

基研研究会「原始惑星系円盤」

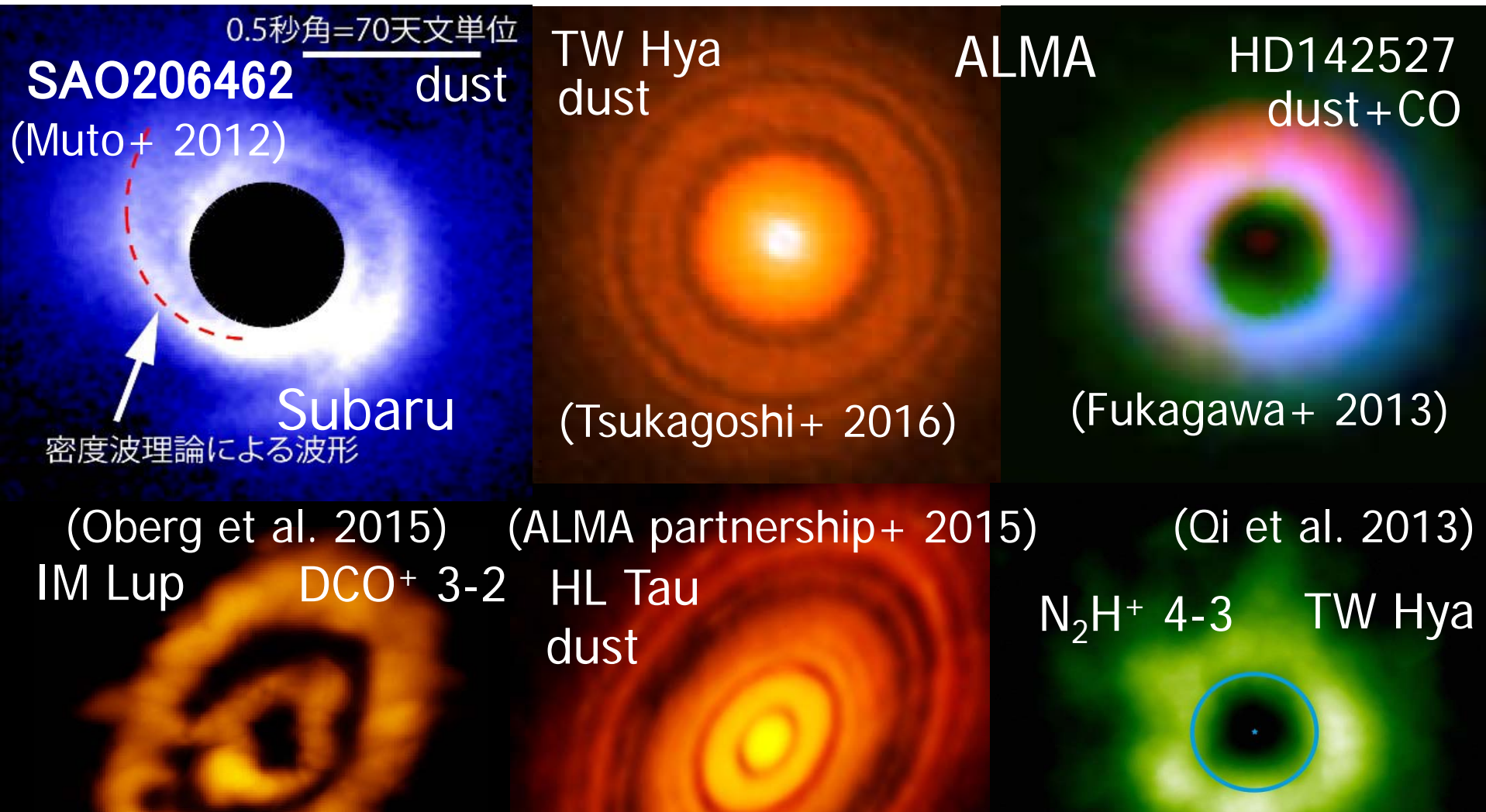
2017年7月10-12日 @ 京都大学

# 原始惑星系円盤からの 衝撃波トレーサー分子 のALMA観測

野村英子<sup>1</sup>, 樋口あや<sup>2</sup>, 坂井南美<sup>2</sup>, 山本智<sup>3</sup>, 長沢真樹子<sup>4</sup>,  
田中今日子<sup>5</sup>, 三浦均<sup>6</sup>, 中本泰史<sup>1</sup>, 田中秀和<sup>7</sup>, 山本哲生<sup>5</sup>,  
C. Walsh<sup>8</sup>, T.J. Millar<sup>9</sup>

1. 東工大, 2. 理研, 3. 東大, 4. 久留米大, 5. 北大低温研,  
6. 名市大, 7. 東北大, 8. U. of Leeds, 9. Queen's U. Belfast

# Gas & Dust Observations in Disks



Revealing physical & chemical structure  
of planet-forming regions

# 原始惑星系円盤からのガス輝線の観測

**UV** H<sub>2</sub> Lyman-Werner band transitions

**Optical** [OI] 6300Å

**NIR**

H<sub>2</sub> v=1-0 S(1), S(0),  
CO Δv=2, Δv=1,

H<sub>2</sub>O, OH, HCN, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>

**MIR**

H<sub>2</sub> v=0-0 S(1), S(2), S(4)

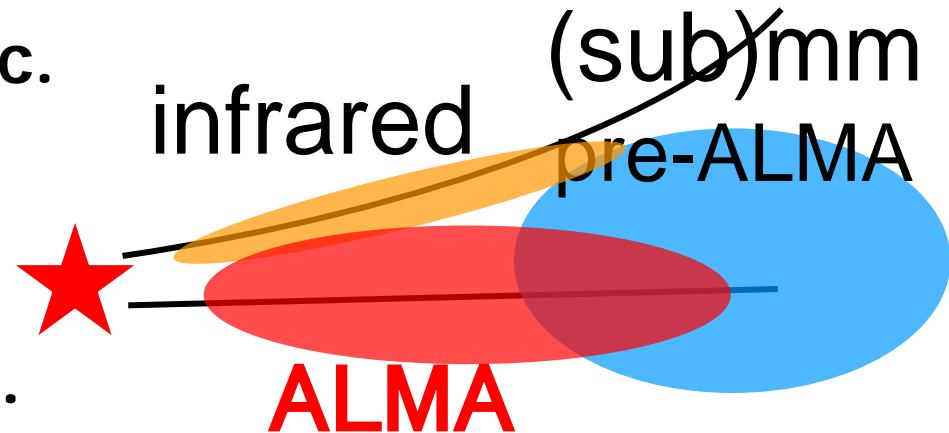
H<sub>2</sub>O, OH, HCN, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, etc.  
(Spitzer Space Telescope)

**FIR**

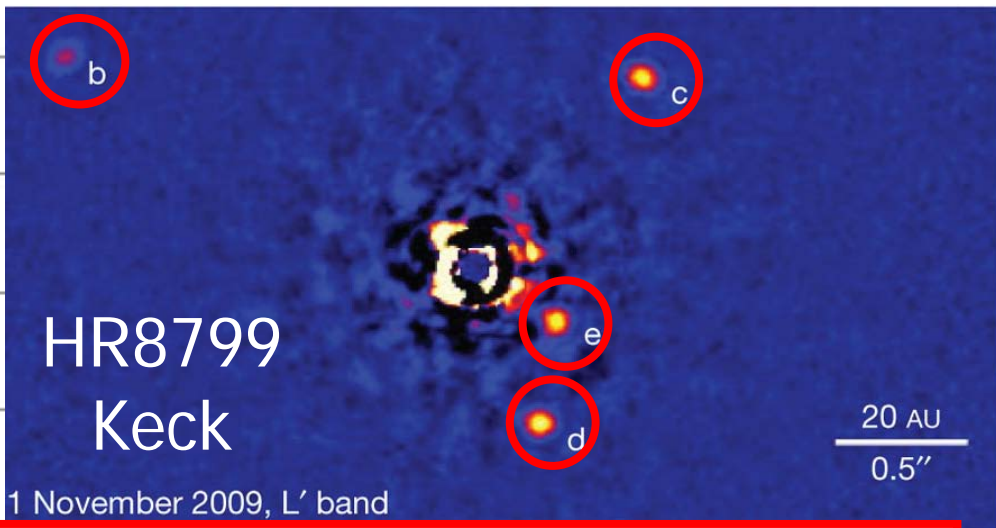
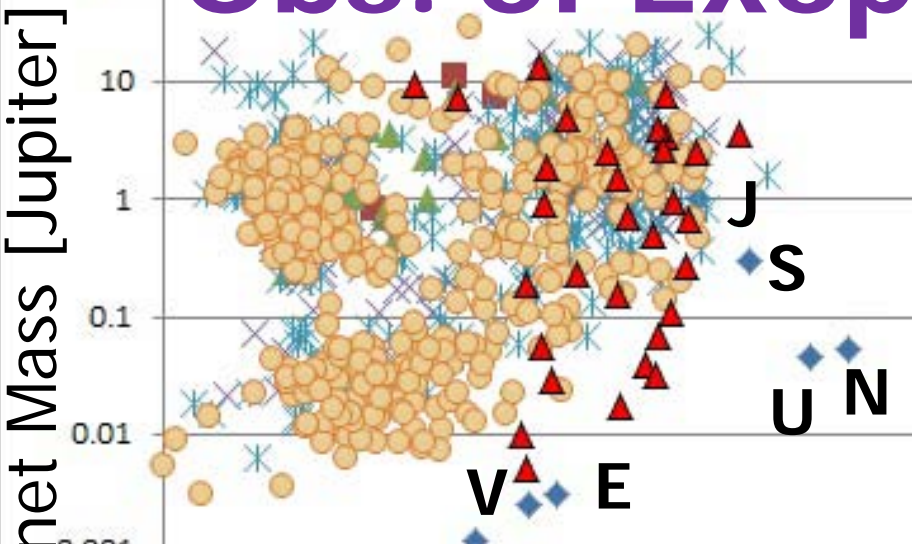
[OI] 63μm, 145μm,  
CO, H<sub>2</sub>O, CH<sup>+</sup>, HD, NH<sub>3</sub>, etc.  
(Herschel Space Observatory)

**(sub)mm**

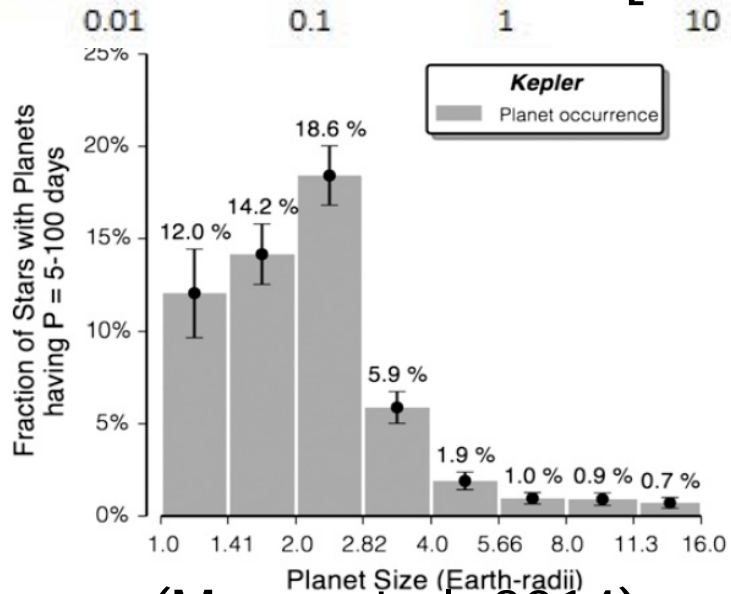
<sup>12</sup>CO, <sup>13</sup>CO, C<sup>18</sup>O, C<sup>17</sup>O, <sup>13</sup>C<sup>18</sup>O,  
HCO<sup>+</sup>, H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>, DCO<sup>+</sup>,  
C<sub>2</sub>H, c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CO, CH<sub>3</sub>OH,  
HCN, H<sup>13</sup>CN, DCN, HC<sup>15</sup>N,  
HNC, CN, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, N<sub>2</sub>D<sup>+</sup>,  
HC<sub>3</sub>N, CH<sub>3</sub>CN, CS, C<sup>34</sup>S, etc.



# Obs. of Exoplanets & PPDs



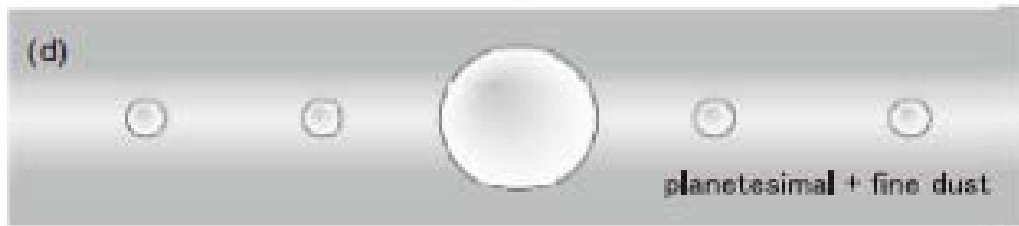
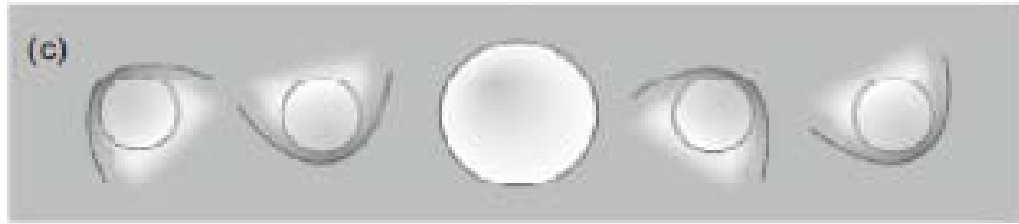
分子輝線で惑星形成の兆候をとらえられるか？



(Marcy et al. 2014)



# Evaporation of Icy Planetesimals



Formation of  
protoplanet/planet



Excite eccentricities of  
planetesimals



Evaporation of icy  
planetesimals due to  
shock heating

e.g., Kokubo & Ida 1998, Weidenschilling+ 1998, Tanaka+ 2013, Nagasawa+ 2014

**Can we detect evaporation of  
icy planetesimals with ALMA?**

# 原始惑星系円盤の化学構造

(e.g., Dutrey+ 1997, Markwick+2002, Aikawa+ 2002, Bergin+ 2007)

- 円盤表層部：光解離→ラジカルが豊富
- 円盤中層部：分子が豊富
- 円盤外縁赤道面付近：気相分子の凍結

UV, X-rays

CN, C<sub>2</sub>H

HCN, H<sub>2</sub>CO

H<sub>3</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub>D<sup>+</sup>

氷微惑星も衝撃波加熱により  
彗星同様分子を放出→ALMA観測？



塵表面への凍結

H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>CO,  
NH<sub>3</sub>, HCN, H<sub>2</sub>S, SO, etc.



岩石惑星



ガス惑星



氷惑星

# 化学モデル

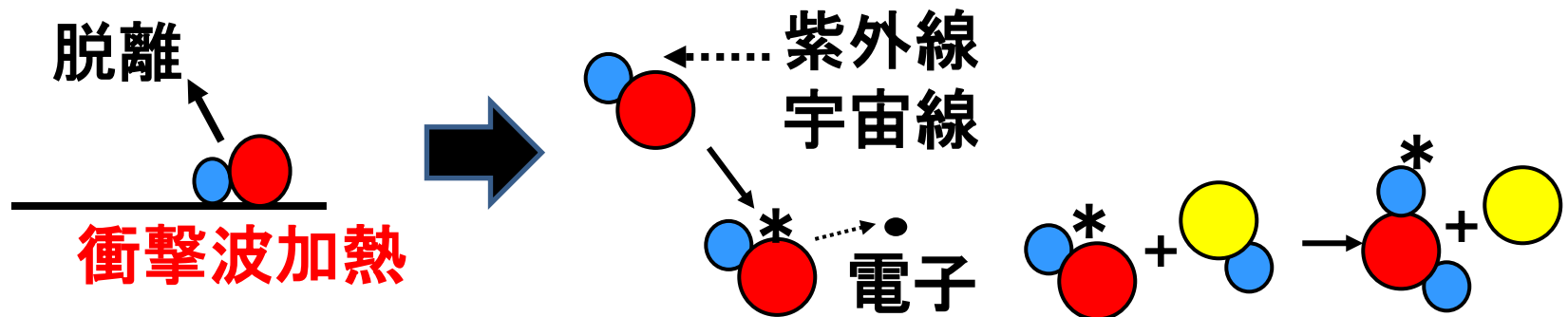
$$\frac{d(n_{\alpha} v_{\alpha})}{dr} = \sum_{\beta} A_{\alpha\beta} n_{\beta} + \sum_{\beta, \gamma} B_{\alpha\beta\gamma} n_{\beta} n_{\gamma}$$

化学ネットワーク : 375種, 4346気相反応

UMIST Database for Astrochemistry (Woodall+ 2007)

初期条件 : 固相分子の気相への蒸発

$\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_2, \text{C}_2\text{H}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O},$   
 $\text{H}_2\text{CO}, \text{CH}_3\text{OH}, \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}, \text{N}_2, \text{NH}_3, \text{H}_2\text{S}, \text{OCS}$



# 物理量依存性

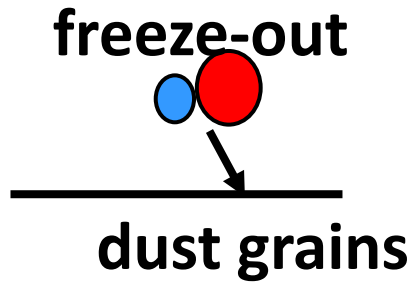
Yamazaki, Nakamoto, Nakajima, in prep.  
Nakajima (MSci thesis, 2009)

ダスト温度

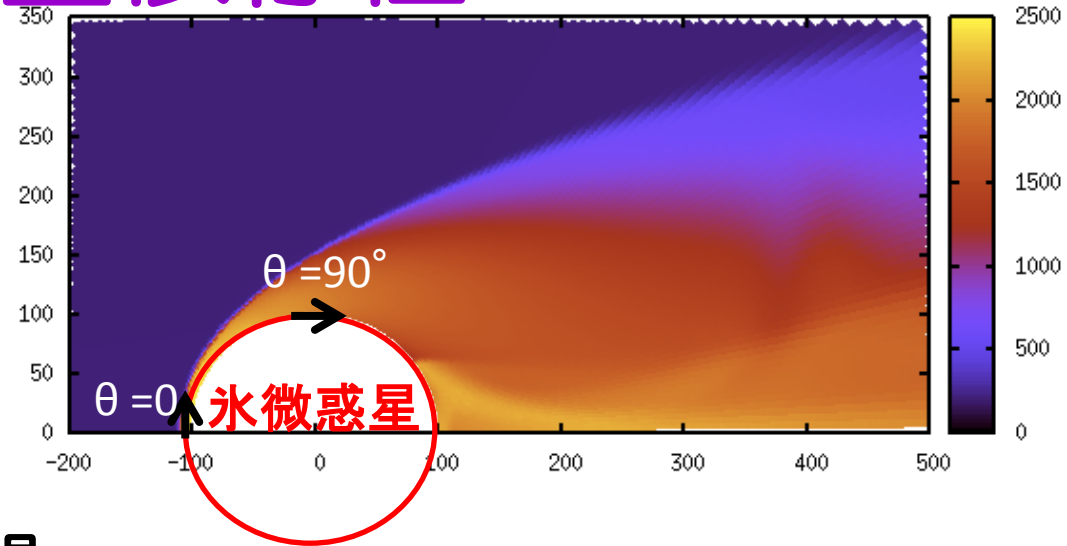
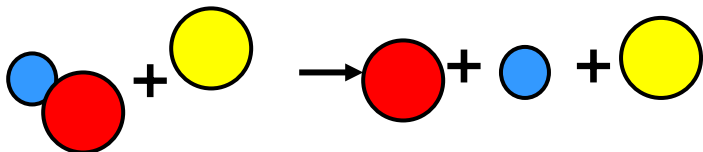
→ ダストへの凍結

ダスト密度

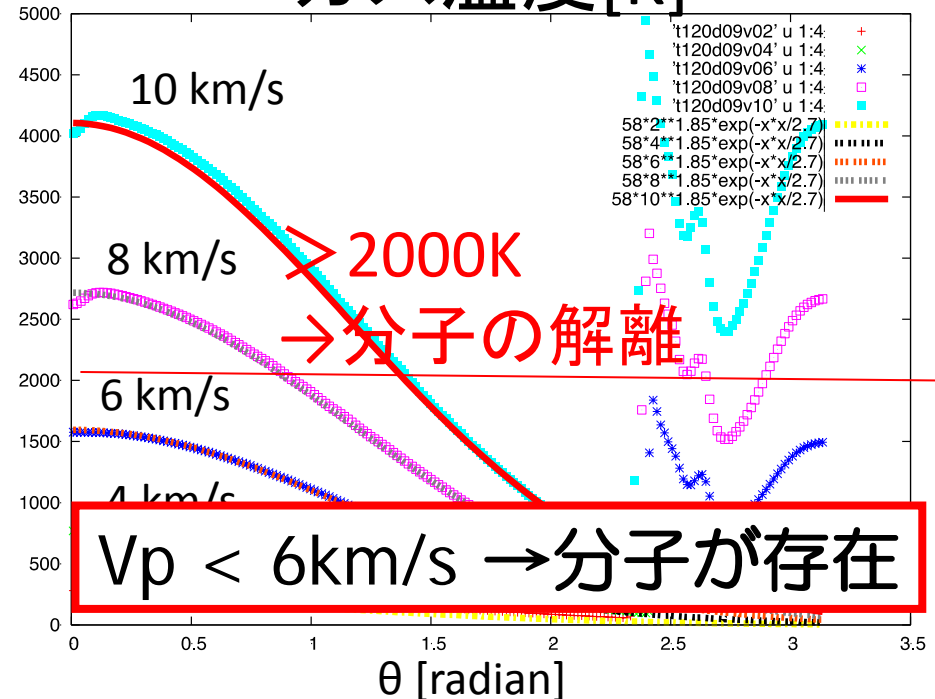
→ ダストへの凍結時間



ガス温度 → 熱解離

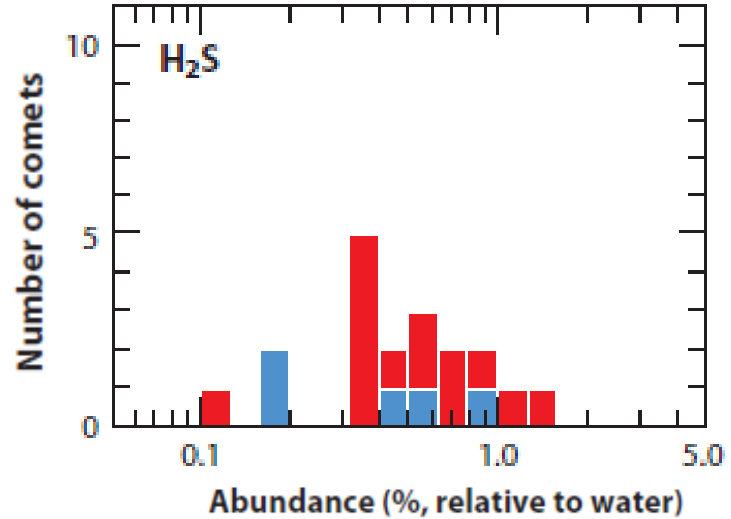
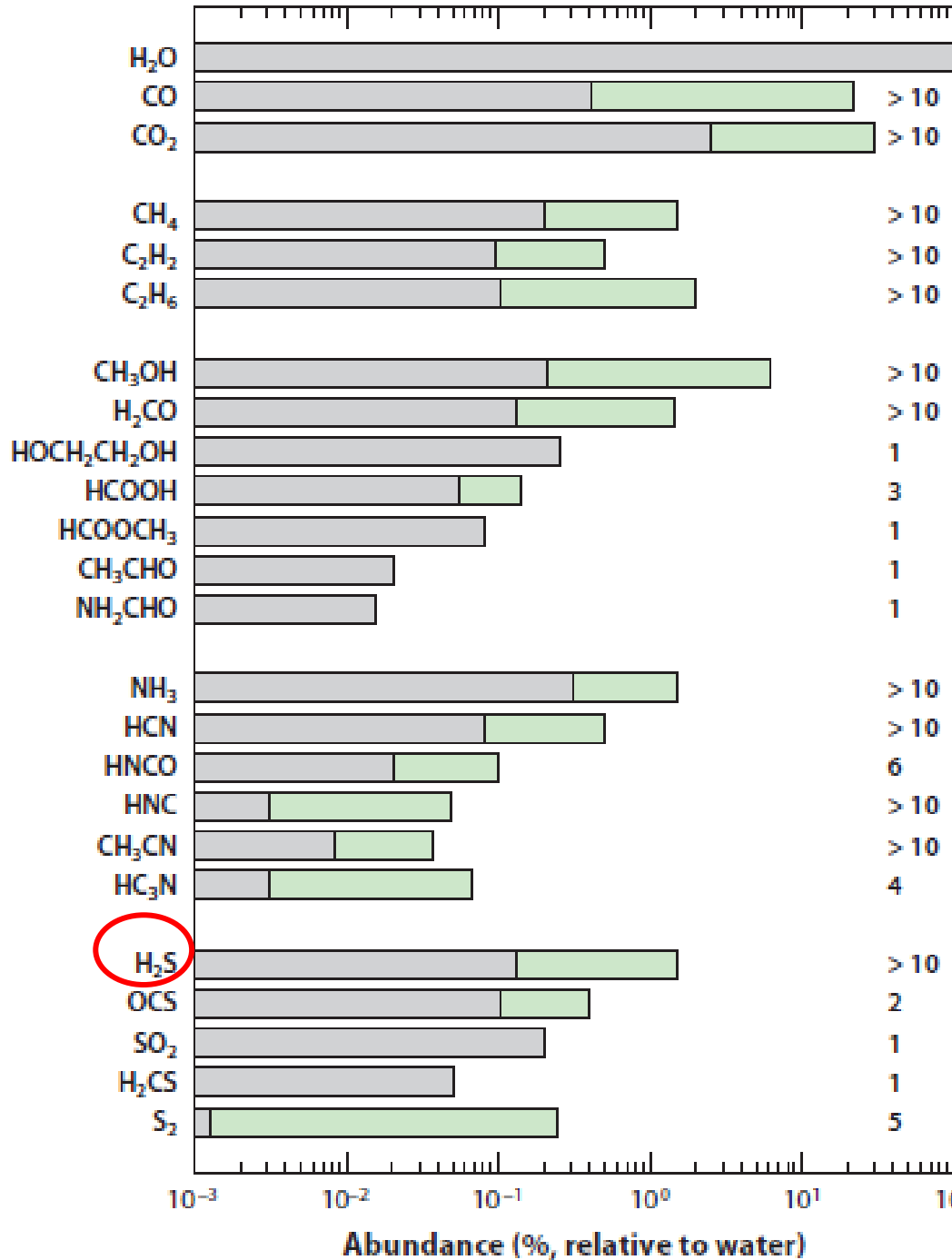


ガス温度[K]





# 彗星からの分子 の観測



$\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2\text{O} \sim 10^{-3}-10^{-2}$   
 $\text{SO}/\text{H}_2\text{O} \sim 10^{-3}$   
 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{O} \sim 10^{-3}$

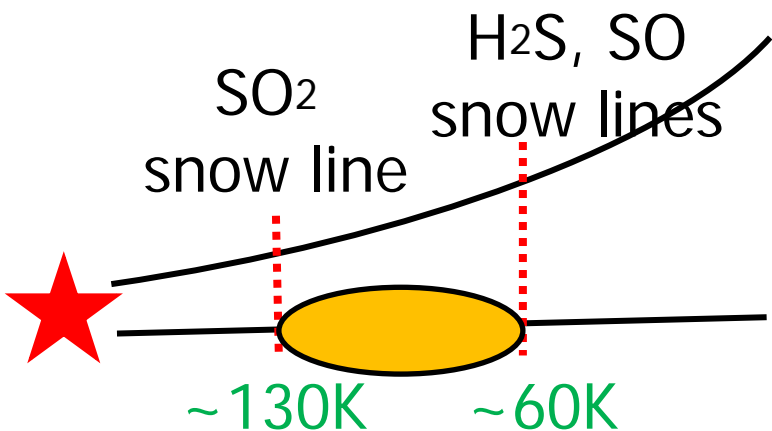
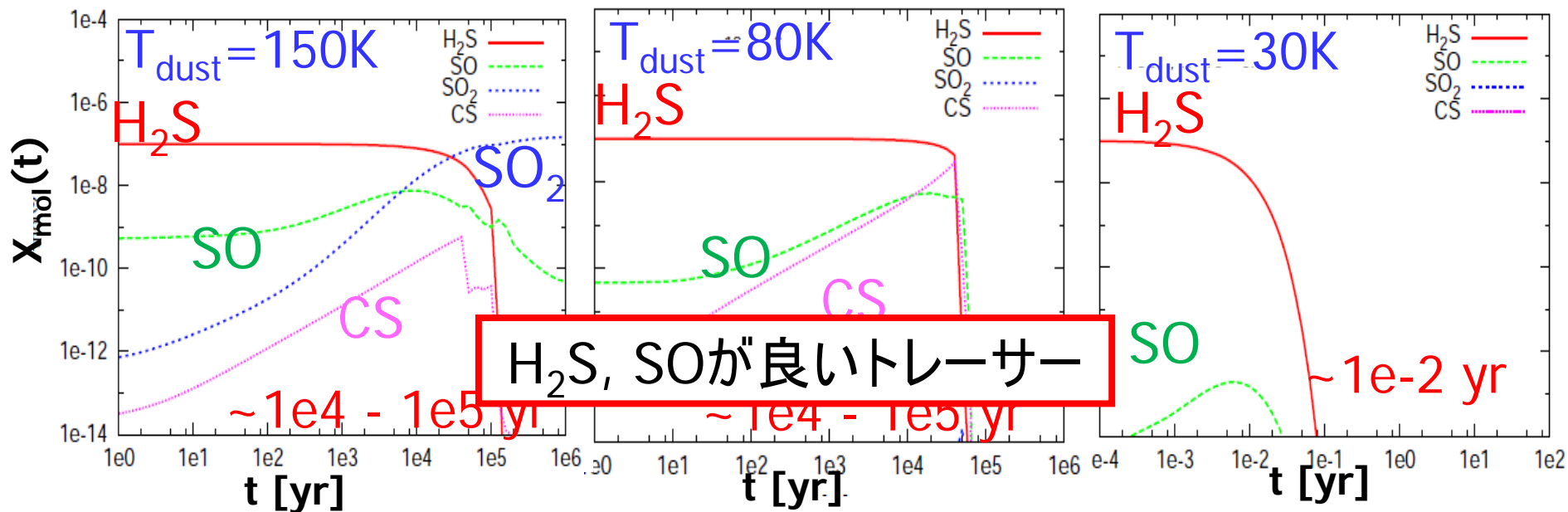
**Rosetta** (67P/C.-G.)

$\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2\text{O} \sim (0.67-1.75) \times 10^{-2}$   
 $\text{SO}/\text{H}_2\text{O} \sim (1.4-4) \times 10^{-5}$   
 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{O} \sim (1.1-4.1) \times 10^{-4}$

(Mumma & Charnley 2011, Calmonte et al. 2016)

# 硫黄を含む分子組成の時間進化

$V_p < 6 \text{ km/s}$ ,  $n = 1 \text{e}12 \text{cm}^{-3}$

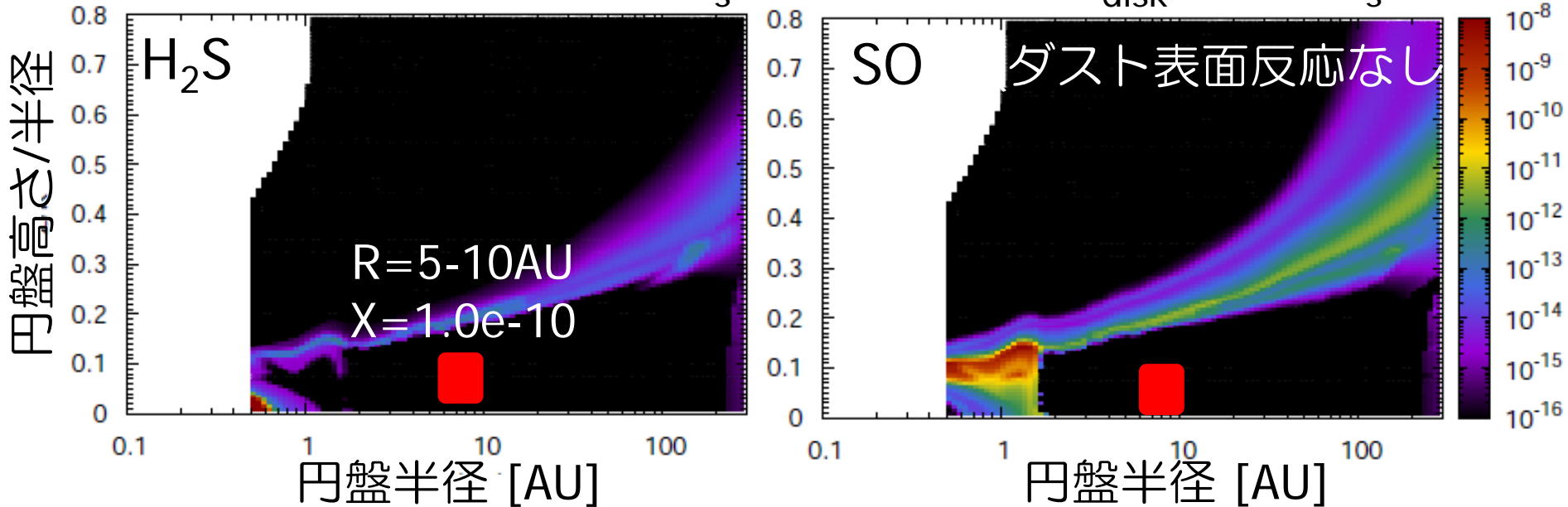


蒸発分子が化学反応により  
失われる時間尺度  $\sim 10^{4-5} \text{ yr}$   
ダストへの凍結時間

$$\sim 10^9 / (n[\text{cm}^{-3}]) \text{ yr}$$

# H<sub>2</sub>S & SO分子輝線のALMA観測可能性

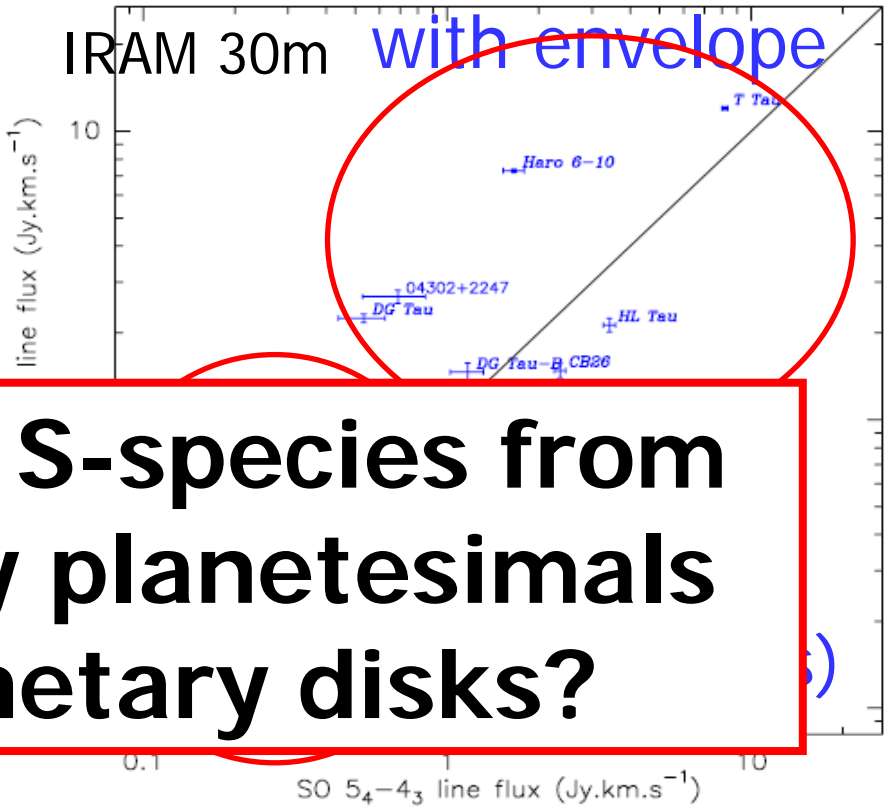
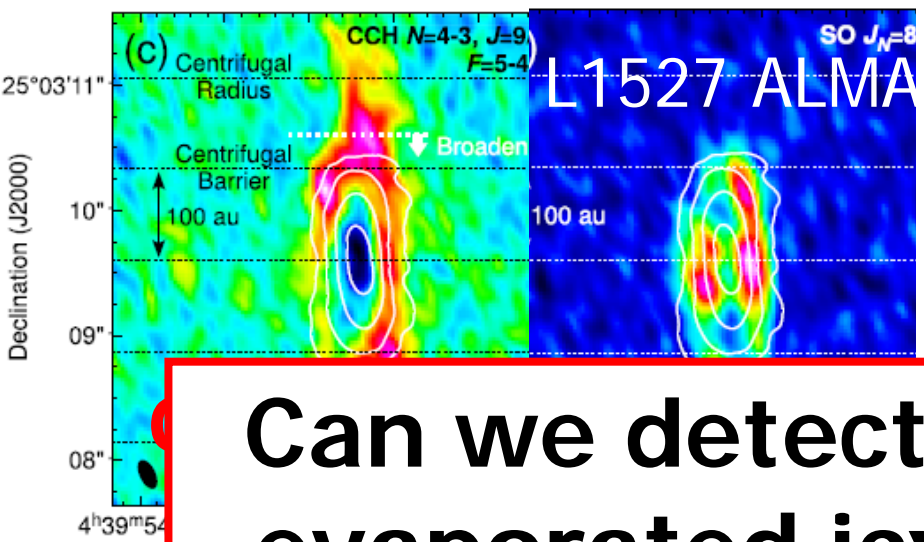
T Tauri star,  $M_* = 0.5M_s$ ,  $T_* = 4000K$ ,  $M_{\text{disk}} \sim 0.01M_s$



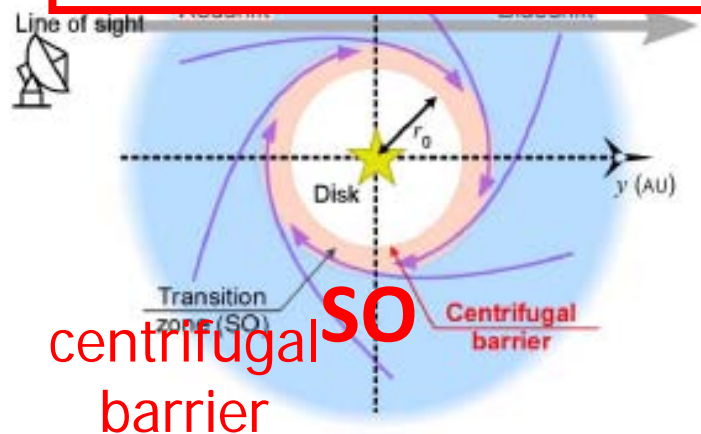
輝線ピーク フラックス密度	氷微惑星蒸発		これまでの観測 (IRAM 30m, Dutrey+11)
	なし	あり	
H <sub>2</sub> S 217GHz	0.3mJy	35mJy	< 10mJy @ 169GHz
SO @ 220GHz	0.4mJy	45mJy	< 10mJy @ 99GHz

円盤半径 ~ 5-10AU で氷微惑星の軌道が励起されて  
衝撃波加熱が起きると, H<sub>2</sub>S, SO分子輝線が観測可

# 原始星天体と円盤からの硫黄分子の観測



**Can we detect S-species from evaporated icy planetesimals in protoplanetary disks?**



centrifugal barrier SO

(Sakai et al. 2014, 2017)

(Guilloteau et al. 2013)

Protoplanetary disks

$H_2S@169GHz, < 10mJy$

$SO@99GHz, < 10mJy$

IRAM 30m (Dutrey et al. 2011)

# ALMA Observations of SO & H<sub>2</sub>S

Date: 2016. 8. 1, 17, 27

ALMA cycle 3, band 6 (PI: H. Nomura)

Dust cont., SO 6(5)–5(4), H<sub>2</sub>S 2<sub>2,0</sub>–2<sub>1,1</sub>

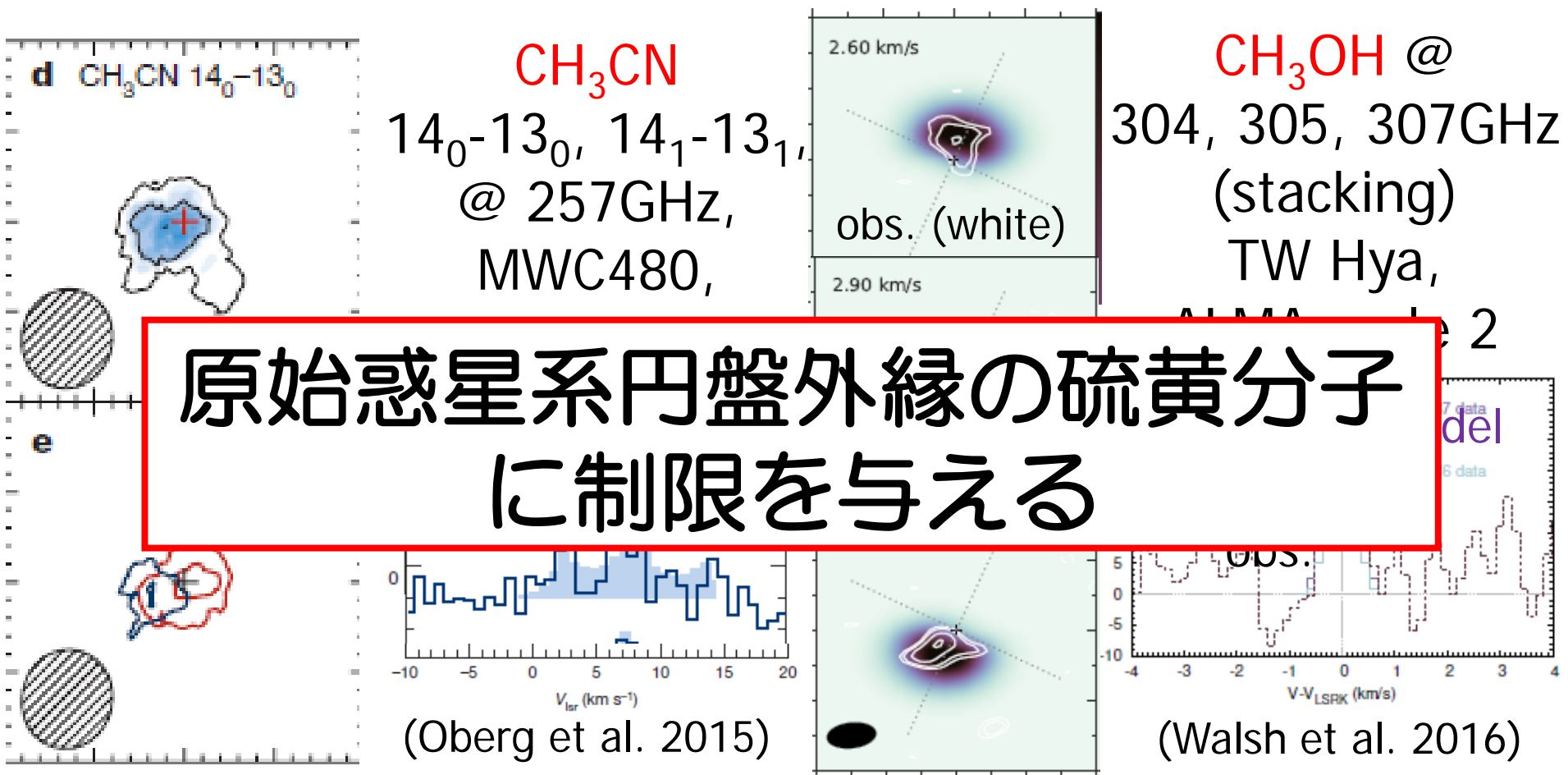
10 T Tauri disks in Taurus (angular resolution ~ 0.5")

SO & H<sub>2</sub>S upper limits

By A. Higuchi

cf. SO 6<sub>7</sub>-5<sub>6</sub> @ jets 0.48-1.6 Jy km s<sup>-1</sup> by IRAM 30m  
(Guilloteau et al. 2016)

# 原始惑星系円盤からの氷蒸発分子の観測

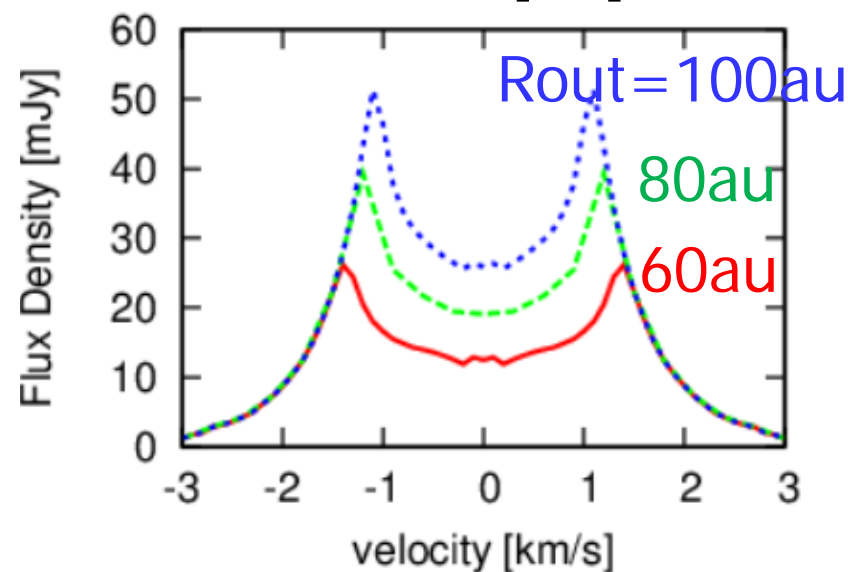
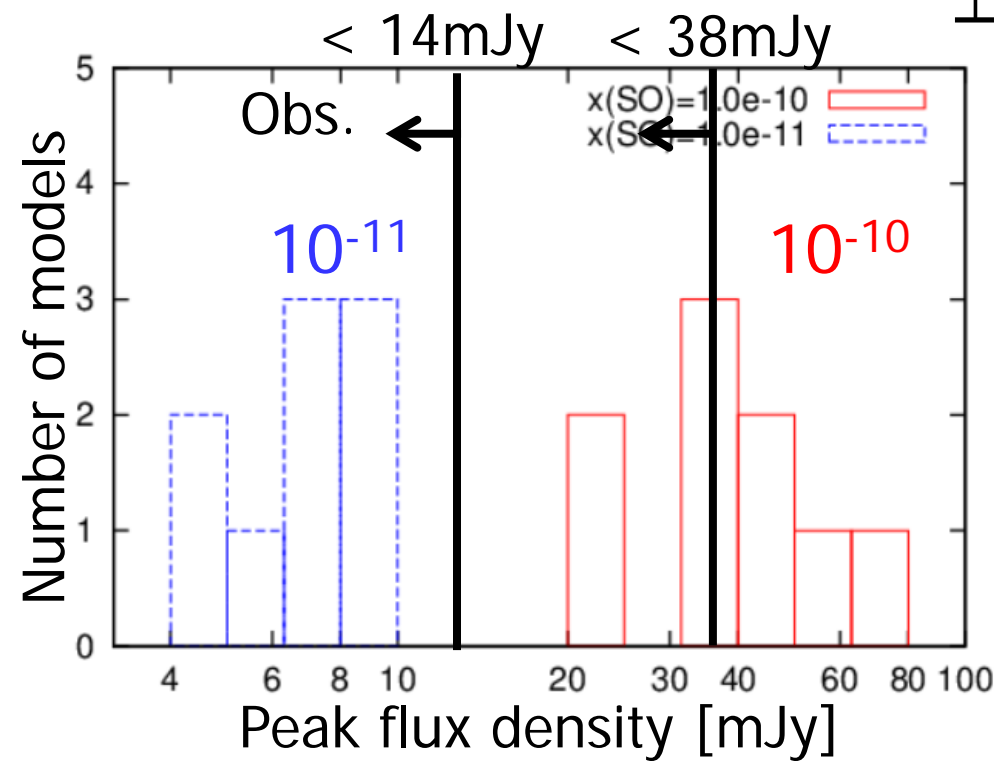
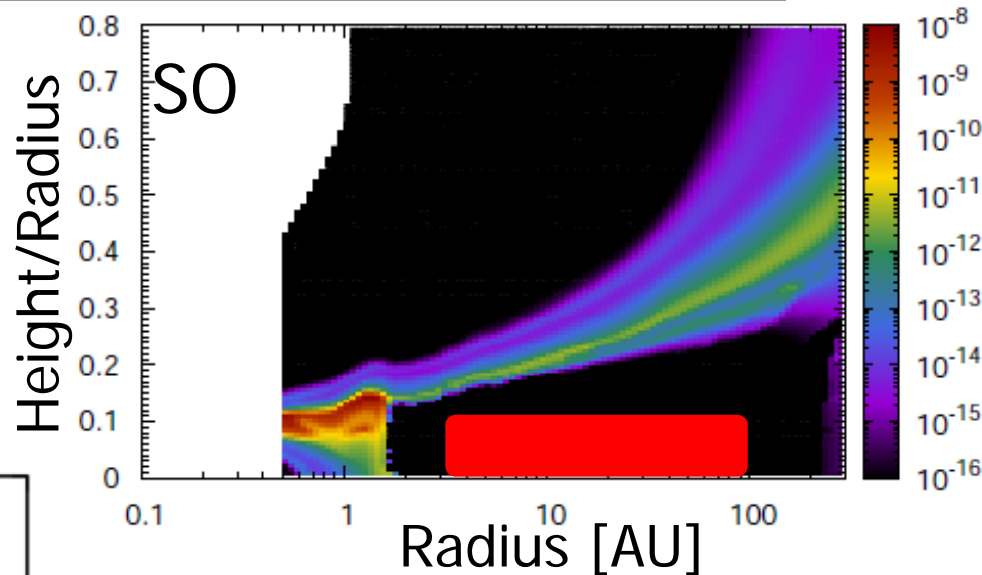


Disk radii of 30-100AU for CH<sub>3</sub>CN, 30-60AU for CH<sub>3</sub>OH  
CH<sub>3</sub>CN/HCN ~ 5-20%, CH<sub>3</sub>OH/H<sub>2</sub>O ~ 0.7-5% ⇔ comets  
\* gas-phase abundances ≠ icy grain abundances

# Upper Limit of SO Abundance

physical model + line radiative transfer

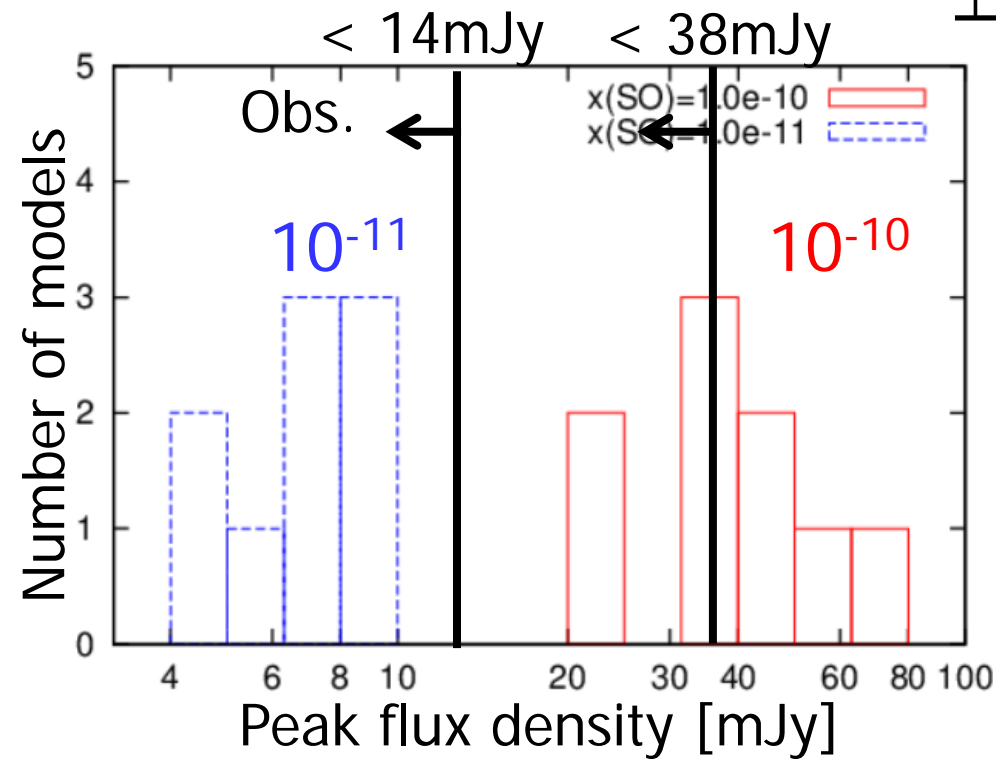
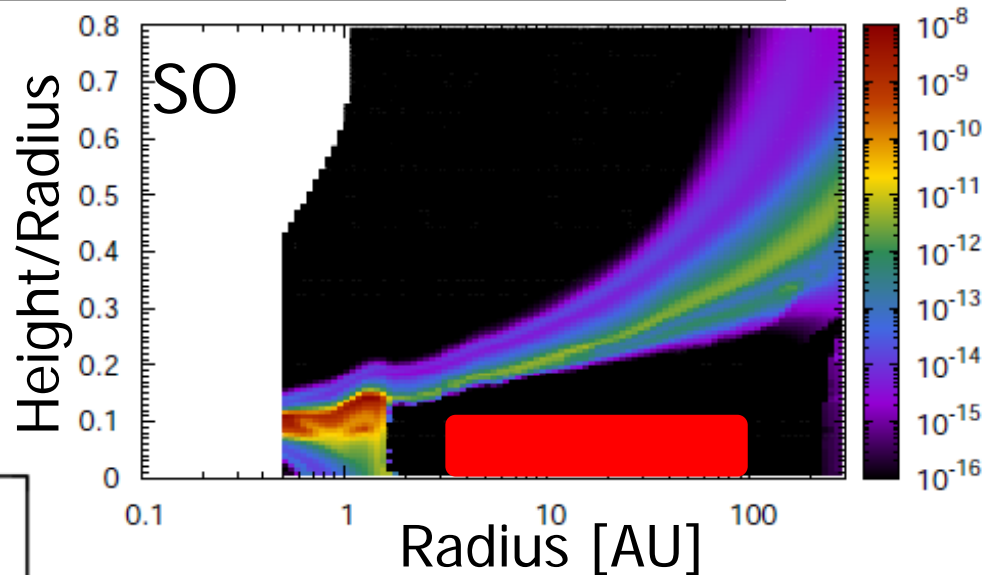
Abundance	1e-11, 1e-10
Inclination	30°, 55°, 70°
Outer Radius	60 au, 80 au, 100 au



# Upper Limit of SO Abundance

physical model + line radiative transfer

Abundance	1e-11, 1e-10
Inclination	30°, 55°, 70°
Outer Radius	60 au, 80 au, 100 au



$$x(\text{SO}) < 10^{-10}$$

cf. TW Hya disk:

$$x(\text{H}_2\text{O}) \sim 10^{-9}$$

$$x(\text{CH}_3\text{OH}) \sim 10^{-12} - 10^{-11}$$

comets:  $\text{SO}/\text{H}_2\text{O} \sim 10^{-3}$

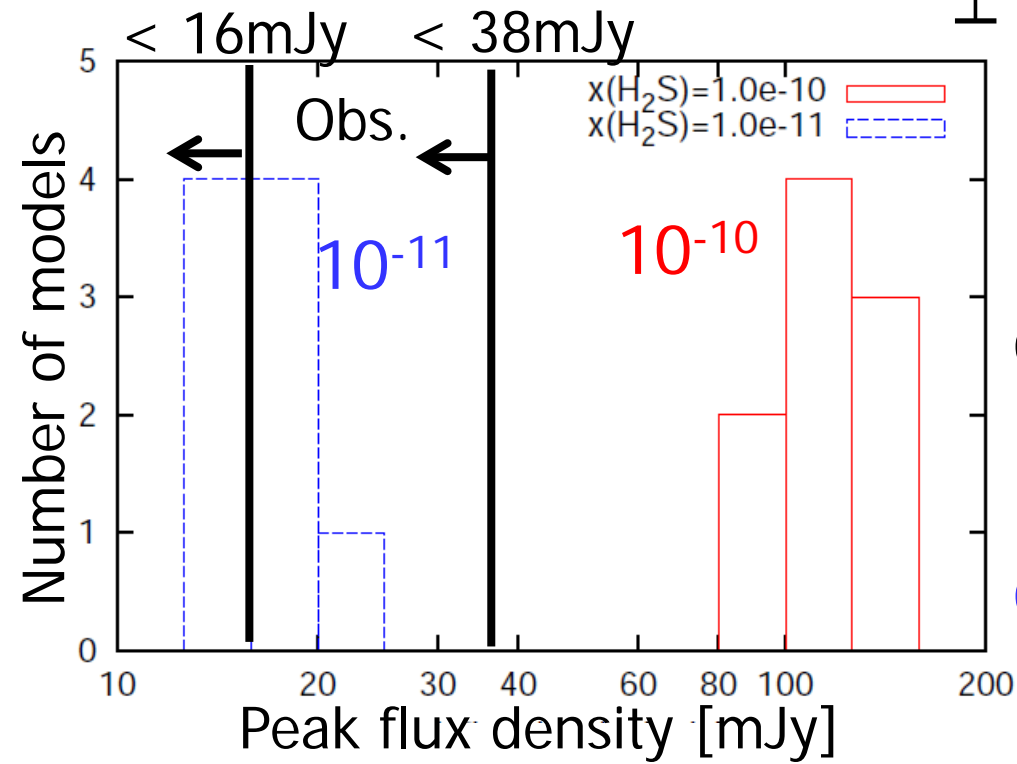
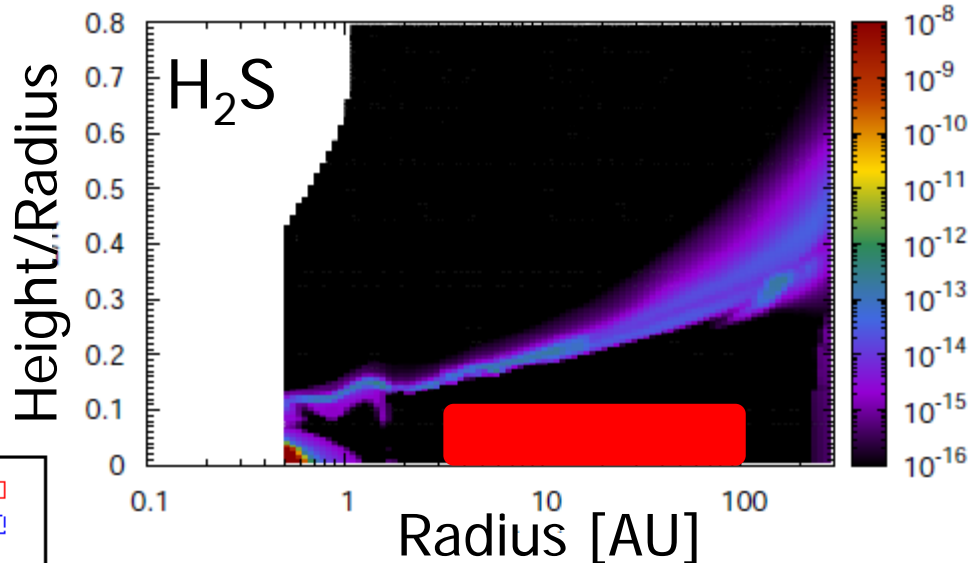
$$\text{CH}_3\text{OH}/\text{H}_2\text{O} \sim 10^{-3} - 10^{-1}$$



# Upper Limit of H<sub>2</sub>S Abundance

physical model + line radiative transfer

Abundance	1e-12, 1e-11
Inclination	30°, 55°, 70°
Outer Radius	60 au, 80 au, 100 au



$x(\text{H}_2\text{S}) < 10^{-10}$

cf. TW Hya disk:  
 $x(\text{H}_2\text{O}) \sim 10^{-9}$   
 $x(\text{CH}_3\text{OH}) \sim 10^{-12}-10^{-11}$

comets:  $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2\text{O} \sim 10^{-3}-10^{-2}$   
 $\text{CH}_3\text{OH}/\text{H}_2\text{O} \sim 10^{-3} - 10^{-1}$

# まとめ

## 原始惑星系円盤中の硫黄系分子のALMA観測

原始惑星系円盤中の惑星系形成にともなう  
氷微惑星の蒸発を  $\text{H}_2\text{S}$  &  $\text{SO}$  輝線観測で検証

10個のTタウリ円盤で  $\text{H}_2\text{S}$  &  $\text{SO}$  輝線を観測

観測上限値 + モデル計算

→ 円盤外縁領域の  $\text{H}_2\text{S}$  &  $\text{SO}$  存在量に制限

$$x(\text{SO}) < 10^{-10} \text{ \& } x(\text{H}_2\text{S}) < 10^{-10}$$

彗星中の  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}/\text{H}_2\text{O}$  比 & 円盤・彗星の

$\text{CH}_3\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$  比とコンシステント

円盤中の氷 & 氷微惑星蒸発に強い制限を与える

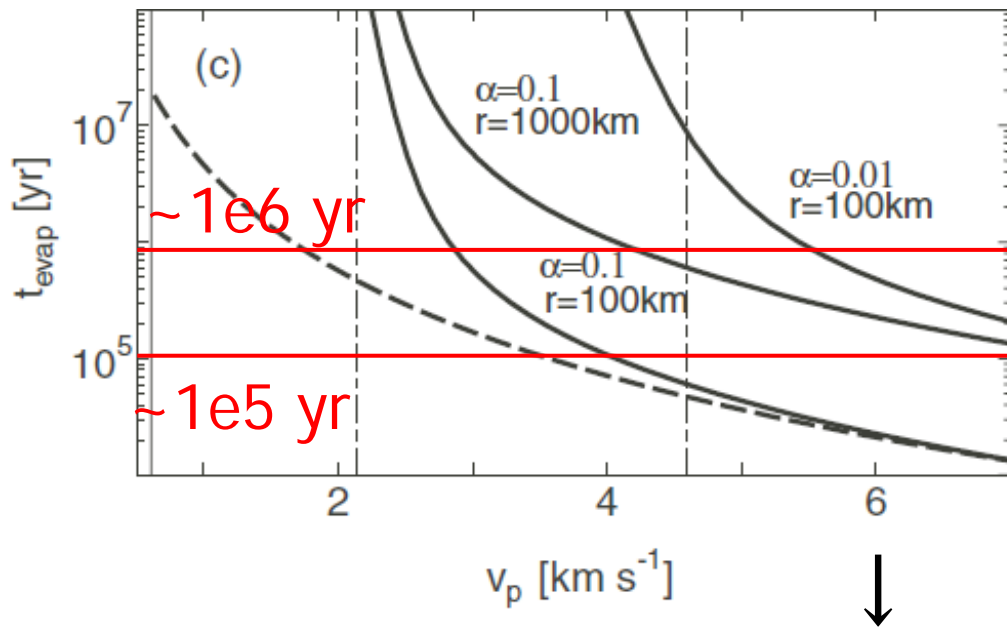
ためには、より高感度の観測が必要



# 時間尺度の比較：分子の気相滞在量

蒸発した分子の気相反応の時間尺度  $\sim 10^4 - 10^5$  yrs

1個の氷微惑星の蒸発にかかる時間  $\sim 10^5 - 10^6$  yrs



$$t_{\text{evap}} = \frac{m_p L_{\text{evap}}}{\pi r_p^2 F_{\text{heat}}}$$

(Tanaka et al. 2013)

平均すると蒸発した分子の10%程度が気相に滞在

微惑星の運動が励起されている時間  $\sim 10^6$  yrs

(Nagasawa et al. 2014)