

# 原始惑星系円盤の化学組成： 最近のALMAの観測の成果

相川祐理(筑波大学計算科学研究センター)

# 目次

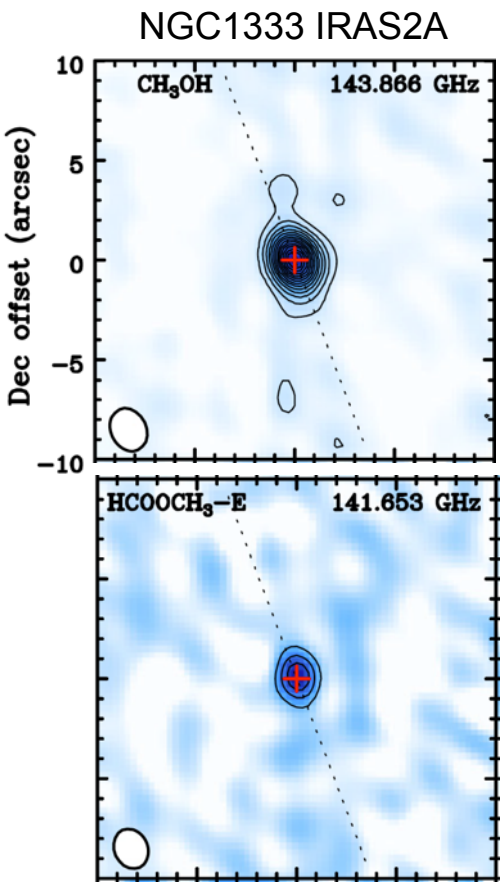
円盤での大型有機分子の検出

円盤分子層での重元素減損

# 原始星コア

Compact emission ( $r < 1''$ ) of warm COMs at the core center  
... hot corino

分子種	励起温度	存在度 ( $n(i)/n_H$ )
$\text{CH}_3\text{OH}^e$	$179 \pm 62$	$(2.5 \pm 0.9) \times 10^{-7}$
$^{13}\text{CH}_3\text{OH}$	$164 \pm 43$	$(9.6 \pm 2.5) \times 10^{-9}$
$\text{HCOOCH}_3$	$200 \pm 61$	$(1.3 \pm 0.4) \times 10^{-8}$
$\text{CH}_3\text{CN}$	$289 \pm 63$	$(2.0 \pm 0.4) \times 10^{-9}$
$\text{CH}_3\text{OCH}_3$	$154 \pm 62$	$(8.2 \pm 3.3) \times 10^{-9}$
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$325 \pm 140$	$(1.0 \pm 0.4) \times 10^{-8}$
$\text{HCOCH}_2\text{OH}$	$179^f$	$1.6 \times 10^{-9}$
	$100^f$	$5.0 \times 10^{-10}$
$\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$	$179^f$	$2.4 \times 10^{-10}$
	$100^f$	$1.4 \times 10^{-10}$
$\text{HC}_3\text{N}$	$179^f$	$1.4 \times 10^{-10}$
	$100^f$	$1.4 \times 10^{-10}$
$\text{H}_2^{13}\text{CO}$	$179^f$	$1.3 \times 10^{-9}$
	$100^f$	$4.3 \times 10^{-10}$
$\text{NH}_2\text{CHO}$	$179^f$	$2.3 \times 10^{-9}$
	$100^f$	$8.7 \times 10^{-10}$
$\text{CH}_2\text{CO}$	$179^f$	$1.4 \times 10^{-9}$
	$100^f$	$5.2 \times 10^{-10}$

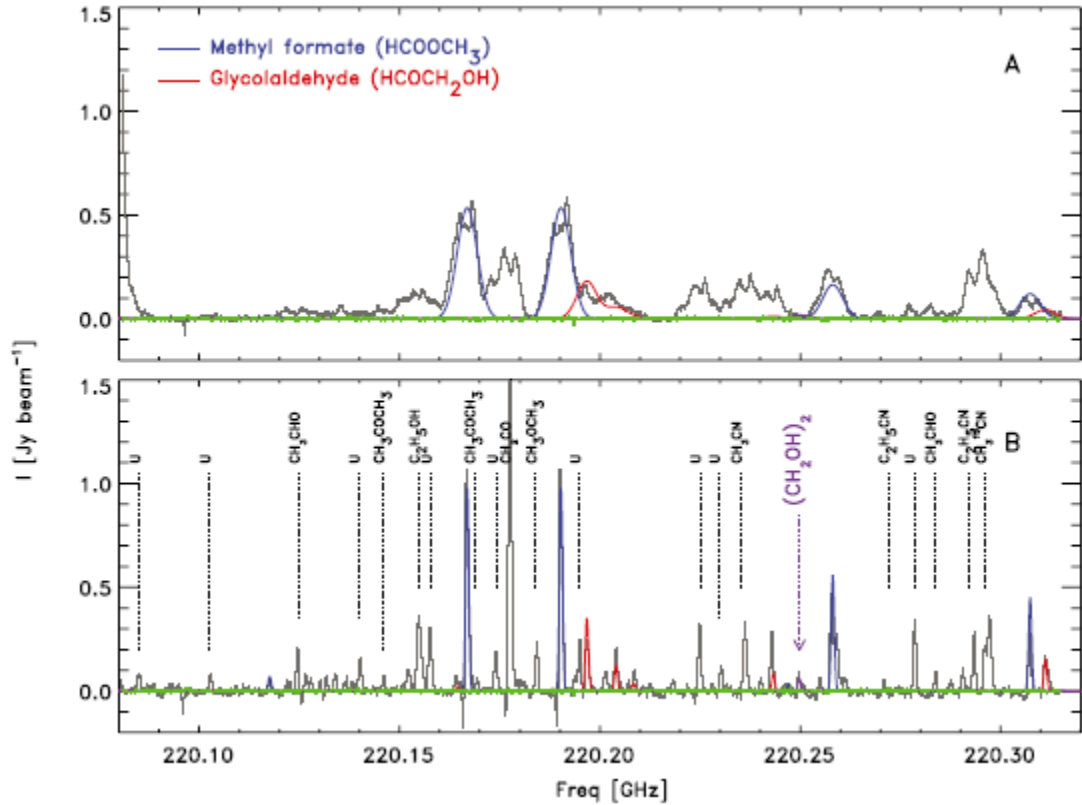
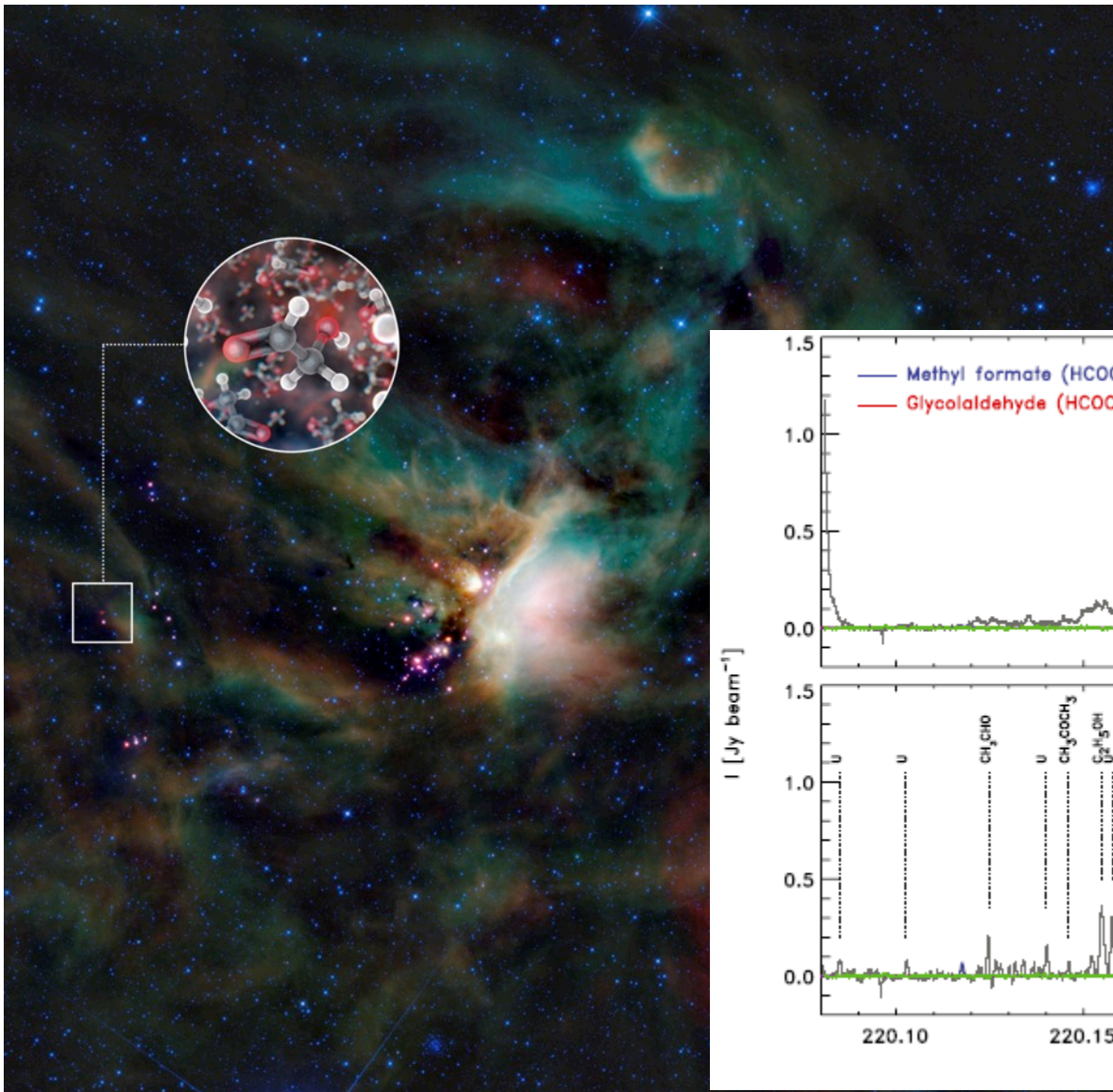


(Taquet et al. 2015)

原始星IRAS16293

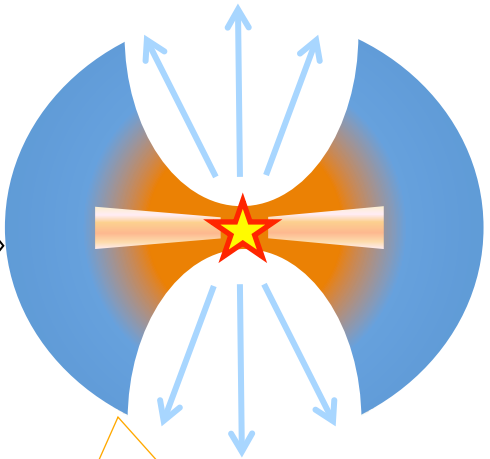
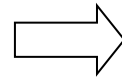
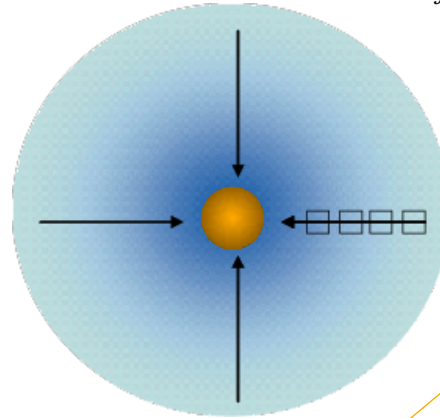
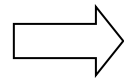
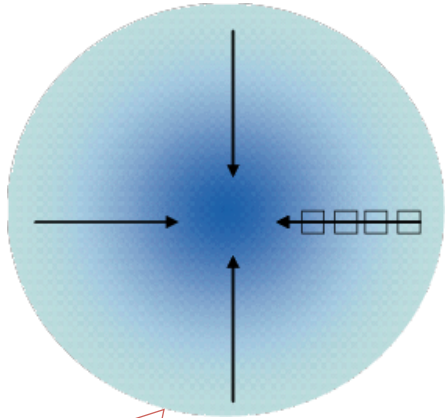
糖(グリコールアルデヒド)検出

$n(\text{ギ酸メチル})/n_{\text{H}} \sim 8 \times 10^{-8}$   
 $n(\text{グリコールアルデヒド})/n_{\text{H}} \sim 6 \times 10^{-9}$



# 星形成領域の化学：気相＋固相

反応速度式: 
$$\frac{dn(i)}{dt} = \sum_j \alpha_{ij}(T, F_{UV})n(j) + \sum_{j,k} \beta_{ijk}(T, F_{UV})n(j)n(k)$$



ダスト表面への分子凍結  
水素付加

e.g.  $\text{CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$   
 $T < 20\text{K}$

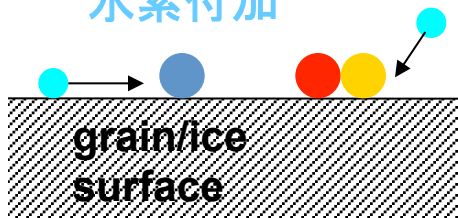
熱拡散による  
ダスト表面反応

$20\text{K} < T < 100\text{K}$

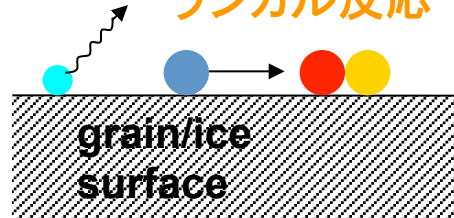
昇華分子同士の気相反応

$T > 100\text{K}$

水素付加

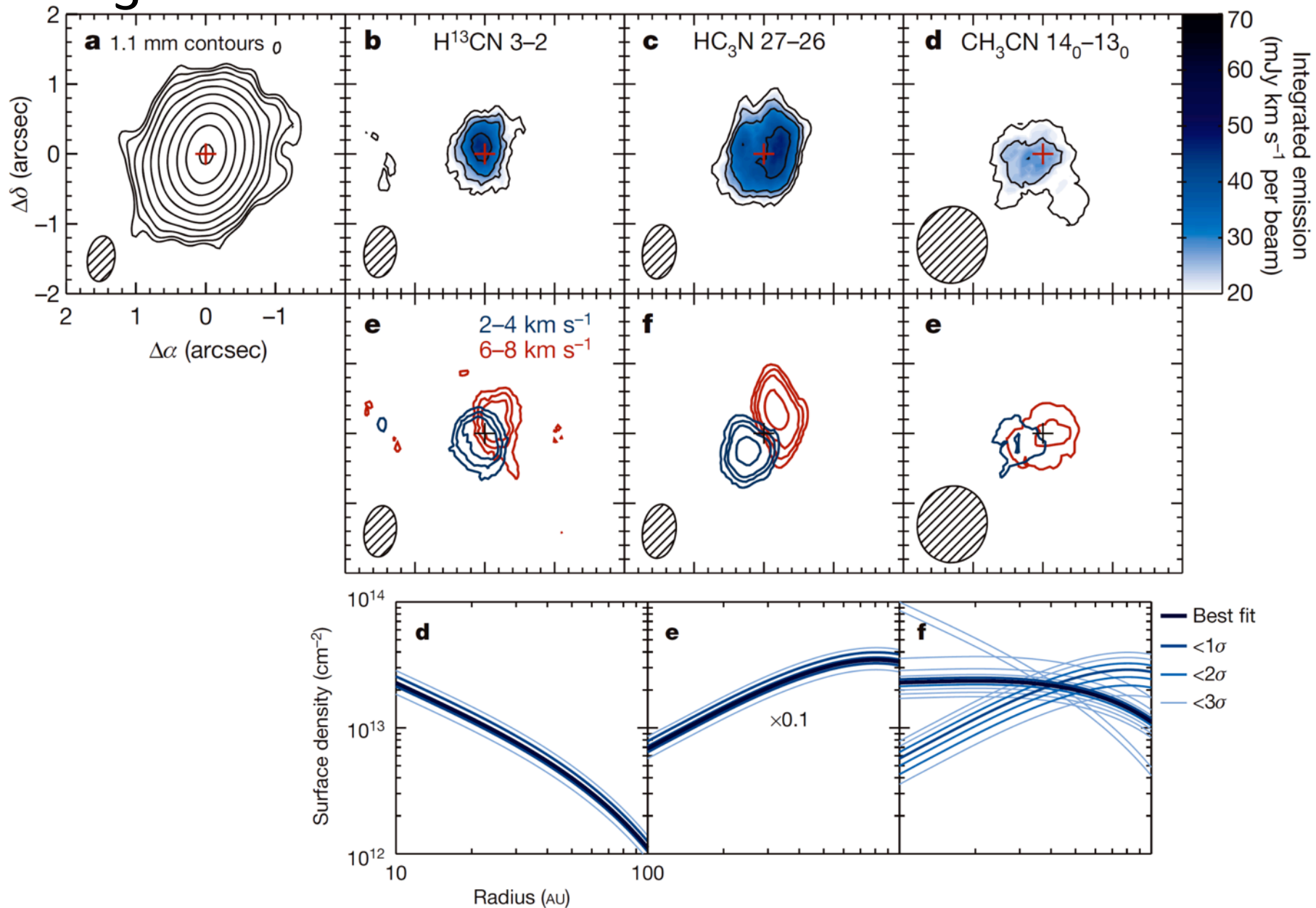


ラジカル反応



分子種	昇華温度[K]
H <sub>2</sub> CO	39–52
CO <sub>2</sub>	50–68
CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	59–80
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	83–110
CH <sub>3</sub> O	96–130
CH <sub>3</sub> OH	100–140
NH <sub>3</sub>	100–140
H <sub>2</sub> O	110–150
HCOOCH <sub>3</sub>	120–160

# CH<sub>3</sub>CN@MWC480



Öberg, Guzmán, Furuya, Qi, Chunhua, Aikawa, Andrews, Loomis, Wilner (2015)

# CH<sub>3</sub>CN@MWC480

	HCN	HC <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> CN	ref
Comet	1	0.1	0.1	Mumma&Charnley 11
MWC480	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

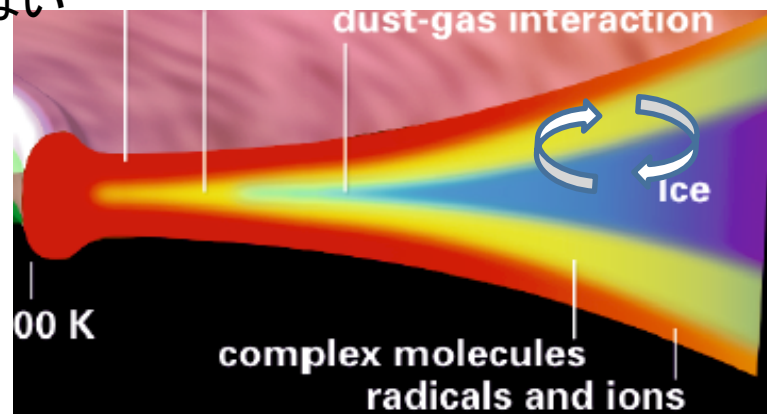
●MWC480でのHCN/HC<sub>3</sub>N/CH<sub>3</sub>CN比はcometに近い

[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iceにはより多くのCH<sub>3</sub>CN





# CH<sub>3</sub>OH@TW Hya

Walsh et al. (2016)

中心面：光脱離 vs ダストへの吸着

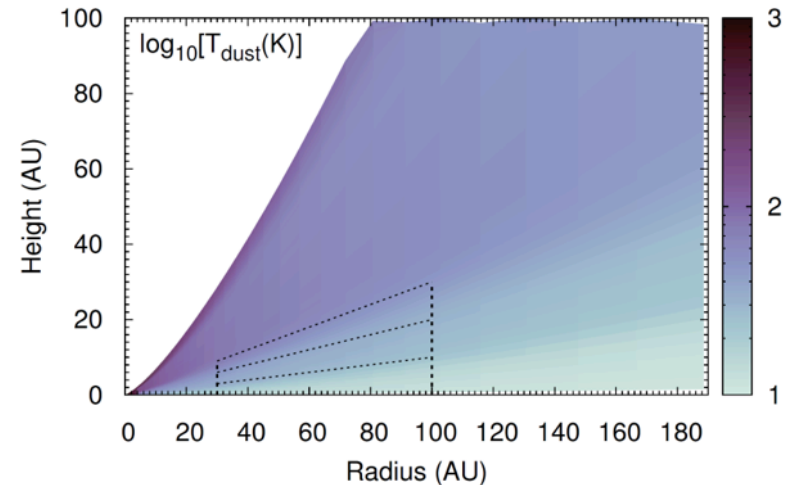
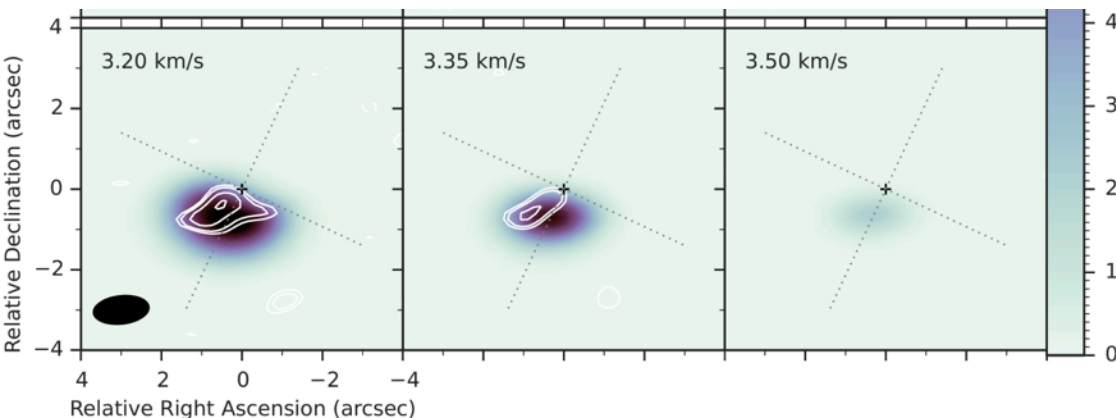
$$n_{\text{CH}_3\text{OH}}^g = 10^{-4} \left( \frac{n_{\text{CH}_3\text{OH}}^s / n_{\text{ice}}}{0.1} \right) \left( \frac{F_{\text{CRUV}}}{10^4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}} \right) \times \left( \frac{Y}{10^{-3}} \right) \left( \frac{v_{\text{th}}}{10^4 \text{ cm s}^{-1}} \right)^{-1}.$$

Furuya & YA(2014)

上空：光脱離 vs 光解離

$$\frac{n(\text{CH}_3\text{OH})}{n_{\text{H}}} = 6 \times 10^{-9} \left( \frac{n_{\text{CH}_3\text{OH}}^s / n_{\text{ice}}}{0.1} \right) \left( \frac{\pi a^2 x_d}{6 \times 10^{-22} \text{ cm}^2} \right) \times \left( \frac{Y}{10^{-3}} \right) \left( \frac{\sigma_{\text{Ly}\alpha}}{10^{-17} \text{ cm}^2} \right)^{-1}.$$

$$n(\text{CH}_3\text{OH})/n(\text{H}_2) \sim 10^{-12}$$





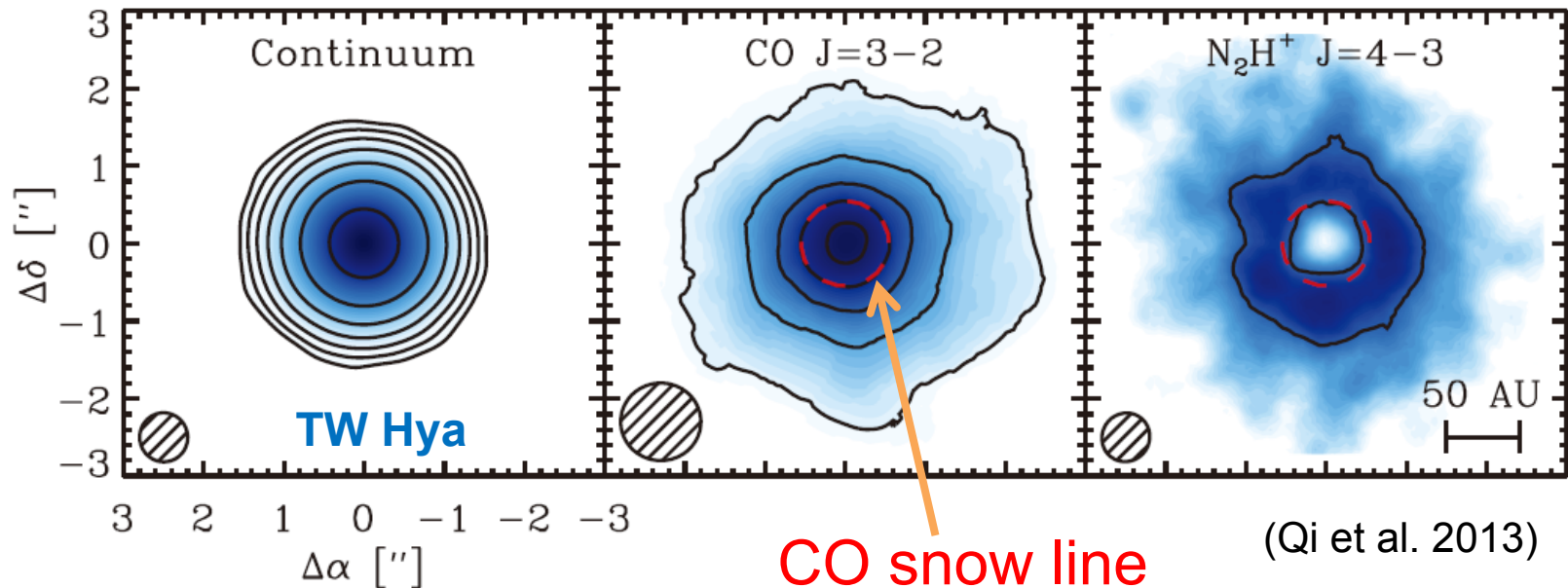
# 目次

円盤での大型有機分子の検出

円盤分子層での重元素減損

# TW Hya

- 最も近傍のT Tauri型星 ( $\sim 56\text{pc}$ )
- ほぼ face on
- 非常に多くの観測
  - CO &  $\text{N}_2\text{H}^+$  (Qi et al. 2013)
  - $\text{CH}_3\text{OH}$  (Walsh et al. 2016)
  - HD (Bergin et al. 2013)
  - $\text{H}_2\text{O}$  (Hogerheijde et al. 2011)



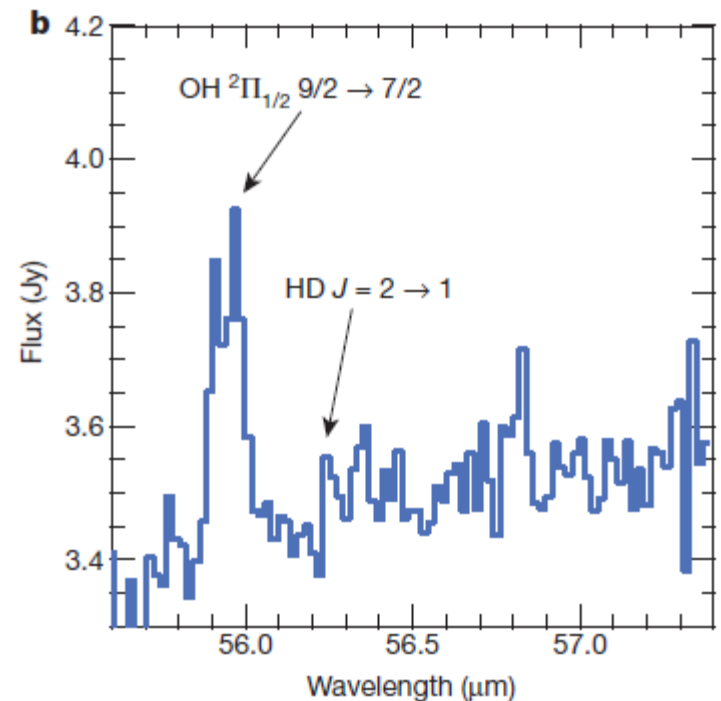
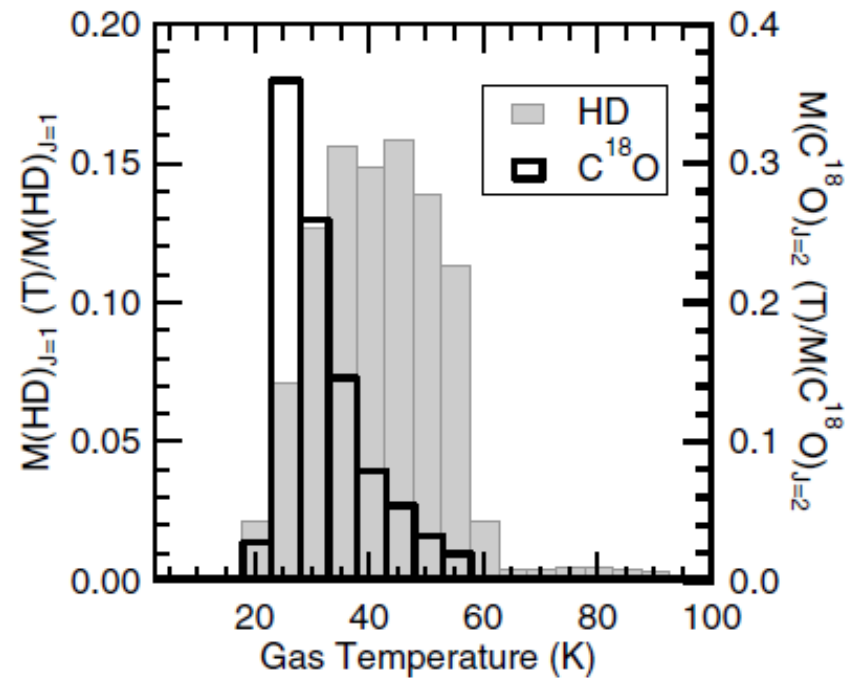
# TW Hya

- 最も近傍のT Tauri型星 (~56pc)
- ほぼ face on
- 非常に多くの観測
  - CO & N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (Qi et al. 2013)
  - CH<sub>3</sub>OH (Walsh et al. 2016)
  - HD (Bergin et al. 2013)
  - H<sub>2</sub>O (Hogerheijde et al. 2011)

$$M_{\text{dust}} = (2-6) \times 10^{-4} M_{\text{sun}}$$

$$M_{\text{gas}} \gtrsim 0.05 M_{\text{sun}}$$

$$\rightarrow n(\text{CO})/n_{\text{H}} \ll 10^{-4}$$



# TW Hya

- 最も近傍のT Tauri型星 ( $\sim 56$  au)
- ほぼ face on
- 非常に多くの観測
  - CO &  $\text{N}_2\text{H}^+$  (Qi et al. 2010)
  - $\text{CH}_3\text{OH}$  (Walsh et al. 2010)
  - HD (Bergin et al. 2013)
  - $\text{H}_2\text{O}$  (Hogerheijde et al. 2011)

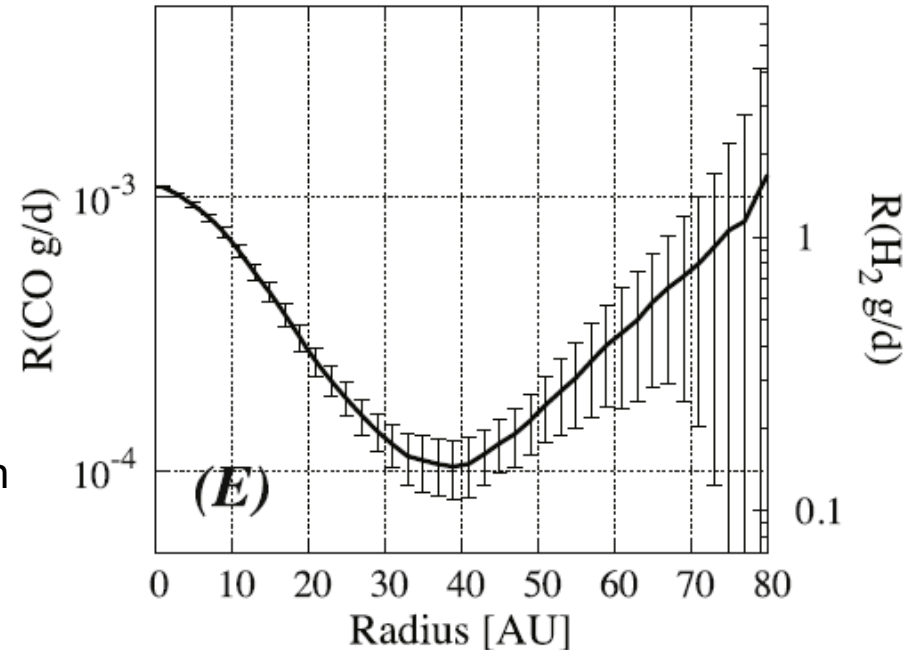
$$M_{\text{dust}} = (2-6) \times 10^{-4} M_{\text{sun}}$$

$$M_{\text{gas}} \gtrsim 0.05 M_{\text{sun}}$$

$$\rightarrow n(\text{CO})/n_{\text{H}} \ll 10^{-4}$$

Nomura et al. (2016)

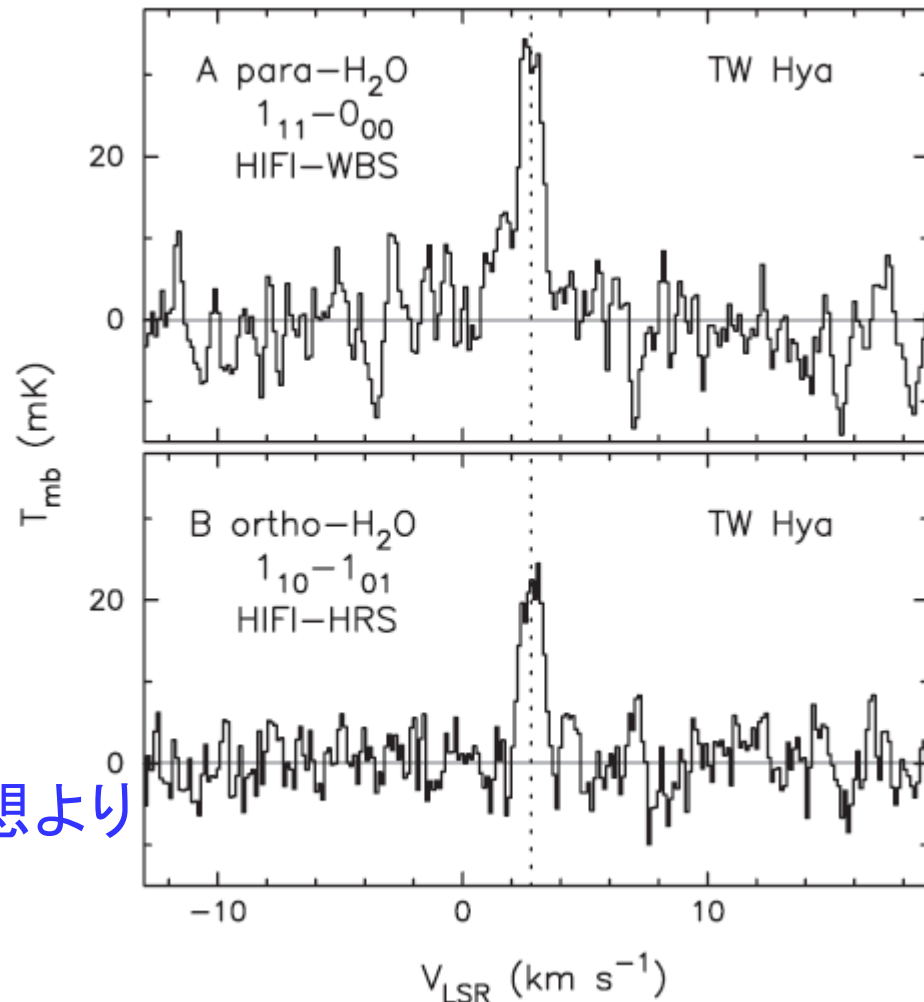
Using the obtained CO column density and dust surface density (Figures 4(d) and 2(b)), we derive the CO gas-to-dust surface density ratio (Figure 4(e)). If we convert it to the  $\text{H}_2$  surface density, assuming an abundance ratio of CO to  $\text{H}_2$  of  $6 \times 10^{-5}$  (Qi et al. 2011), the estimated  $\text{H}_2$  gas mass is orders of magnitude lower than that predicted from the observations of the HD line emission by the *Herschel Space Observatory* (Bergin et al. 2013). The resulting  $\text{H}_2$  gas-to-dust surface density ratio ( $\sim 0.1-1$ ) is about two orders of magnitude lower than the typical interstellar value of  $\sim 100$ , which suggests strong CO depletion throughout the disk down to  $\sim 10$  au.



# TW Hya

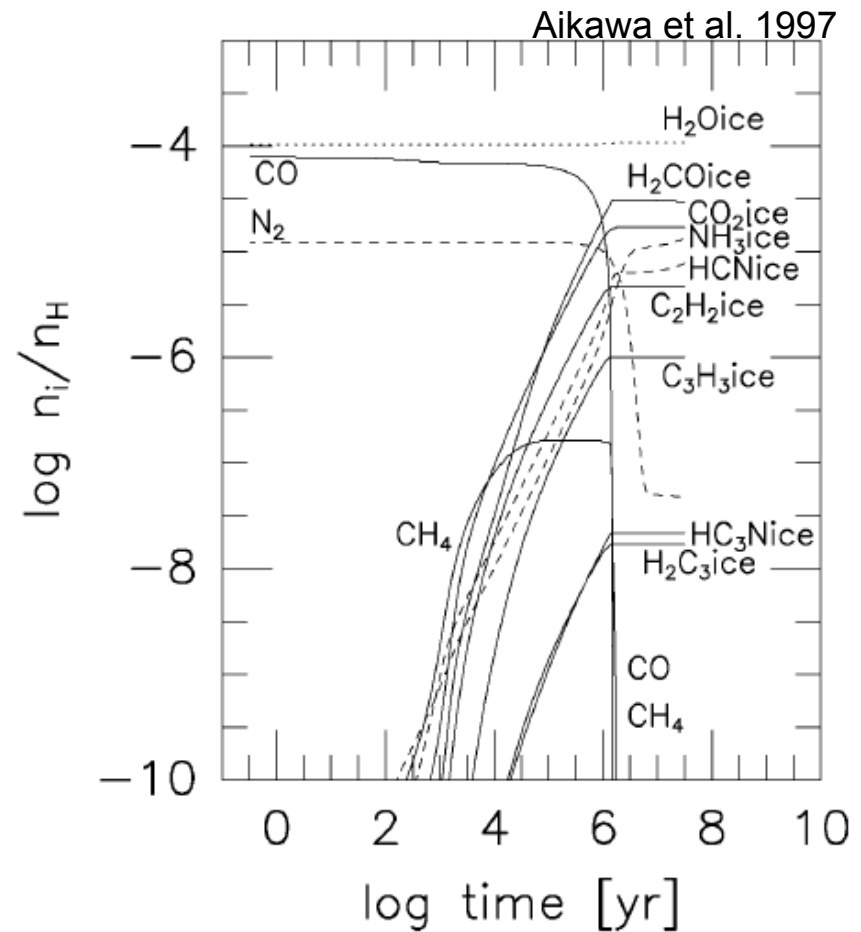
- 最も近傍のT Tauri型星 ( $\sim 56\text{pc}$ )
- ほぼ face on
- 非常に多くの観測
  - CO &  $\text{N}_2\text{H}^+$  (Qi et al. 2013)
  - $\text{CH}_3\text{OH}$  (Walsh et al. 2016)
  - HD (Bergin et al. 2013)
  - $\text{H}_2\text{O}$  (Hogerheijde et al. 2011)

$\text{H}_2\text{O}$  vapor もモデルでの予想より  
桁で少ない



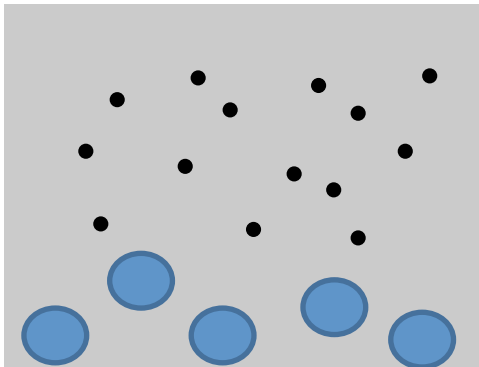
# TW Hya

- 最も近傍のT Tauri型星 ( $\sim 56\text{pc}$ )
- ほぼ face on
- 非常に多くの観測
  - CO &  $\text{N}_2\text{H}^+$  (Qi et al. 2013)
  - $\text{CH}_3\text{OH}$  (Walsh et al. 2016)
  - HD (Bergin et al. 2013)
  - $\text{H}_2\text{O}$  (Hogerheijde et al. 2011)



## CO, $\text{H}_2\text{O}$ 減損のメカニズム

- 氷をまとった大きなダストが沈殿 (Hogerheijde et al. 2011)
- 中心面の大きなダストに分子が吸着 (Kama et al.)
- ほかの分子に変換 (Aikawa et al. 1997; Furuya&YA2014; Bergin2013)



# まとめ

## 円盤での大型有機分子の検出

- CH<sub>3</sub>CN
- CH<sub>3</sub>OH
- 気相観測でしか同定できない
  - 脱離効率、気相での破壊などを加味して氷組成を知る

## 円盤分子層での重元素減損

- HD ... 円盤ガス質量の推定
- 気相のH<sub>2</sub>O, CO は星間での典型的な存在度よりも桁で少ない
  - 氷マントルをまとった大きなダストの沈殿  
and/or ほかの分子への変換