

Symposium on Planetary Sciences 2019

Feb. 18-21, 2019 @ 東北大学

# 原始惑星系円盤の 化学進化

## : 太陽系初期物質との比較

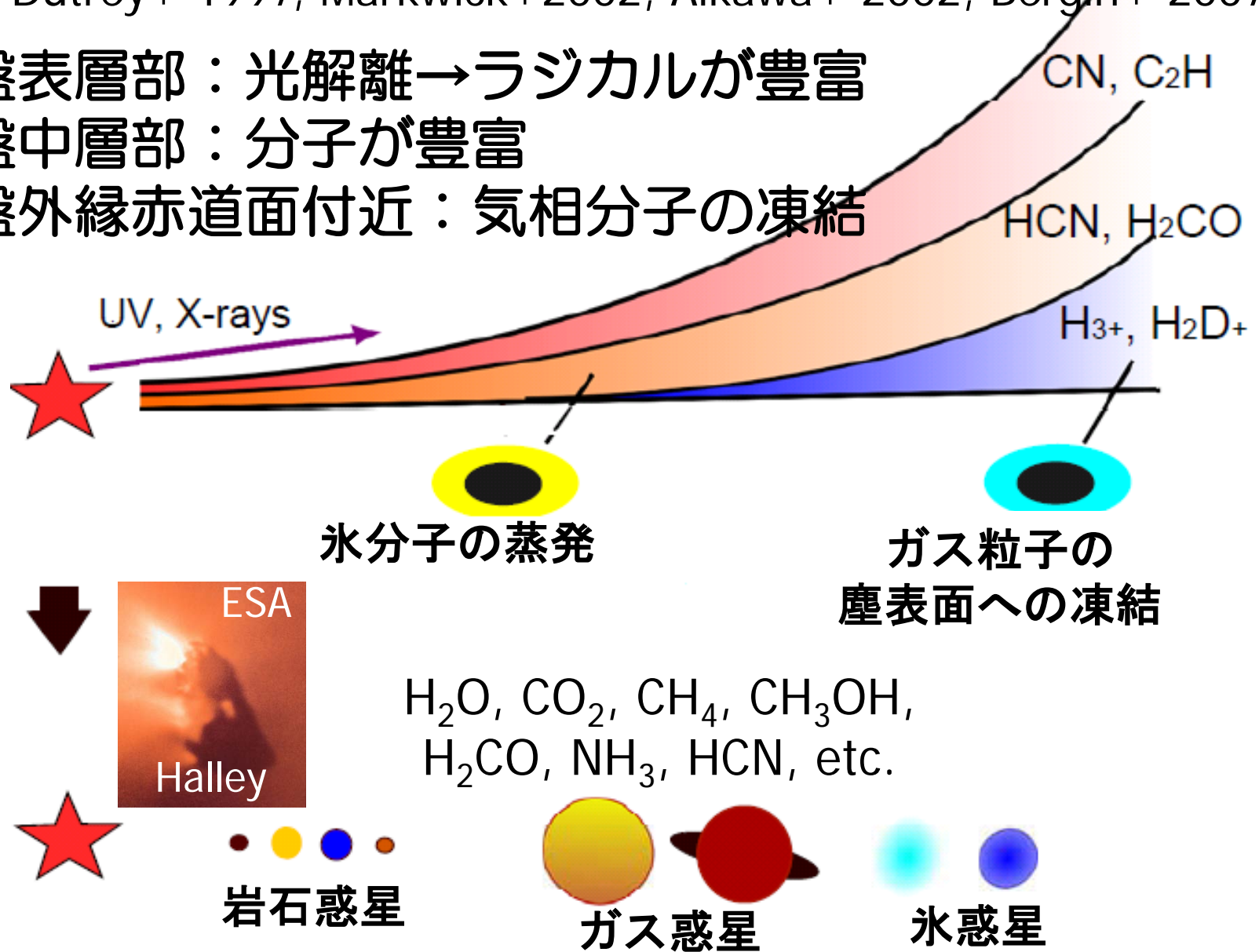
野村 英子<sup>1</sup>, Chen-En Wei<sup>1</sup>, P. Theule<sup>2</sup>,  
C. Walsh<sup>3</sup>, T.J. Millar<sup>4</sup>

1. 東工大地惑,
2. Aix-Marseille大学,
3. Leeds大学,
4. Queen's大学Belfast

# 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



# 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)

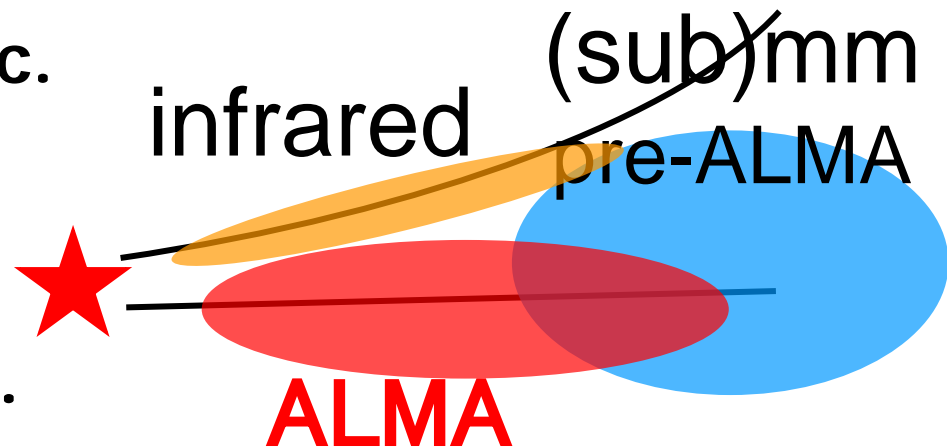
H<sub>2</sub>O, OH, HCN, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, etc.  
(Spitzer Space Telescope)

**FIR**

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

**(sub)mm**

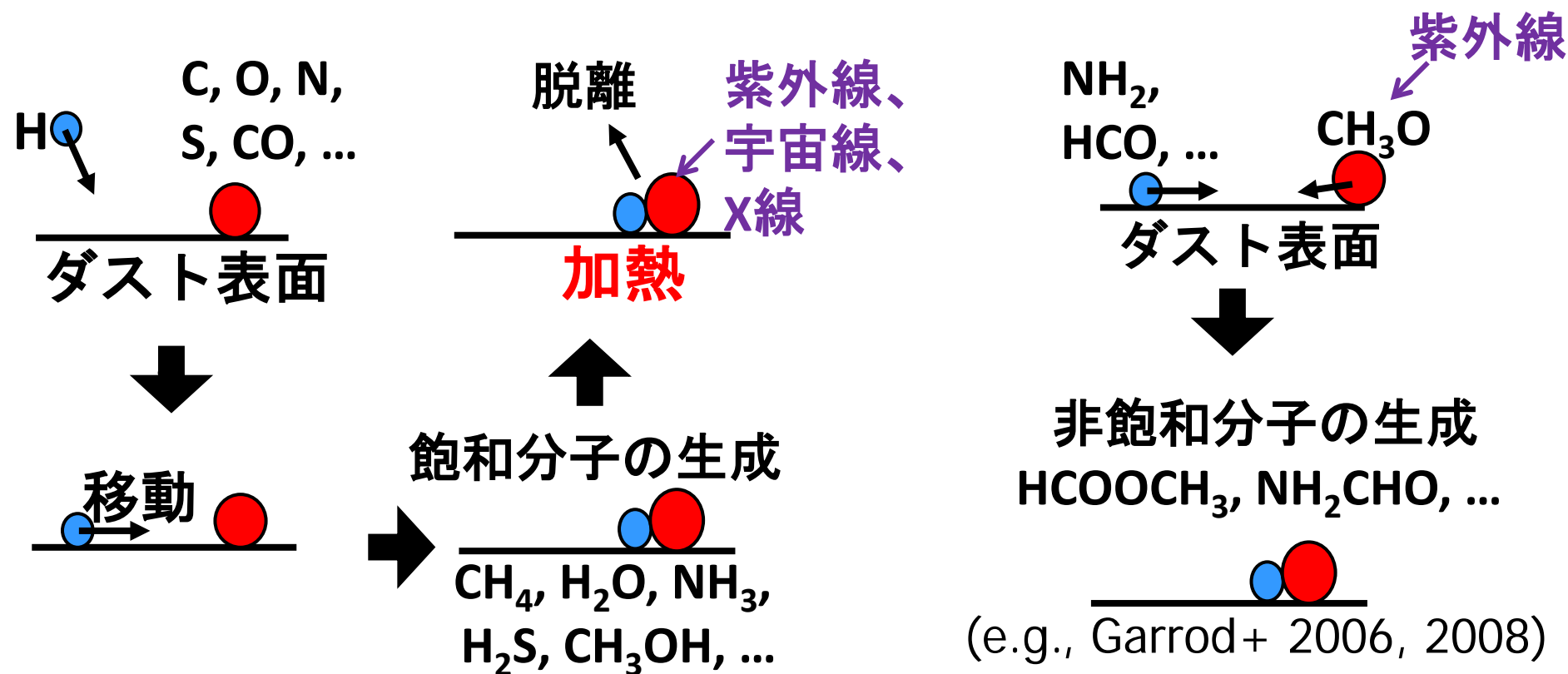
CO, <sup>13</sup>CO, C<sup>18</sup>O, C<sup>17</sup>O, <sup>13</sup>C<sup>18</sup>O,  
HCO<sup>+</sup>, H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>, DCO<sup>+</sup>, [CI],  
C<sub>2</sub>H, c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CO, HCOOH,  
CH<sub>3</sub>OH,  
HCN, H<sup>13</sup>CN, DCN, HC<sup>15</sup>N,  
HNC, 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,  
H<sub>2</sub>S, SO, etc.



# 星間空間におけるダスト表面反応

低温: < 20K

暖かい領域: 30-50K

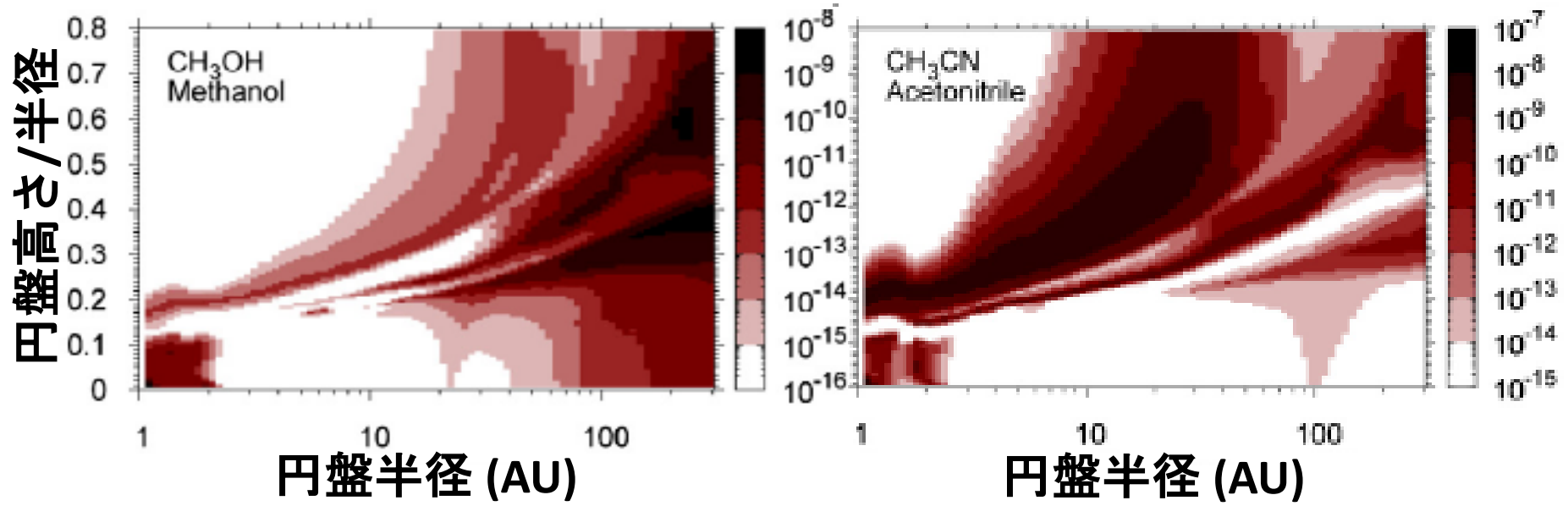
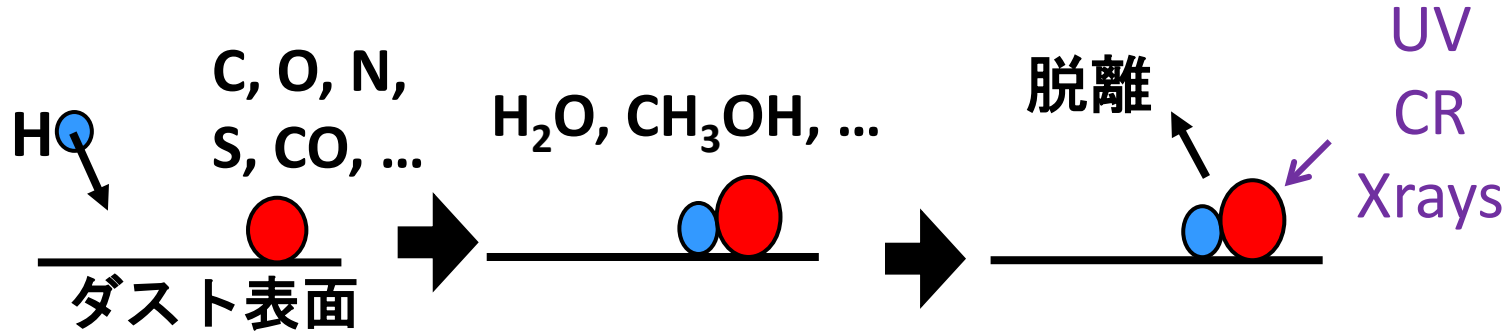


気相反応では生成されにくい分子種が生成される  
暖かいダスト表面ではより複雑な分子種が生成

# 原始惑星系円盤中の有機分子生成

塵表面反応

光脱離



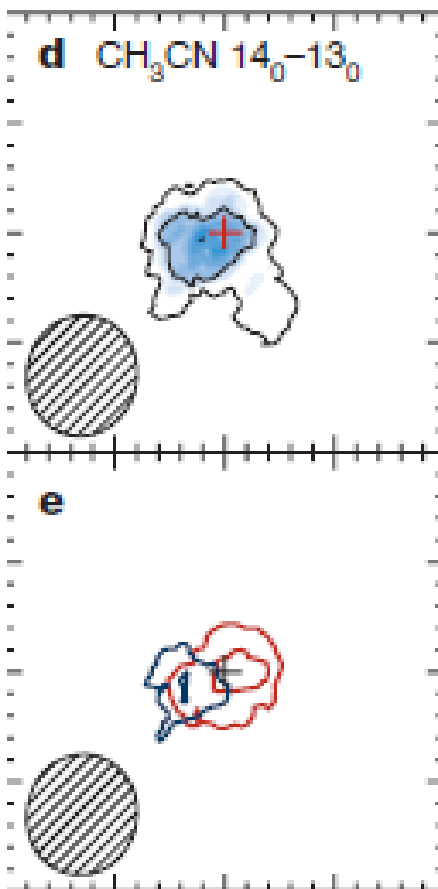
円盤赤道面付近では、塵表面反応が効率的におこり、  
複雑な有機分子が生成されている

(Walsh, Millar, HN et al. 2014)

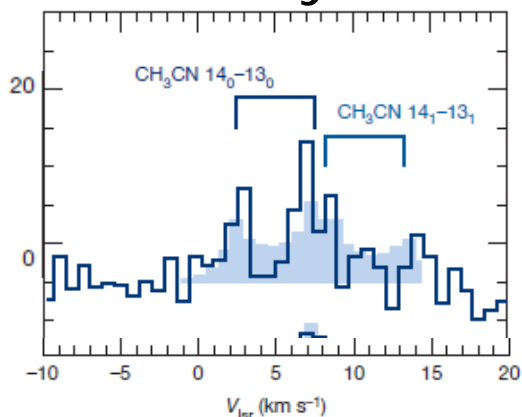
# 原始惑星系円盤からの有機分子の検出

$\text{HC}_3\text{N}$  @ 91-146GHz, IRAM  
(Chapillon et al. 2012)

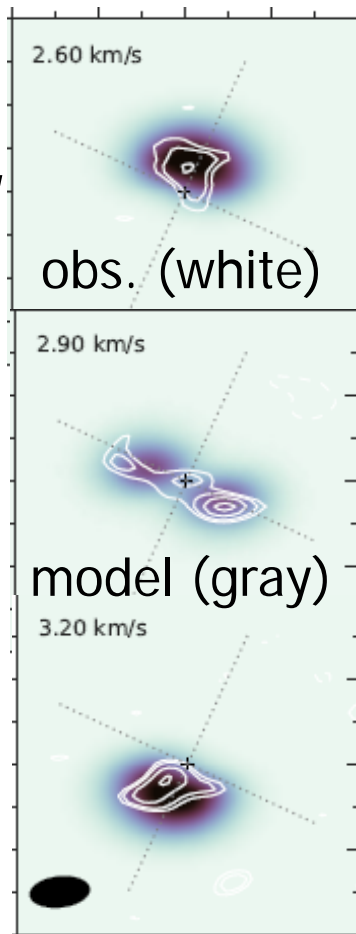
$\text{c-C}_3\text{H}_2$  @ 218GHz, ALMA SV  
(Qi et al. 2013b)



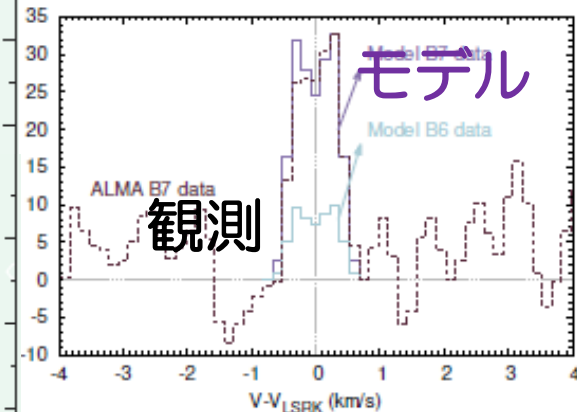
$\text{CH}_3\text{CN}$   
14<sub>0</sub>-13<sub>0</sub>, 14<sub>1</sub>-13<sub>1</sub>,  
@ 257GHz,  
MWC480,  
ALMA cycle 2



(Oberger et al. 2015)



$\text{CH}_3\text{OH}$  @  
304, 305, 307GHz  
(stacking)  
TW Hya,  
ALMA cycle 2



(Walsh et al. 2016)

輝線放射領域: 30-100AU for  $\text{CH}_3\text{CN}$ , 30-60AU for  $\text{CH}_3\text{OH}$

$\text{CH}_3\text{CN}/\text{HCN} \sim 5\text{-}20\%$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}/\text{H}_2\text{O} \sim 0.7\text{-}5\% \Leftrightarrow$  彗星

\* 気相の存在量  $\neq$  氷中の存在量

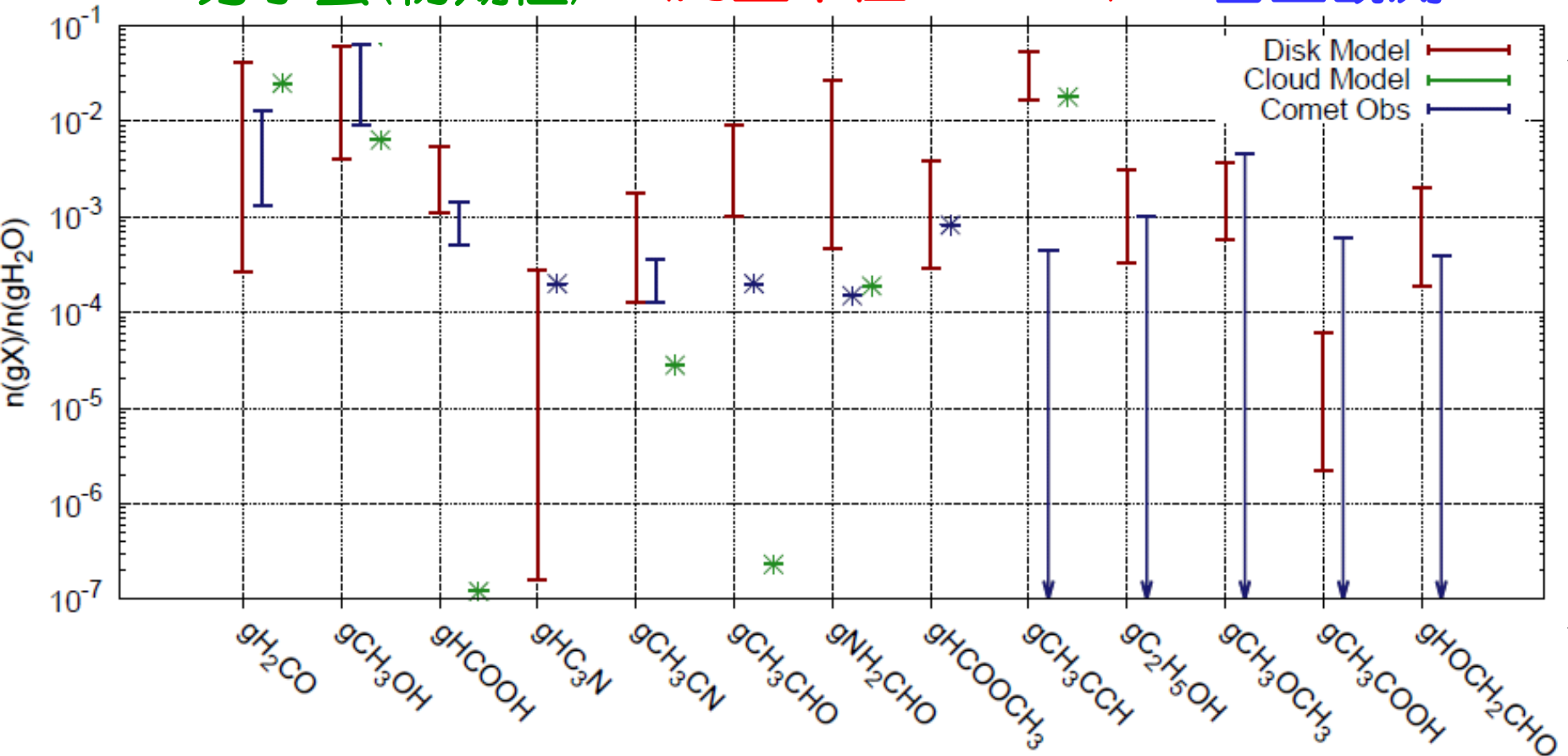
# 彗星で観測された分子存在量との比較

モデル(固相)

分子雲(初期値)

(円盤半径 > 20AU)

彗星観測



(Walsh, Millar, HN et al. 2014)

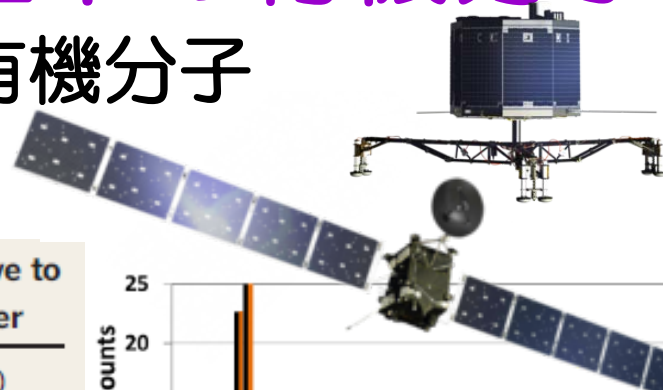
多くの複雑な分子種は分子雲→円盤で存在量増加

彗星からの分子輝線観測の結果は円盤モデルと良い一致

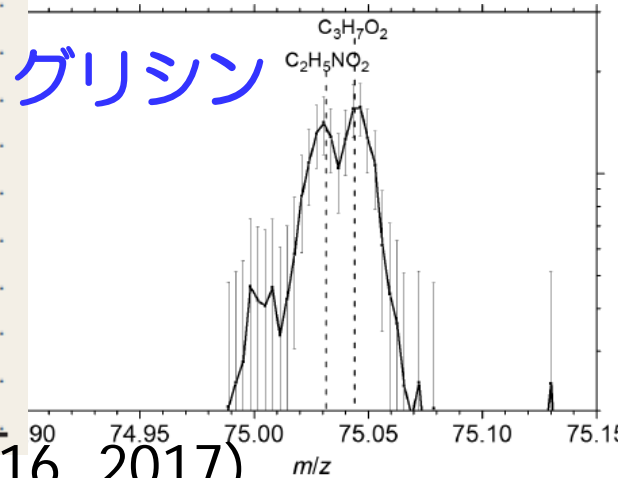
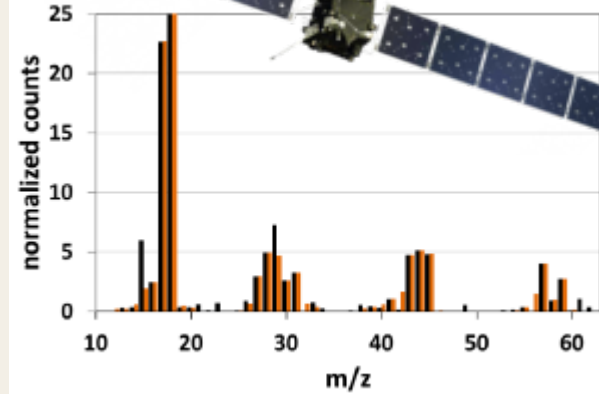
# ロゼッタミッション：彗星中の有機分子

67P/ Churyumov-Gerasimenko 中の有機分子

COSAC/Philae, ROSINA, Rosetta



Name	Formula	Molar mass (u)	Relative to water
Water	H <sub>2</sub> O	18	100
Methane	CH <sub>4</sub>	16	0.5
Methanenitrile (hydrogen cyanide)	HCN	27	0.9
Carbon monoxide	CO	28	1.2
Methylamine	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	31	0.6
Ethanenitrile (acetonitrile)	CH <sub>3</sub> CN	41	0.3
Isocyanic acid	HNCO	43	0.3
Ethanal (acetaldehyde)	CH <sub>3</sub> CHO	44	0.5
Methanamide (formamide)	HCONH <sub>2</sub>	45	1.8
Ethylamine	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub>	45	0.3
Isocyanomethane (methyl isocyanate)	CH <sub>3</sub> NCO	57	1.3
Propanone (acetone)	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	58	0.3
Propanal (propionaldehyde)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> CHO	58	0.1
Ethanamide (acetamide)	CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub>	59	0.7
2-Hydroxyethanal (glycolaldehyde)	CH <sub>2</sub> OHCHO	60	0.4
1,2-Ethanediol (ethylene glycol)	CH <sub>2</sub> (OH)CH <sub>2</sub> (OH)	62	0.2



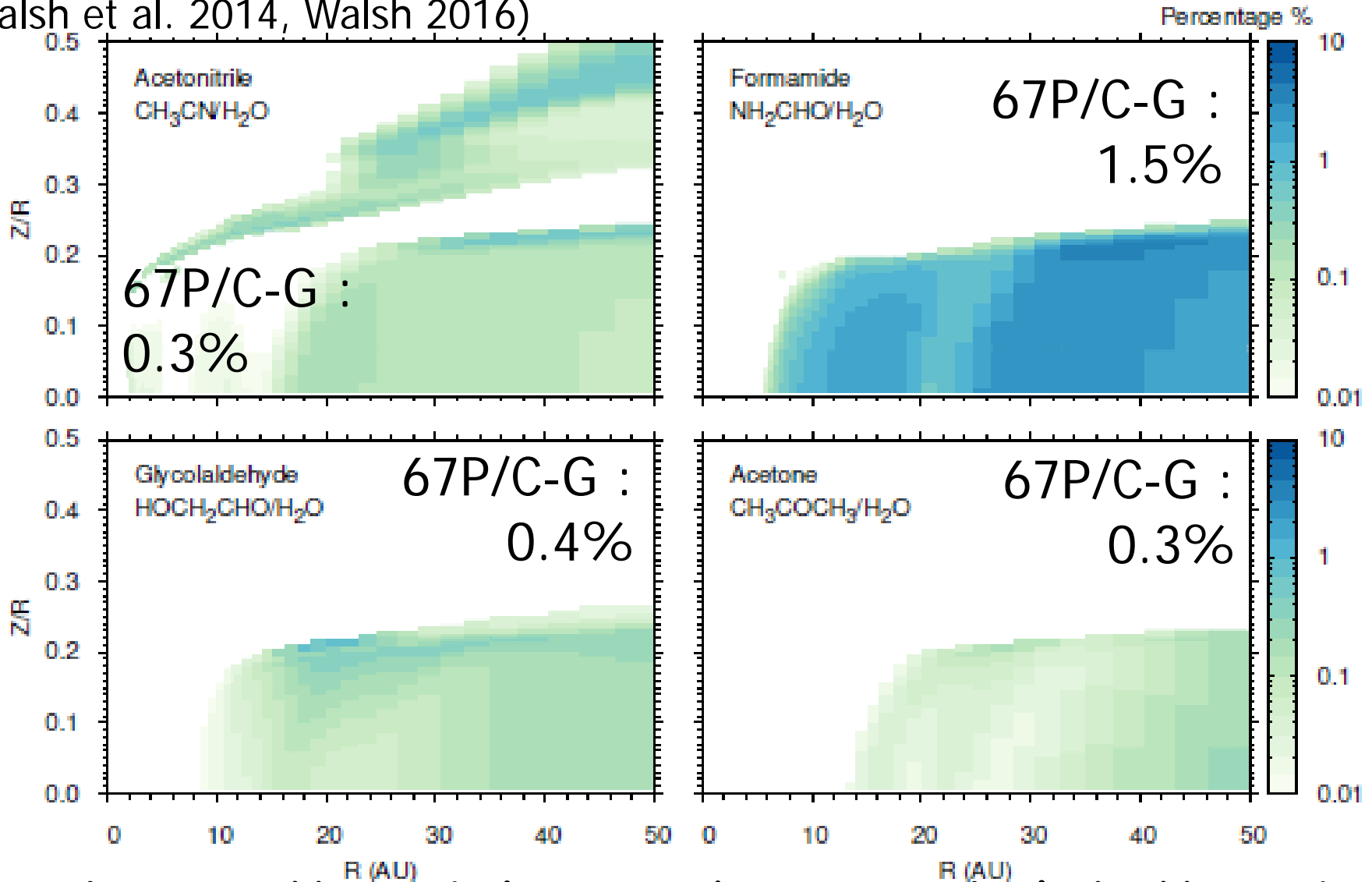
(Geosmann+ 2015, Altwegg+ 2016, 2017)

グリシン他、多数の有機分子を質量分析器で検出



# 67P/C-G 彗星で見つかった有機分子の分布

(Walsh et al. 2014, Walsh 2016)



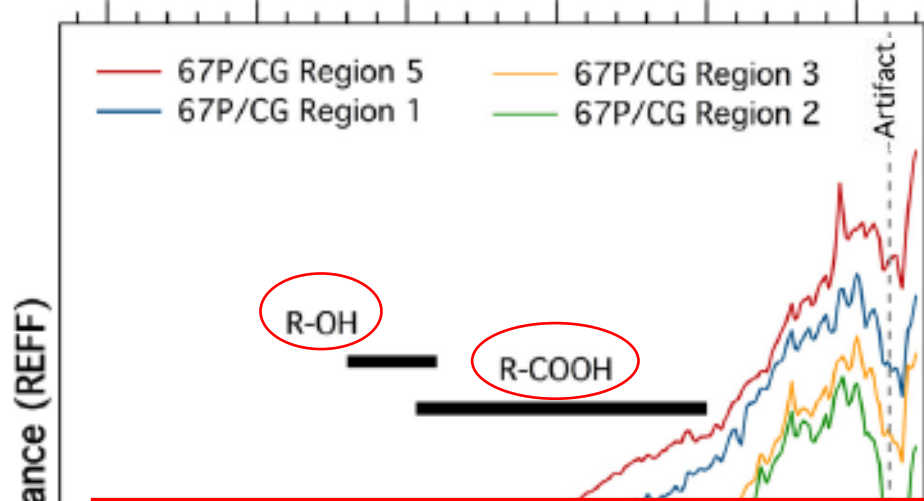
これらの分子は良い一致、より大きな分子はより多くの反応を考える必要がある

# □ゼッタミッション：彗星中の有機分子

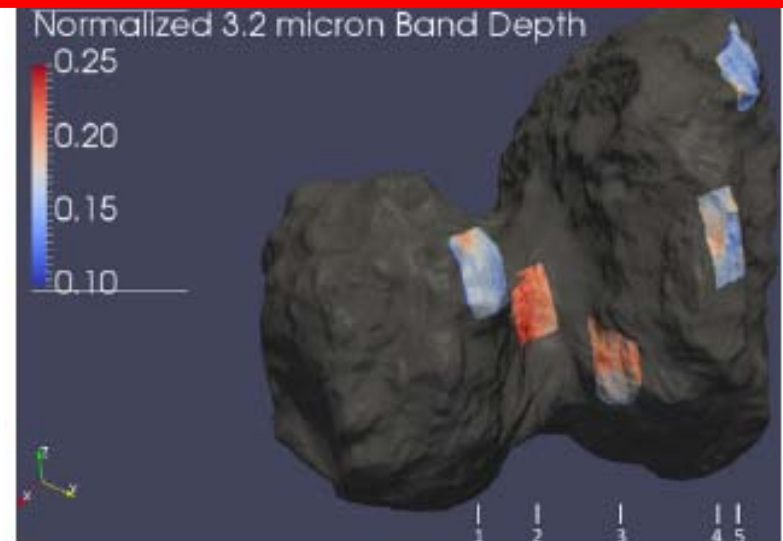
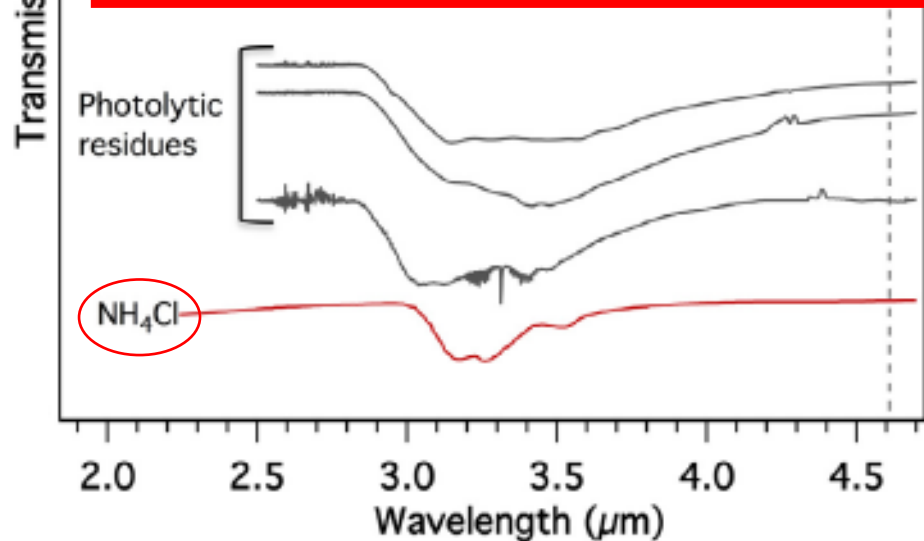


VIRTIS/Rosetta

67P/C-Gの近赤外線分光観測→3.2 $\mu\text{m}$ 帯の吸収をカルボキシル基を持つ



彗星構成物質の生成に氷マントル反応が寄与している可能性を示唆



より複雑な  
有機分子生成に向けて

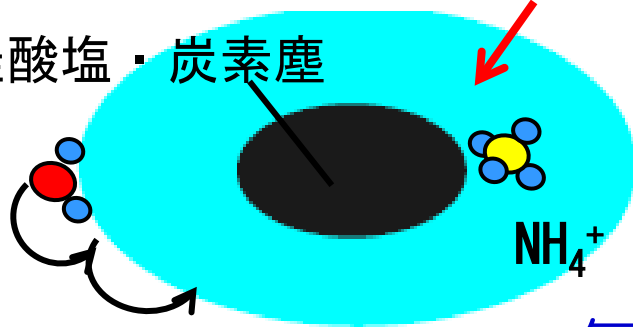
# 氷マントル反応

熱的過程

## 三相モデル

氷マントル

珪酸塩・炭素塵

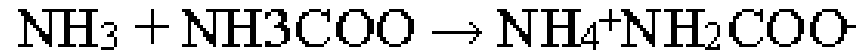
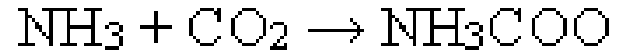


NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

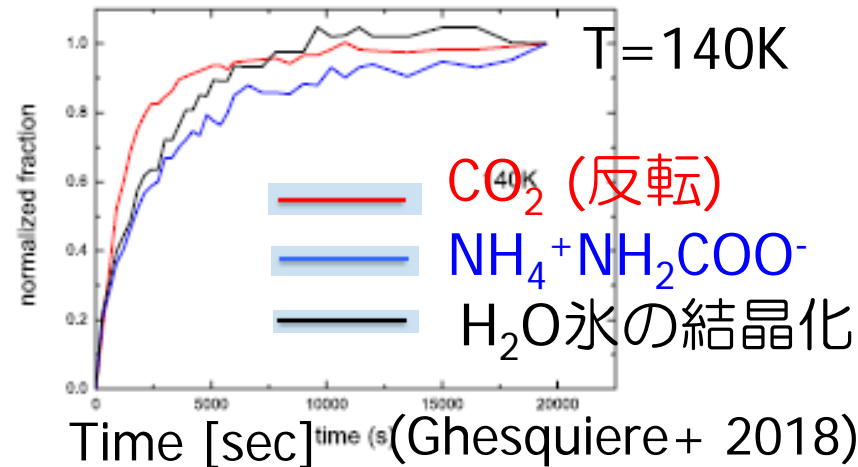
気相

分子の熱拡散  
→ 塵表面反応

(Hasegawa & Herbst 1993)

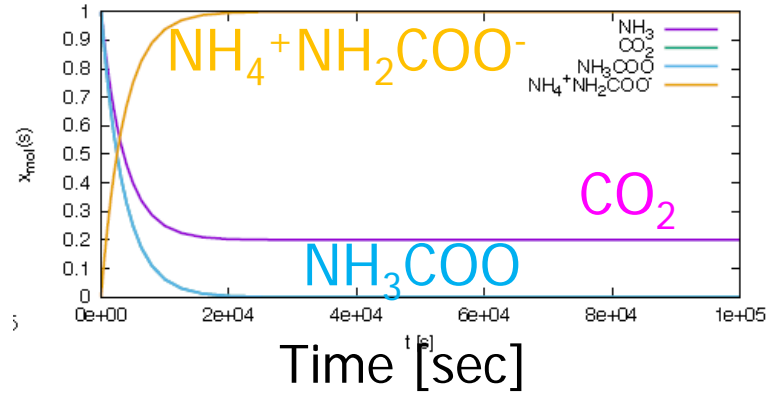


## 反応率測定実験



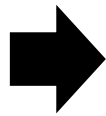
## モデル計算 by C.-E. Wei

T=140K, n=10<sup>6</sup>cm<sup>-3</sup>, NH<sub>3</sub>:CO<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O=5:2:100, w 1 order abund., normalized



## 氷マントル反応率を 氷の結晶化率で説明

アモル  
ファス

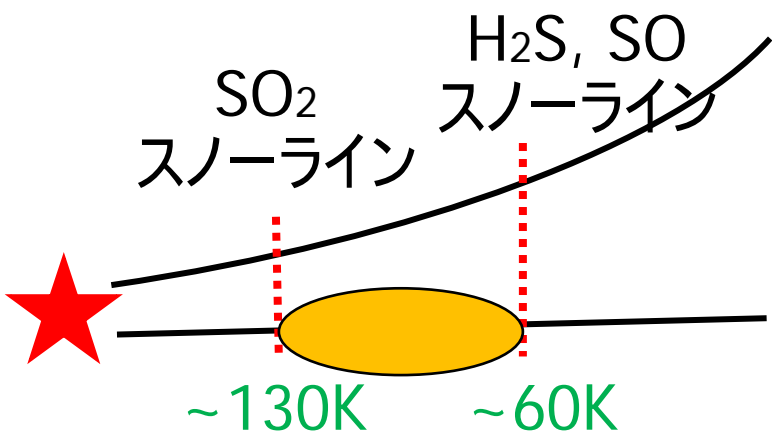
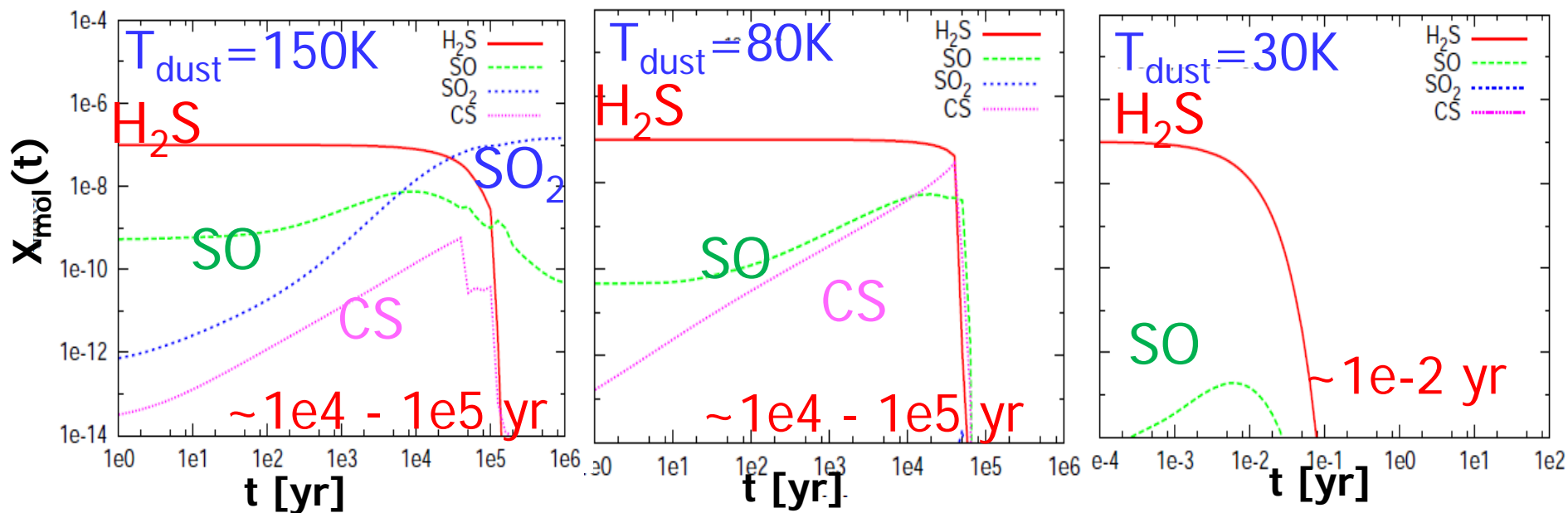


結晶氷

## H<sub>2</sub>Oスノーライン 付近での氷化学

# スノーライン付近の気相反応(硫黄分子)

$n = 1e12 \text{cm}^{-3}$

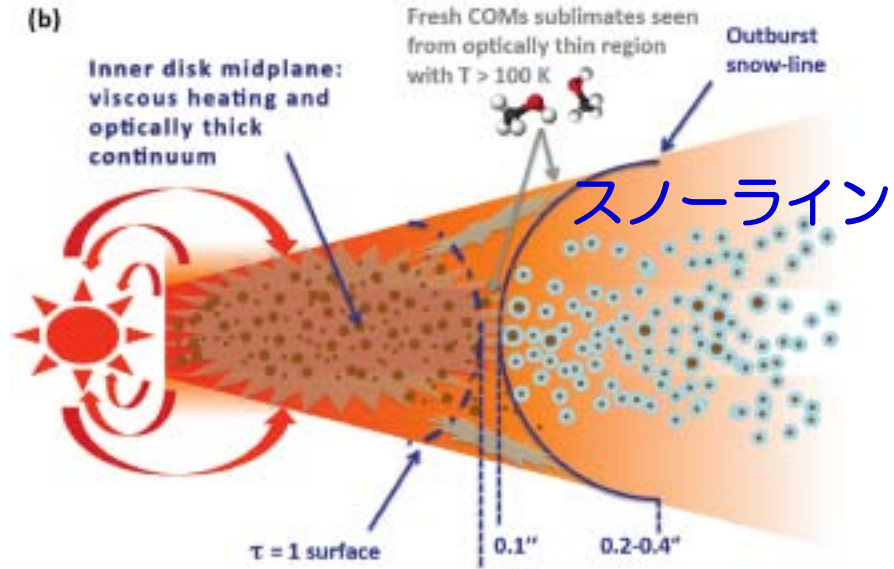
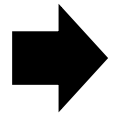
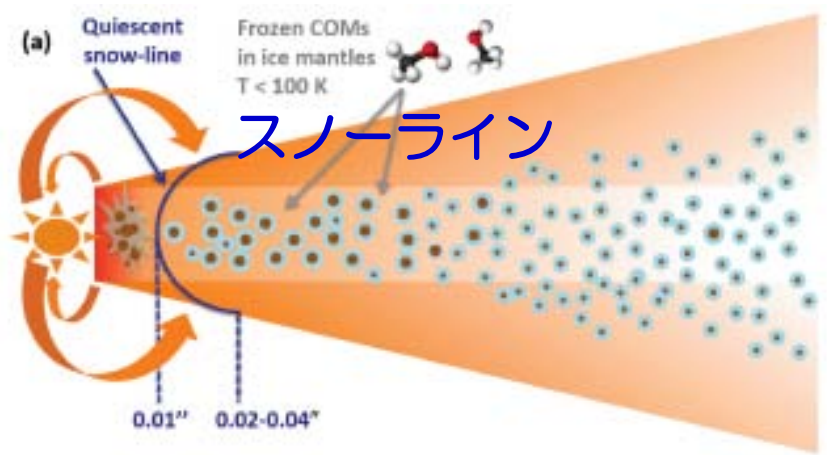


蒸発分子が化学反応により  
失われる時間尺度  $\sim 10^{4-5} \text{yr}$   
ダストへの凍結時間  
 $\sim 10^9 / (n[\text{cm}^{-3}]) \text{yr}$

(cf. Nomura & Millar 2004, Nomura+ 2009)

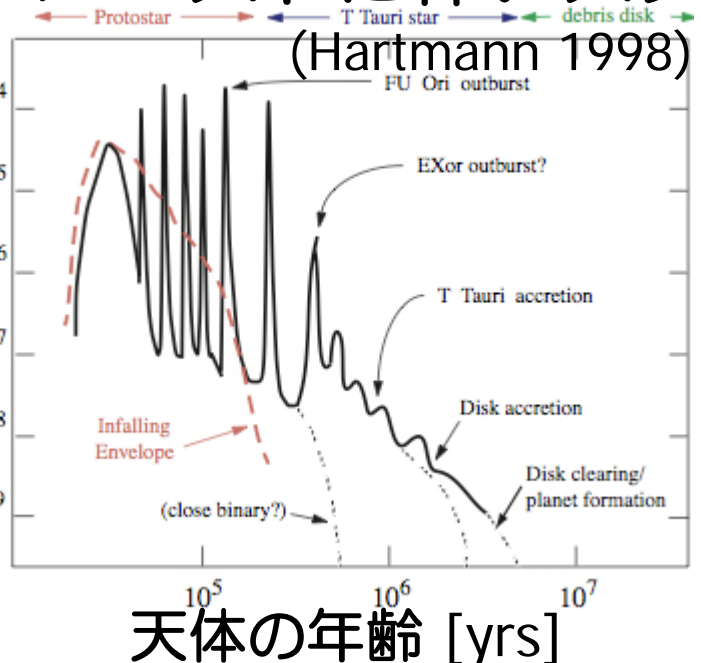
# 氷化学に関連する物理過程：FU Ori 現象

(J.-E. Lee et al. 2019)



バーストに伴いスノーラインが円盤外側に移動

質量降着率 [Ms/yr]

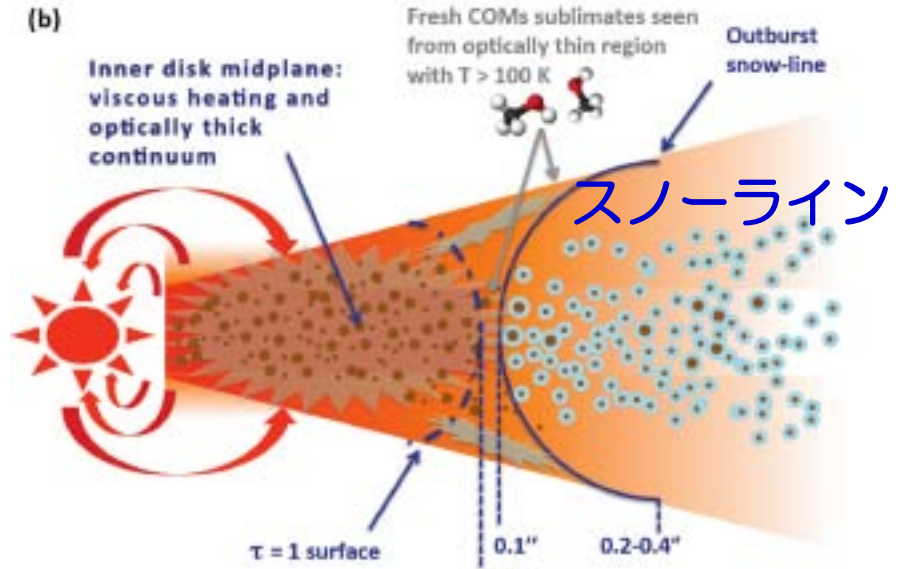
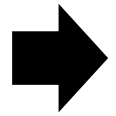
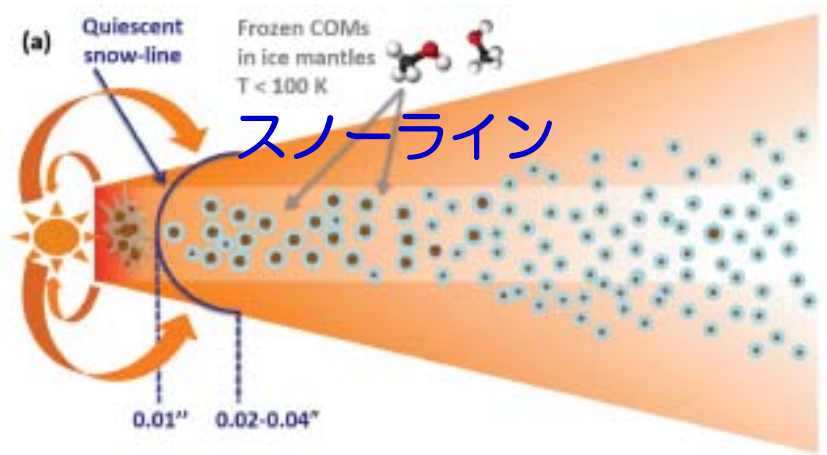


原始星天体 (~0.1 Myr) は  
繰り返してバーストを起こす  
→ 分子の蒸発・気相反応・凍結・氷反応が繰り返し起こる  
→ より複雑な分子生成へ



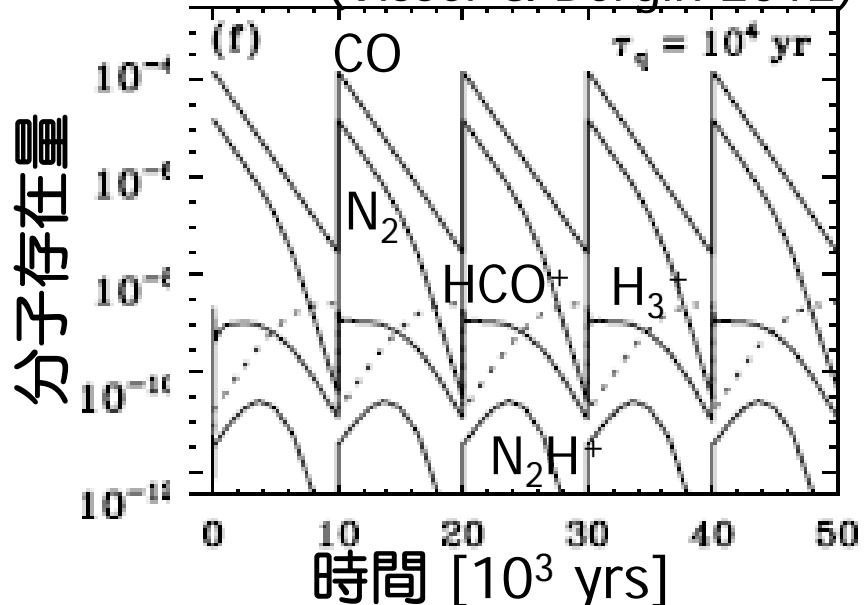
# 氷化学に関連する物理過程：FU Ori 現象

(J.-E. Lee et al. 2019)



バーストに伴いスノーラインが円盤外側に移動

(Visser & Bergin 2012)



原始星天体 (~0.1 Myr) は  
繰り返しばーストを起こす  
→ 分子の蒸発・気相反応・凍結・氷反応が繰り返し起こる  
→ より複雑な分子生成へ

# まとめ

原始惑星系円盤中の複雑な有機分子生成

円盤中の複雑な有機分子  $\leftrightarrow$  星間塵での反応

$\rightarrow$  ALMAによる円盤内の塵表面反応の検証

ロゼッタの有機分子量の観測値ともよい一致

氷マントル反応によるより複雑な有機分子生成

:  $\text{H}_2\text{O}$ 氷の結晶化による促進を示唆

円盤内縁の熱的進化に伴う化学反応

気相反応・氷反応による複雑な有機分子生成

$\rightarrow$  ロゼッタ・はやぶさ2による彗星・小惑星の  
有機分子観測と比較