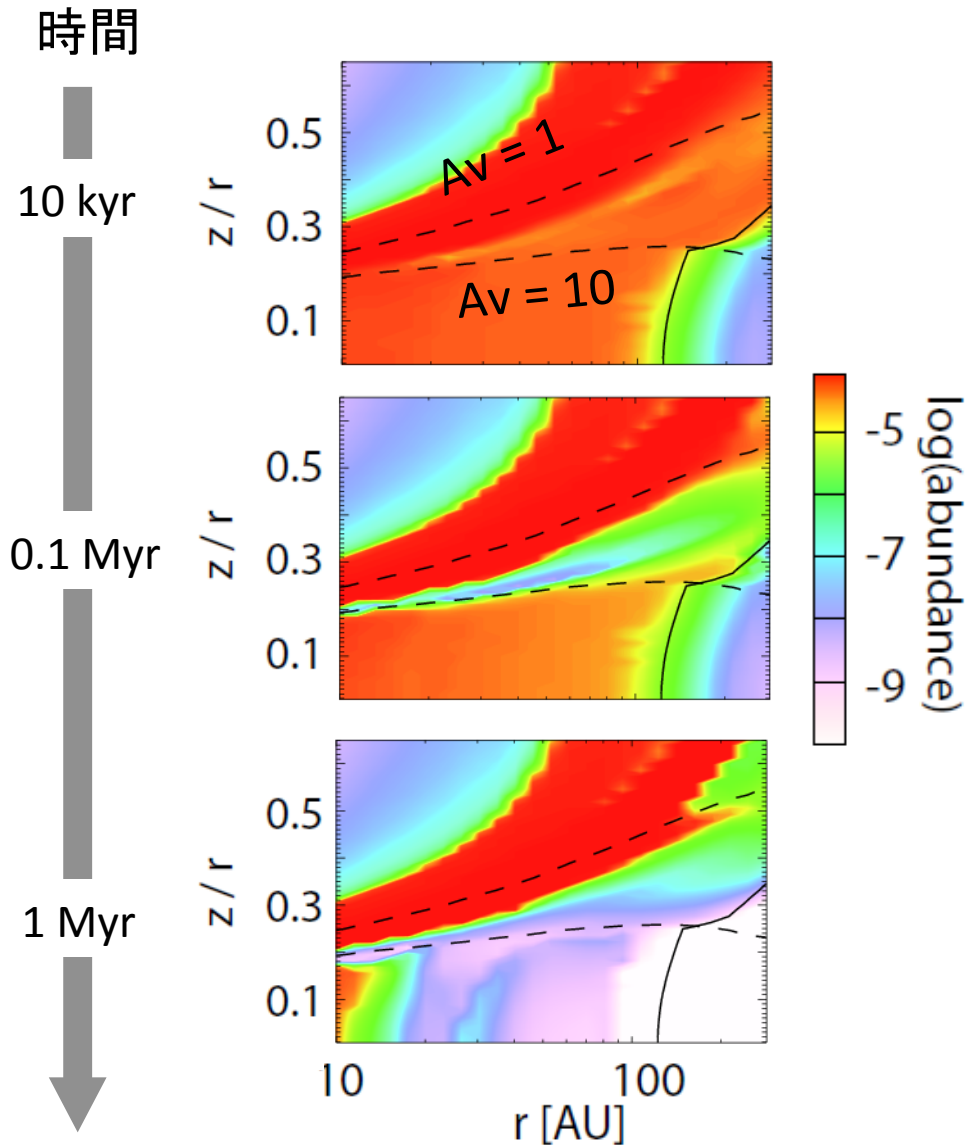
mm-ダスト連続波, HD, C<sup>18</sup>O, <sup>13</sup>C<sup>18</sup>O輝線

→ COスノーライン内側でのCO存在量  $\sim 10^{-6} \ll 10^{-4}$

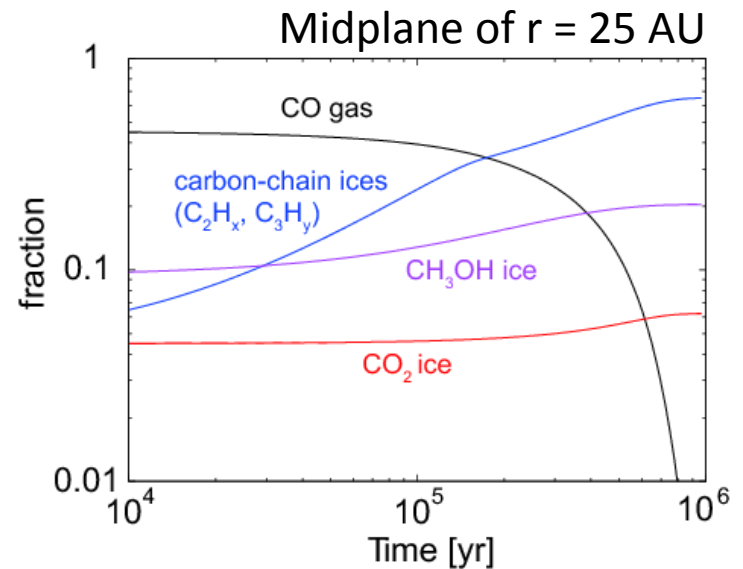
→ COを他の分子に変換? or ダスト成長?

(consistent with Nomura et al. 2016)

# Conversion of CO into other molecules

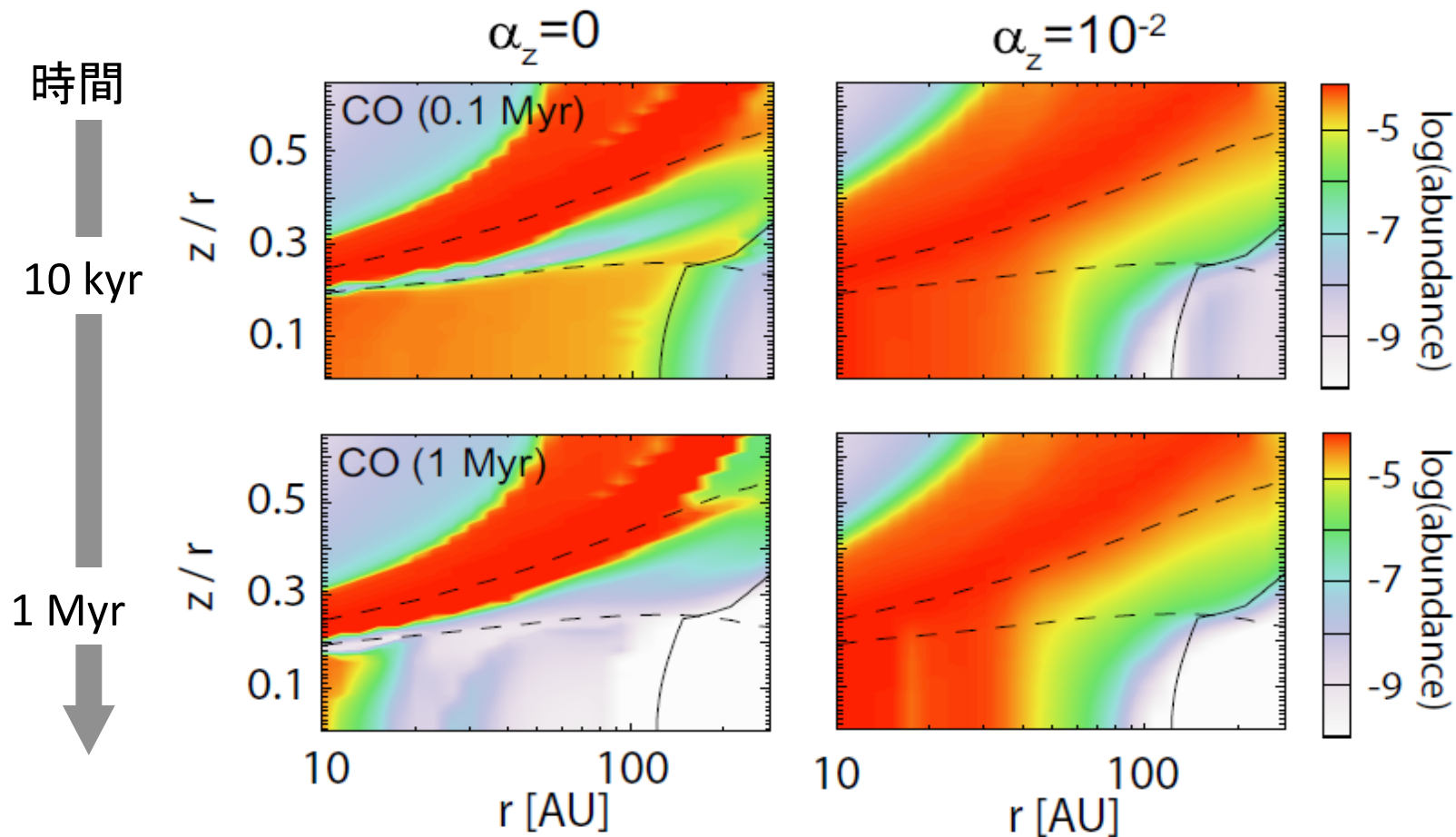


- CO is depleted even inside of the snow line ( $T > 25$  K)
- ← CO is converted to less volatile molecules like carbon-chains and  $\text{CO}_2$  (sink effect; Aikawa et al. 1997)



(Furuya & Aikawa 2014, Bergin et al. 2014)

# Conversion of CO into other molecules



(Furuya & Aikawa 2014)

# 円盤表層における揮発性元素の枯渇機構

1. 氷ダストの沈殿+ドリフト  
→ 酸素はOK, 炭素枯渇を説明できない
2. 乱流によるCOガスの円盤赤道面への輸送  
+ ダスト表面への吸着  
→ CO depletion inside CO snow lineを説明できない
3. CO から 炭素鎖分子 and/or CO<sub>2</sub> への変換  
→ 円盤表層では働かない

ダスト進化、乱流、chemistryが必要？

(e.g., Meijerink et al. 2009, Hogerheijde et al. 2011, Furuya & Aikawa 2014, Du et al. 2015, Kama et al. 2016 , Krijt et al. 2016, Xu et al. 2017)

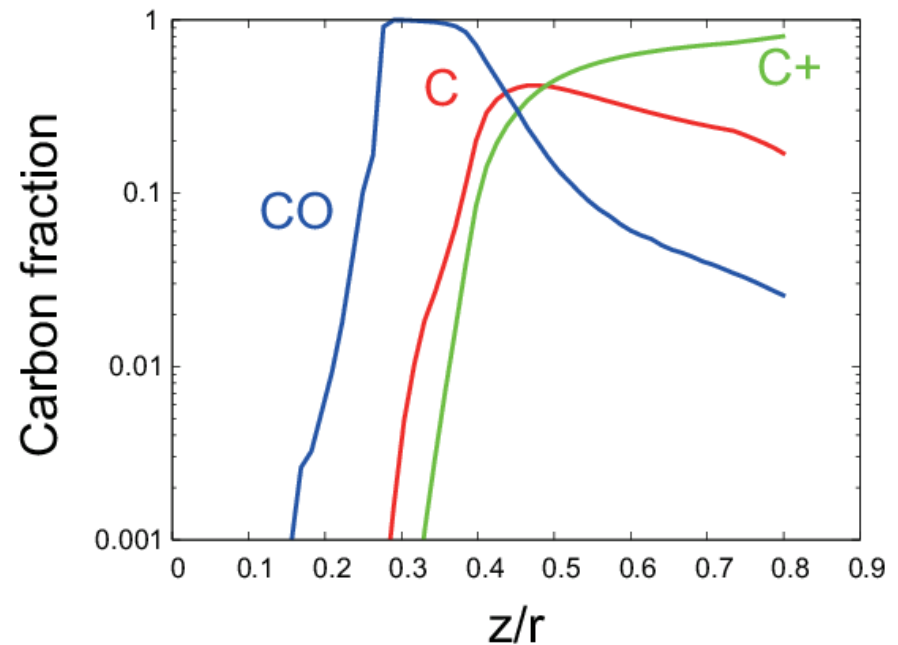
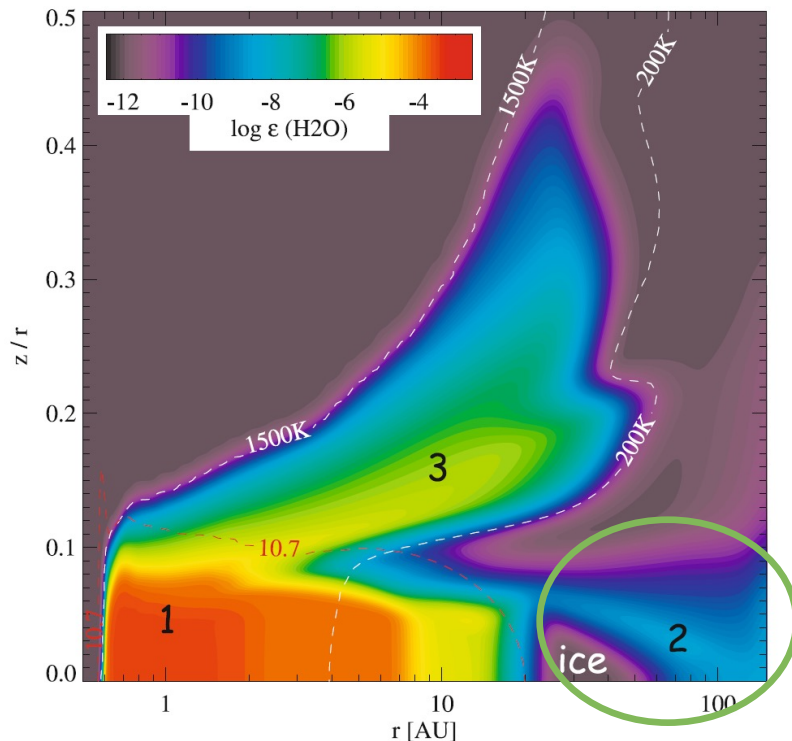
# 円盤表層における酸素・炭素の枯渇：観測からの制約

- TW Hya 円盤表層

$$[C/H] \ll 10^{-4}, [O/H] \ll 10^{-4}, [C/O] > 1$$

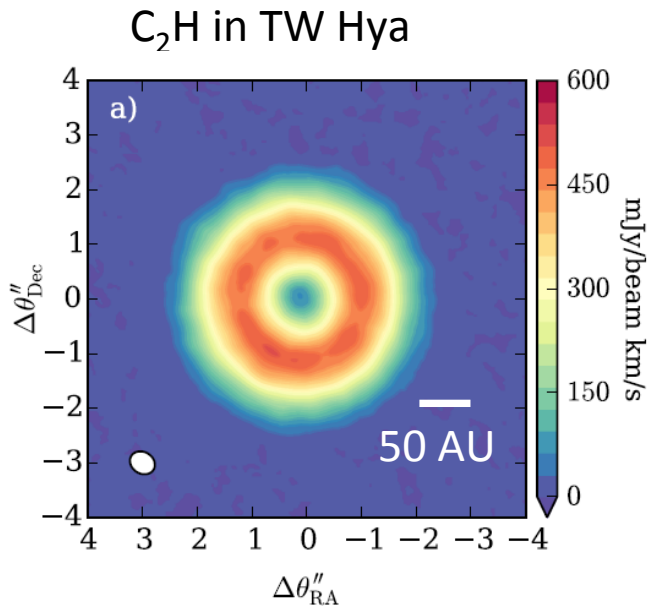
- HD 100546 円盤表層

$$[C/H] < 10^{-4}$$

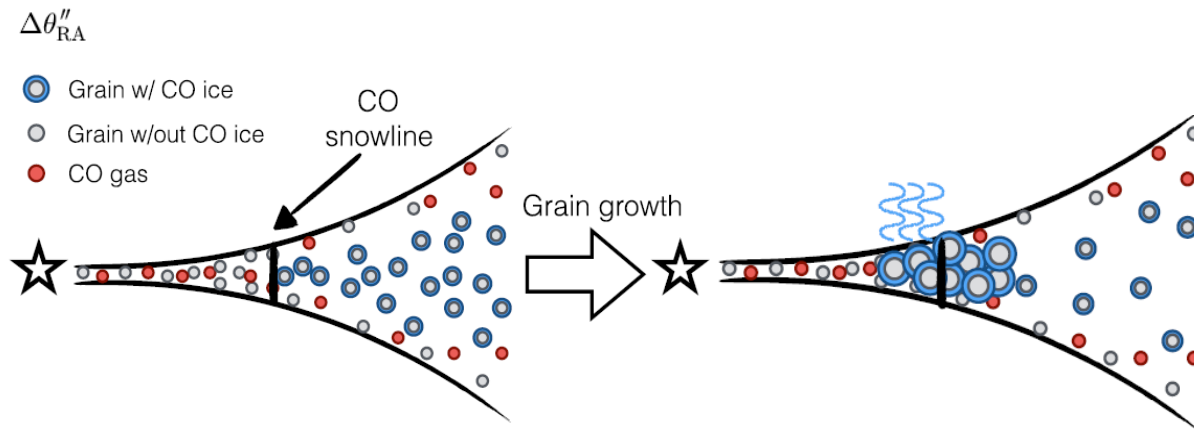




# Hydrocarbon?



H<sub>2</sub>-rich gas with [C/O] > 1 and UV  
→ Hydrocarbon-rich



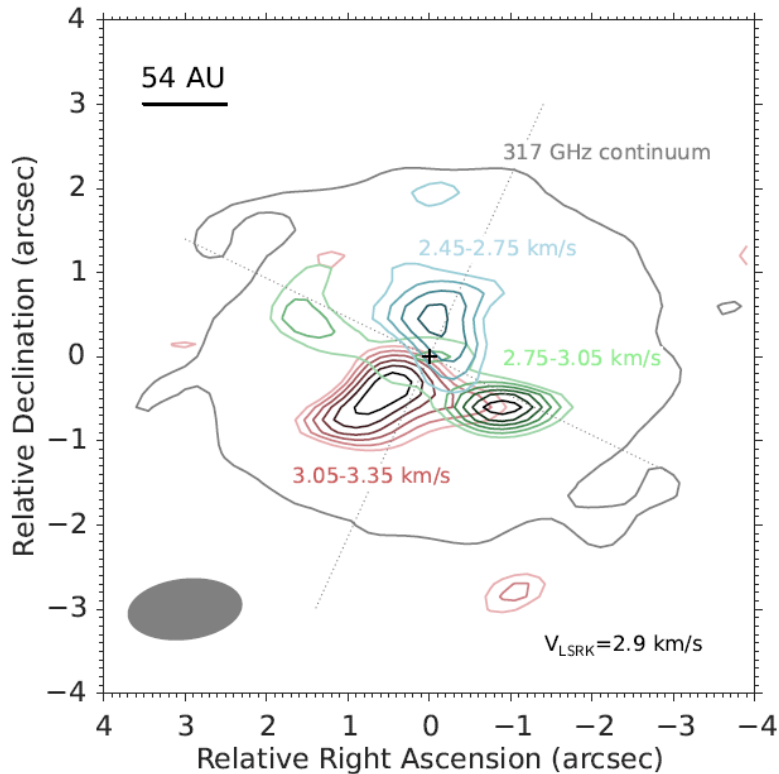
(Kastner et al. 2015, Bergin et al. 2016, Öberg & Bergin 2016)

# Outline

- イントロ
- COスノーライン (H<sub>2</sub>Oスノーライン → 野津氏)
- 円盤表層における揮発性元素の減損
- 複雑な有機分子、水素・窒素同位体

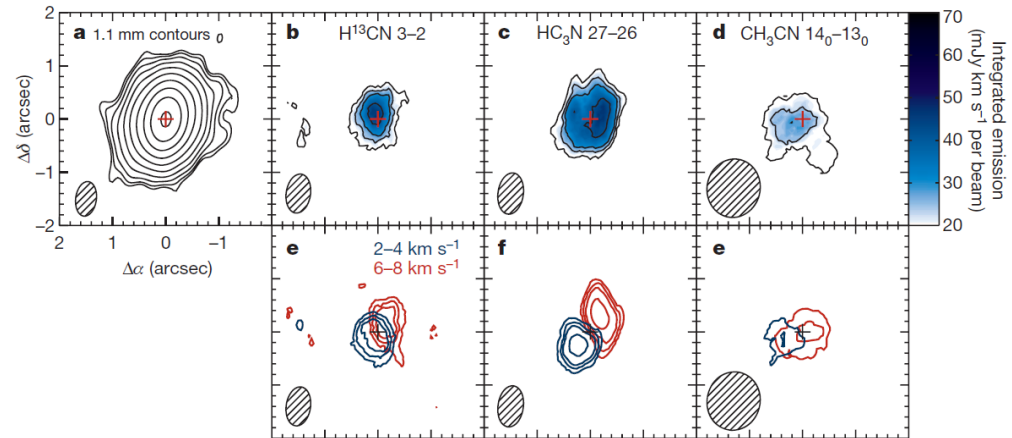
# “複雑な”有機分子(COMs)

Non-thermally desorbed CH<sub>3</sub>OH  
from ice in TW Hya



(Walsh et al. 2016)

## CH<sub>3</sub>CN in MWC 480



(Öberg, Guzman, KF, et al. 2015)

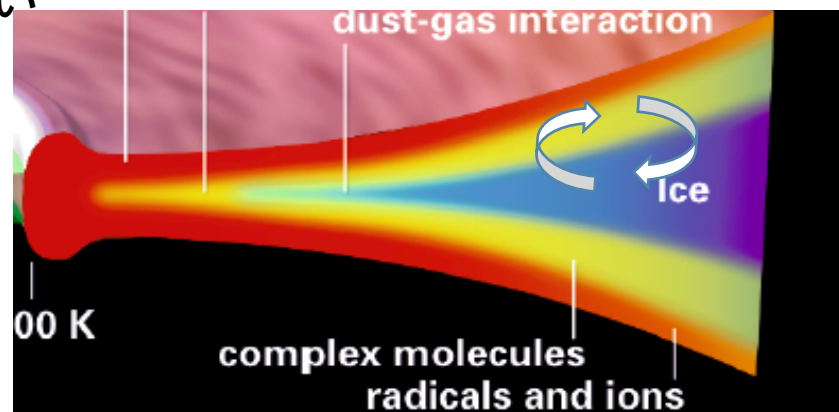
# CH<sub>3</sub>CN in MWC 480

	HCN	HC <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> CN	ref
Comet	1	0.1	0.1	Mumma&Charnley 11
MWC 480	1	0.4	0.05	This work@30AU
	1	5	0.2	This work@100AU
IRAS16293	1	0.01	0.08	vanDishoeck+95
		1	10-14	Taquet+15

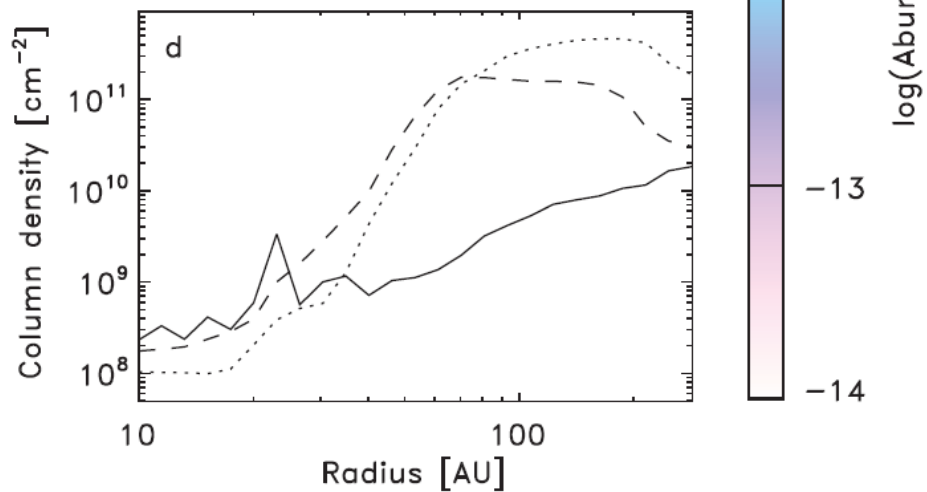
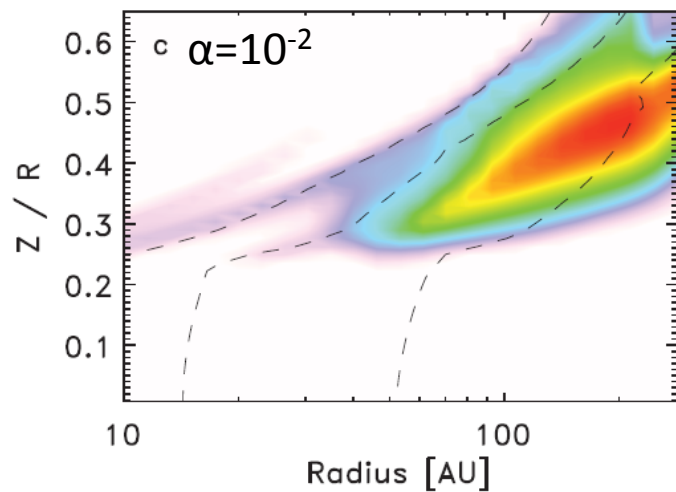
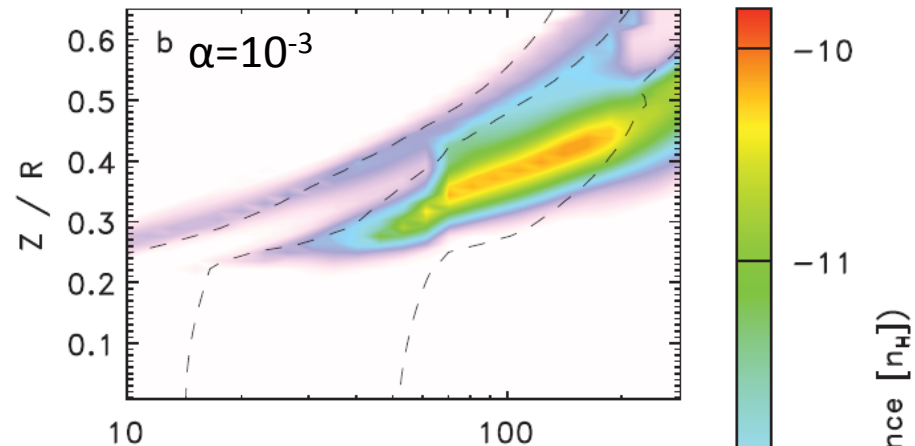
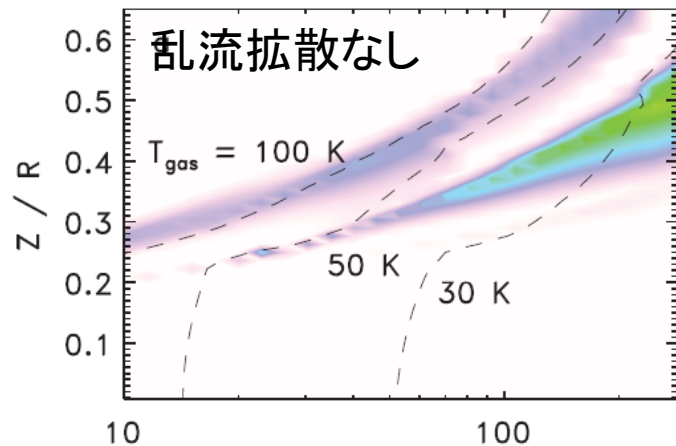
●MWC480でのHCN/HC<sub>3</sub>N/CH<sub>3</sub>CN比はcometに近い

[注] 観測で見えるのはガスのみ！

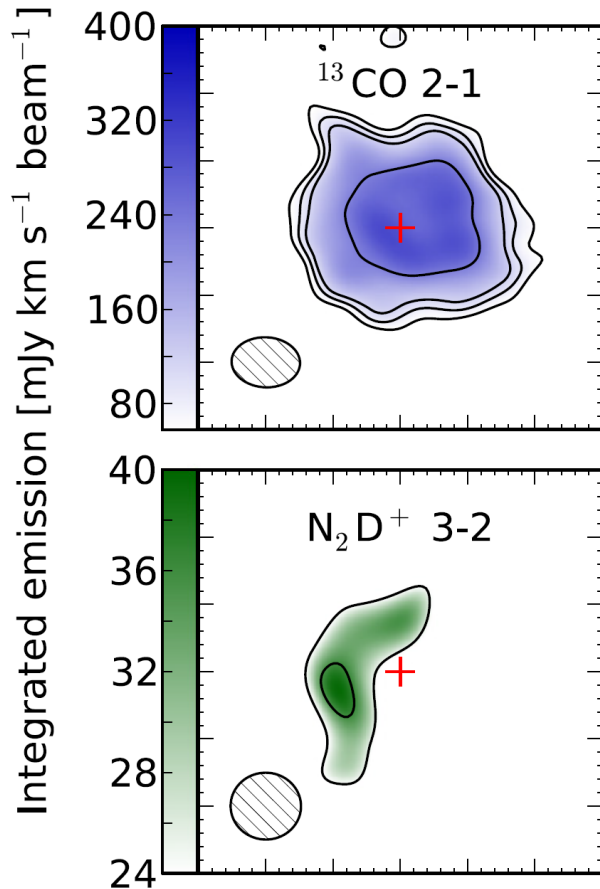
- CH<sub>3</sub>CNの存在量は気相反応だけでは説明できない
- 乱流による鉛直方向のmixing
- mixingモデルでは氷ダストの巻き上げにより、円盤表層により多くのCH<sub>3</sub>CN



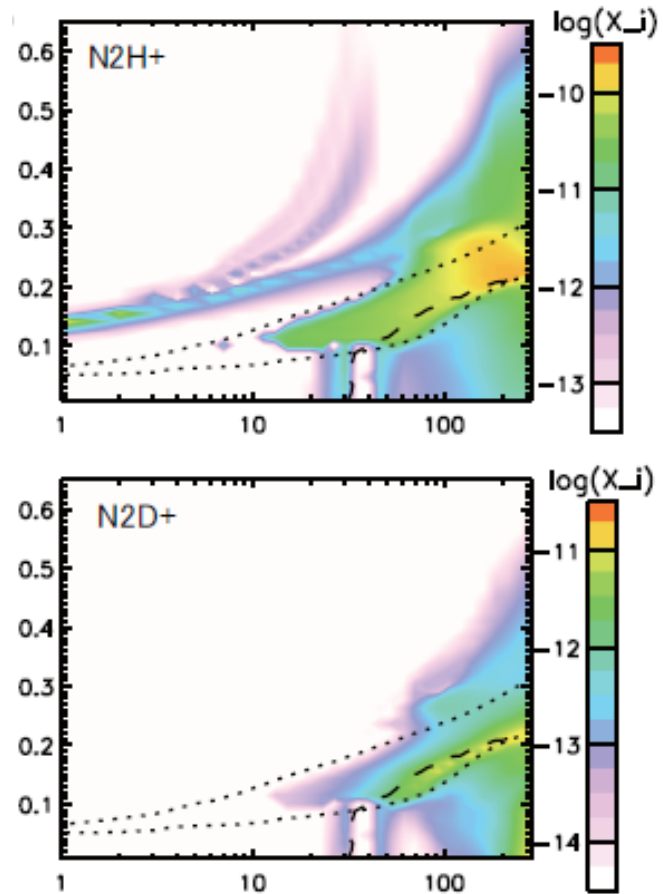
# CH<sub>3</sub>CN: モデル



# $N_2D^+$ : midplane ionization tracer?

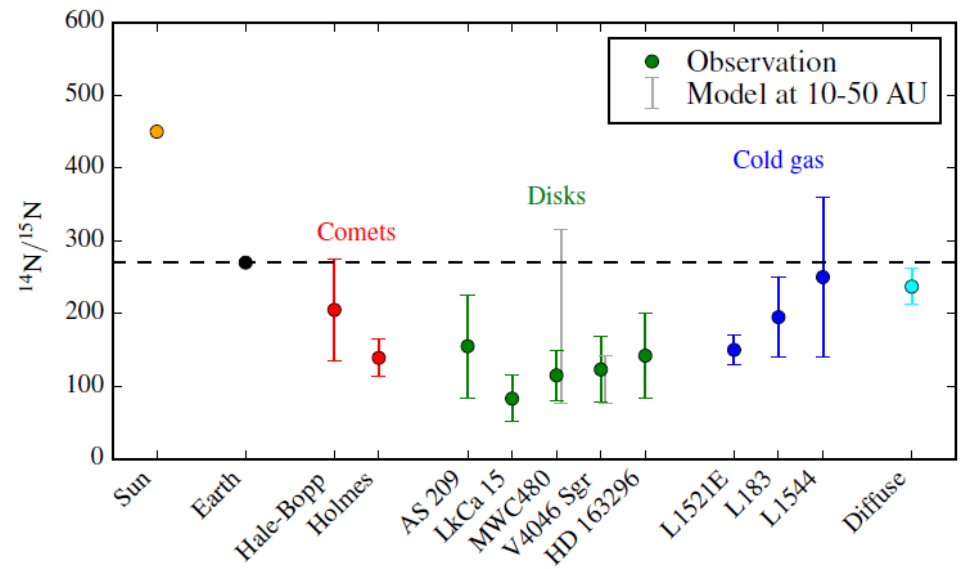
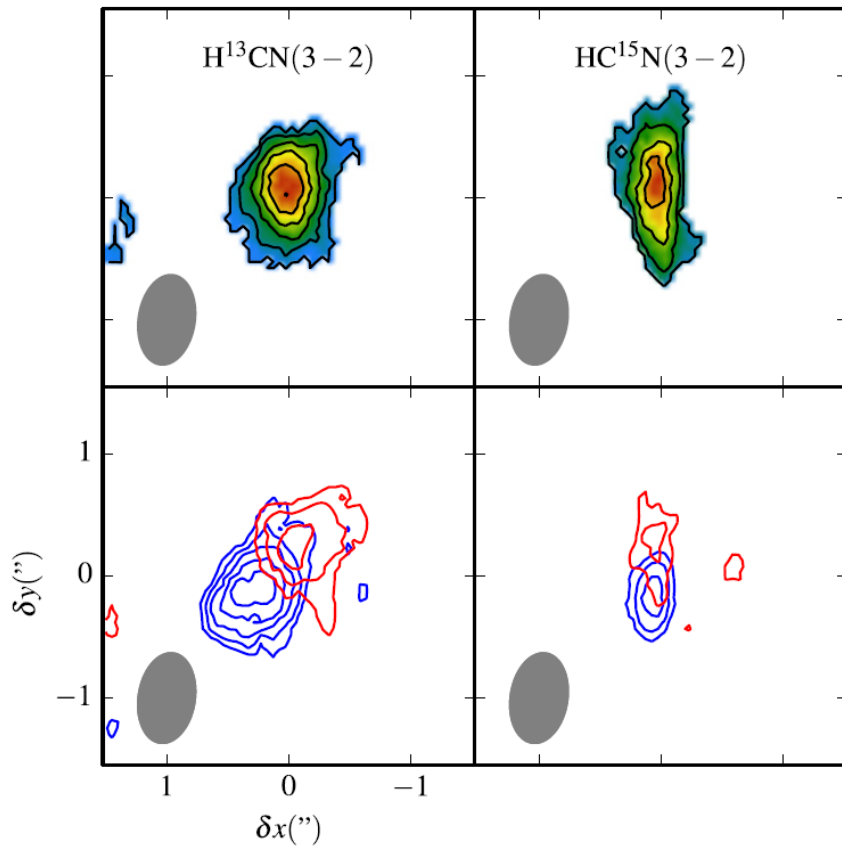


(AS 209, Huang et al. 2015)



(Aikawa, KF, Herbst. in prep,  
Cleeves et al. 2015)

# $^{15}\text{N}$ 同位体: 太陽系物質起源への示唆?



(Guzmann et al. 2015, 2017)

# まとめ

- 原始惑星系円盤における気相揮発性物質の観測の発展
- 局所的な化学プロセスでは説明できない現象
  - 酸素・炭素の円盤表面での枯渇、大型有機分子?
- ガス・ダストダイナミクス + 気相・固相化学反応モデルの  
需要の高まり
- 氷の観測(空間分布、 $\text{H}_2\text{O}$ 氷以外の分子)はJWSTに期待?