

第31回理論懇シンポジウム

「宇宙物理の標準理論：未来へ向けての再考」

Dec. 19-21, 2018 @京大基研

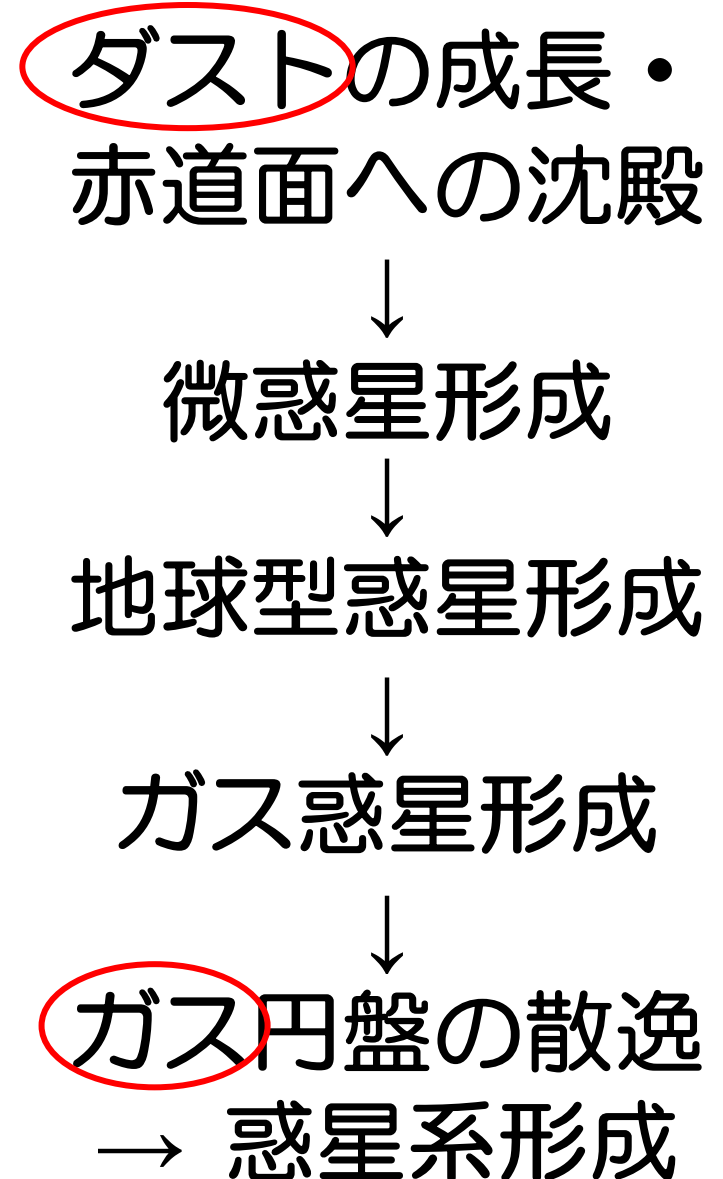
原始惑星系円盤から 惑星系へ

：物理・化学素過程の
観測的検証法

野村 英子 (東工大地惑)

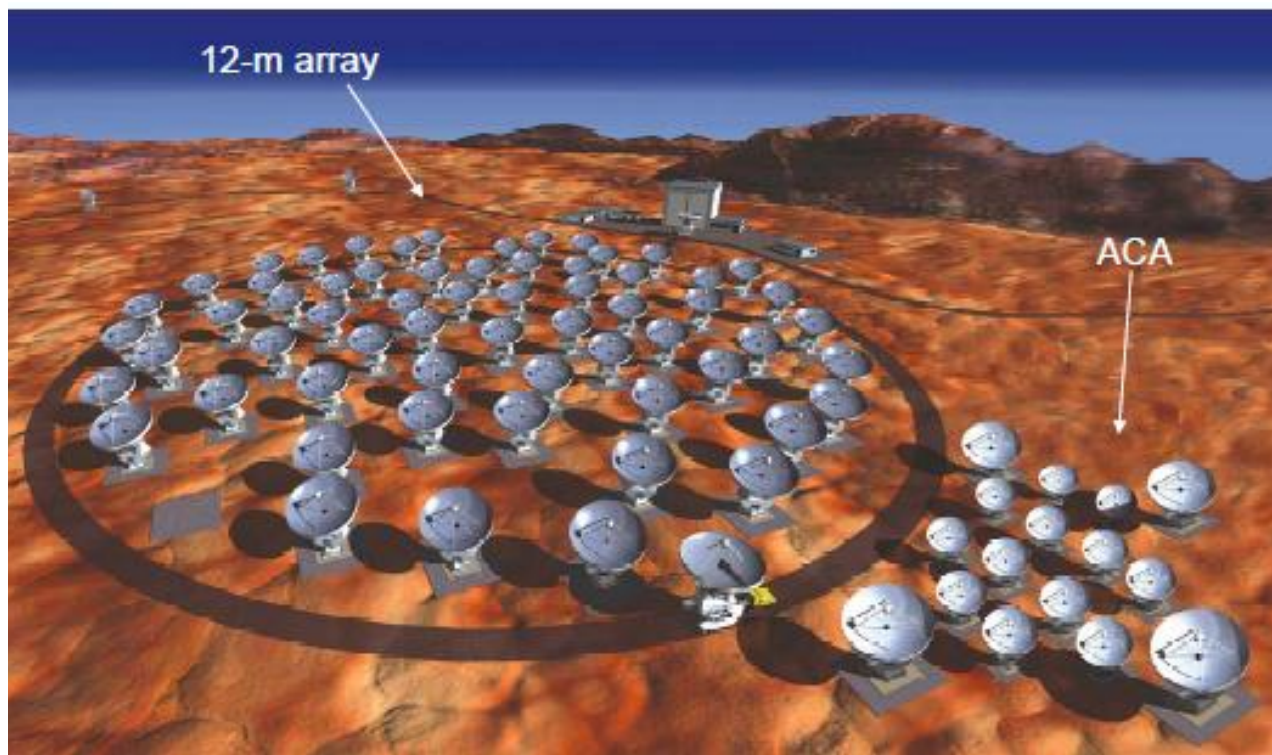
原始惑星系円盤から惑星系へ

(e.g., Hayashi et al. 1985)



ALMA(アタカマ大型電波干渉計)！

- ・日米欧共同プロジェクト
- ・南米チリアタカマ砂漠に建設中
- ・2011年部分運用開始
(2016年本格運用開始)
- ・54台の12mアンテナ＋12台の7mアンテナ(ACA)
→ 高感度・高空間分解能のミリ波・サブミリ波観測
- ・太陽系内天体から宇宙論まで
- ・星・惑星系形成過程の解明！

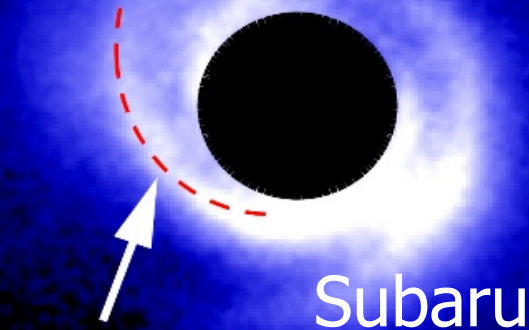


原始惑星系円盤ダスト・ガスの観測

0.5秒角=70天文単位

SAO206462

(Muto+ 2012)



Subaru

密度波理論による波形

TW Hya



(Tsukagoshi+ 2016)

HD142527



(Fukagawa+ 2013)

(Oberg et al. 2015)

IM Lup

DCO⁺ 3-2

(ALMA partnership+ 2015)

HL Tau

(Qi et al. 2013)

N₂H⁺ 4-3

TW Hya

原始惑星系円盤のガス・ダスト観測により
円盤内の物理・化学素過程の検証が
可能になった

原始惑星系円盤の物理的・化学的進化

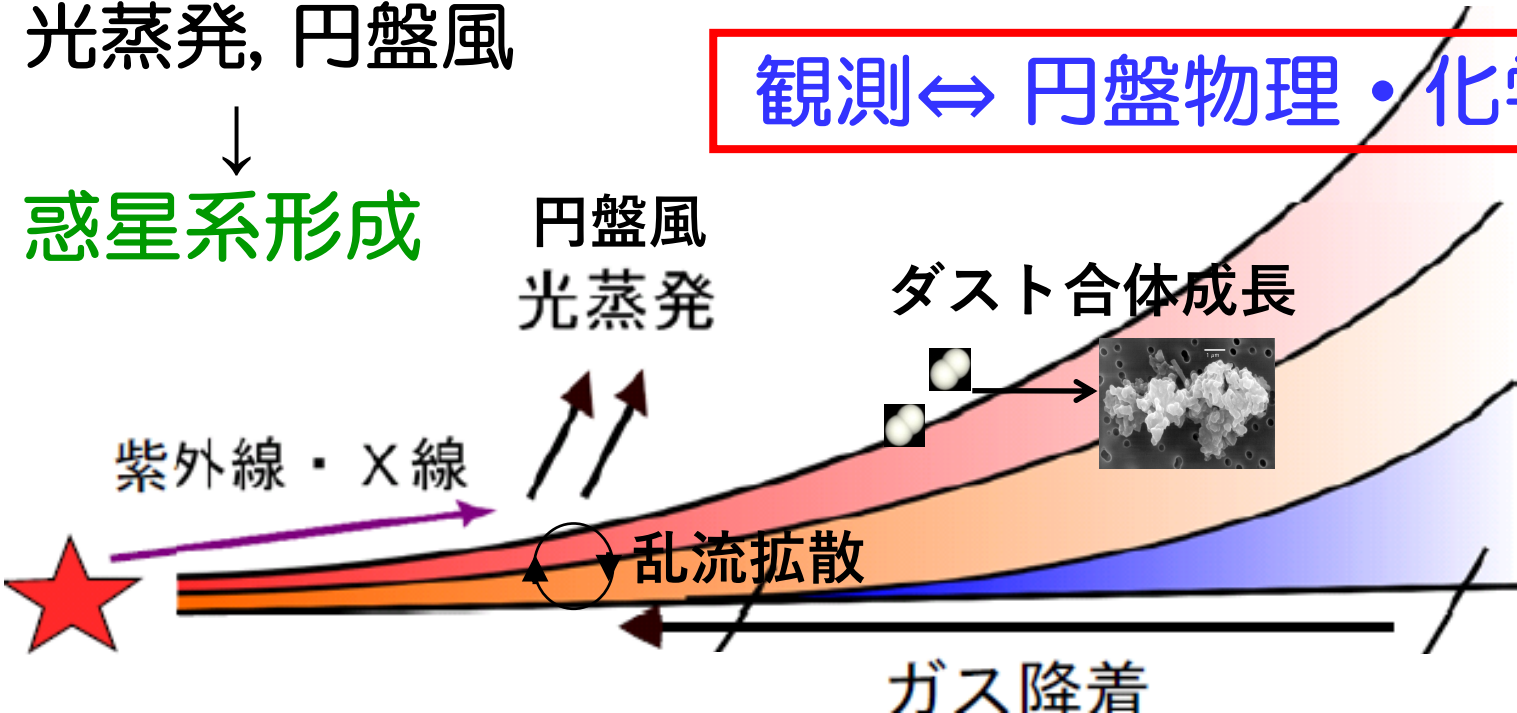
物理素過程

- **ダスト進化**
合体成長, 沈殿,
半径方向の運動
- **ガス散逸**
 - 中心星への質量降着
 - 光蒸発, 円盤風

- ## 化学進化
- ↓
- 太陽系内外物質起源
 - 生命起源物質
(大型有機分子生成)
との関連

観測 ↔ 円盤物理・化学構造

惑星系形成

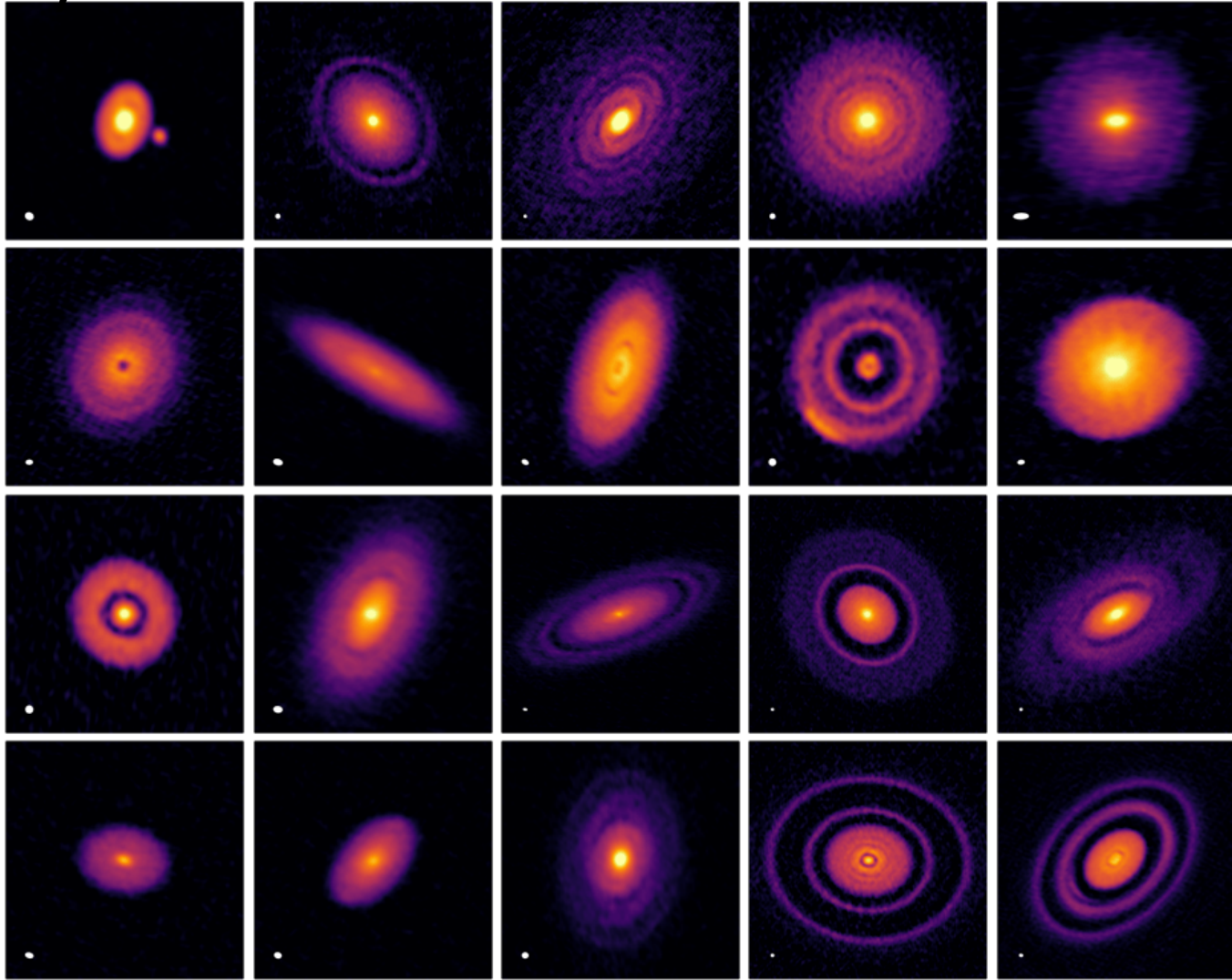


原始惑星系円盤内の ダスト進化

円盤ダストの高空間分解能ALMA観測

ALMA LP, DSHARP

(Andrews et al. 2018, in press)

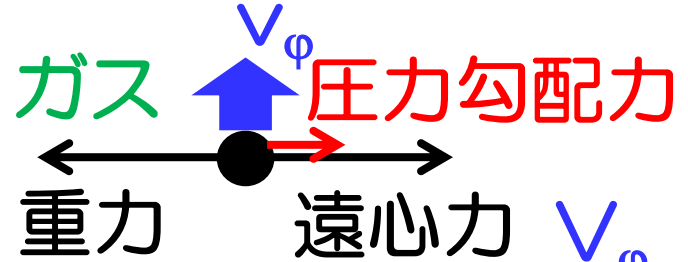


20天体中19天体で「構造」が検出された
円盤構造はなめらかではない！構造の起源？

<https://almascience.nao.ac.jp/almadata/lp/dsharp/>

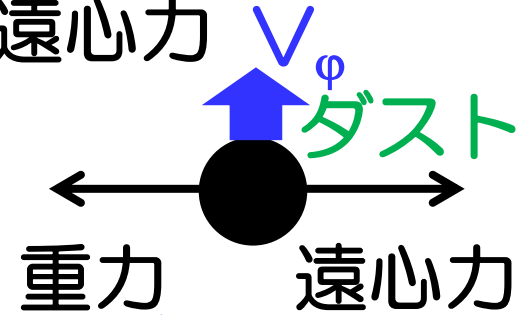
円盤内のダストの運動

ダスト：ケプラー回転
ガス：サブケプラー回転



(圧力勾配力の向きにより、)
ガス・ダスト摩擦力の影響で
ダストが中心星に落下
(/円盤外縁方向に移動)する。

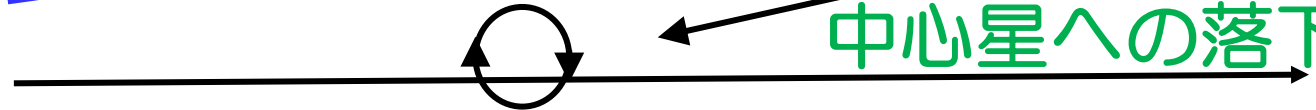
= **ダスト落下問題**



合体成長
・沈殿

乱流

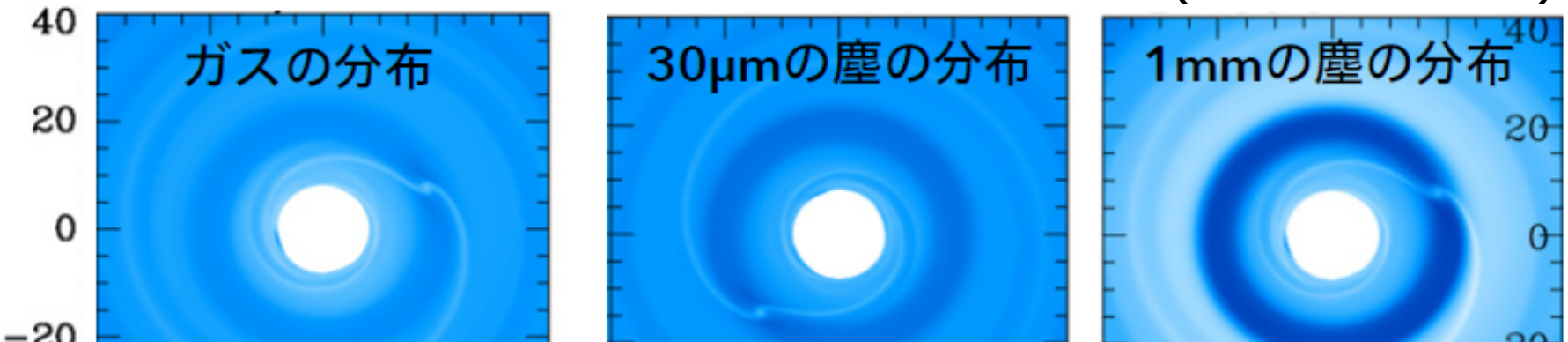
中心星への落下



円盤内のダストの運動

惑星によりガスギャップができると、
ダストはガスギャップの両側に移動
移動の度合いはダストのサイズに依存

(Zhu et al. 2012)



ギャップ付近のダストの大きさを測れば、
ダストの移動を観測的に検証できる？

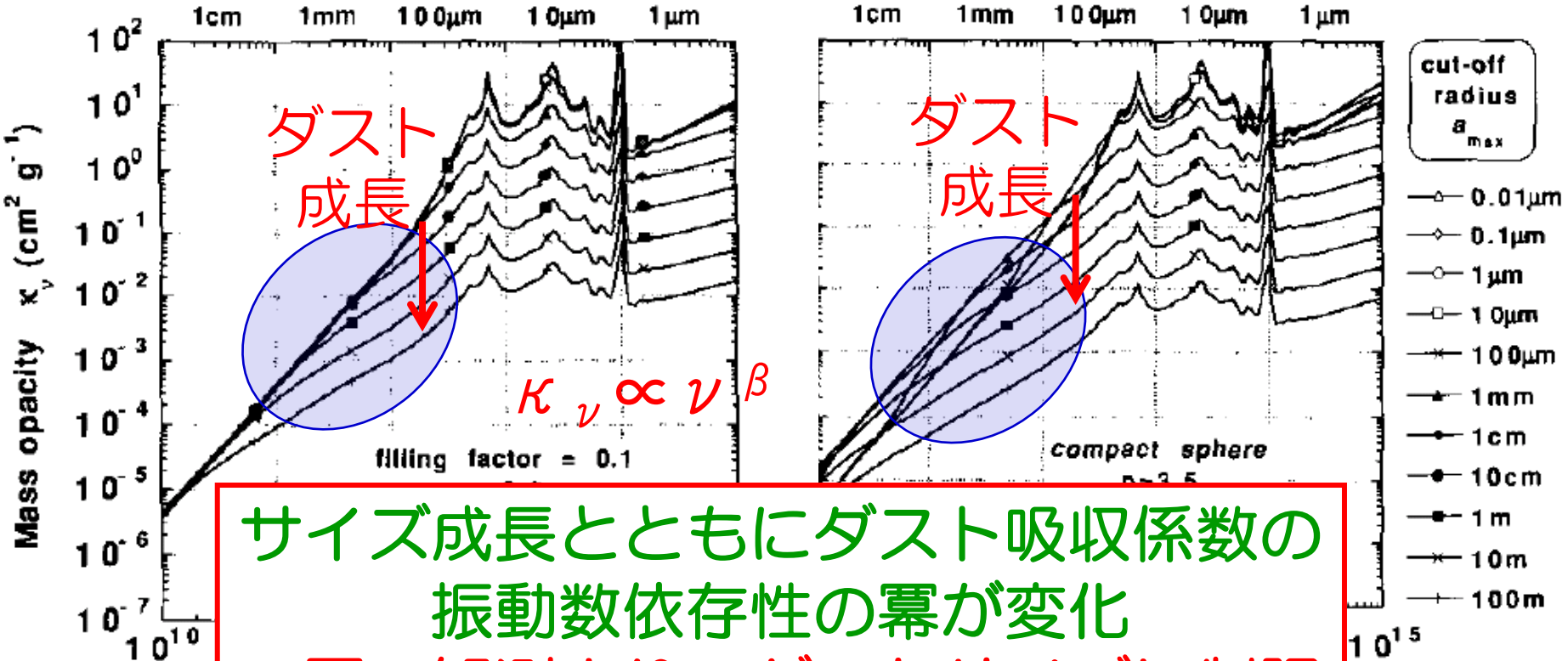
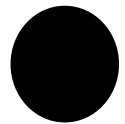
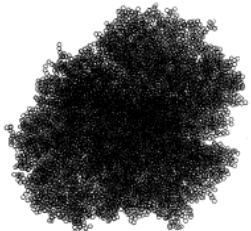
円盤内ダスト成長の観測量への影響

ダスト吸収係数への影響

サイズ分布 $dn/da \propto a^{-3.5}$

空隙ダスト
Wavelength

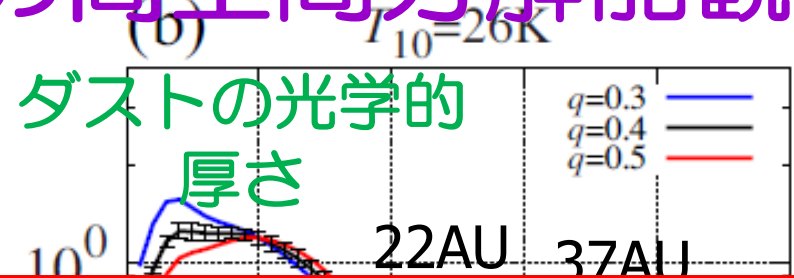
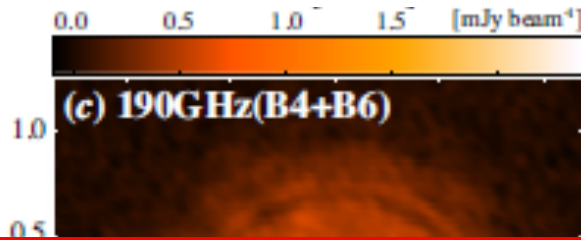
コンパクトダスト
Wavelength



サイズ成長とともにダスト吸収係数の振動数依存性の冪が変化
 → 冪の観測より、ダストサイズに制限

Miyake & Nakagawa (1993)

TW Hya 円盤ダストの高空間分解能観測



原始惑星系円盤内のダスト運動の
観測的検証が可能になった

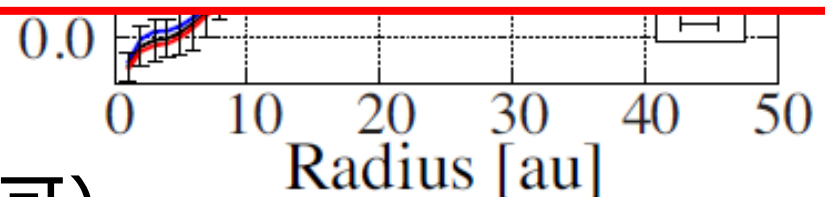
今後：なめらかではない面密度分布を持つ
円盤内での惑星形成・物質進化

- 「構造」はどの進化段階で形成された？
- 「構造」形成に惑星は必要？

→ガスキャッチの存在を示唆

→惑星起源を示唆

(海王星よりやや重い惑星で説明可)



(Tsukagoshi, HN et al. 2016)

原始惑星系円盤内の
複雑な有機分子生成
：太陽系内物質の起源

これまでに観測された星間分子の一部

CH+	HCN	H2CO	HC3N	CH3OH	HC5N	HCOOCH3	HC7N
CS	HNC	H2CS	HCOOH	CH3CN	CH3CCH	CH3C3N	HC9N
CO	HCO	H2CN	CH2NH	CH3NC	CH3NH2	CH3COOH	HC11N
CN	OCS	HNCO	CH2CO	CH3SH	CH3CHO	CH2CHCHO	C2H5CN
C2	CH2	HNCS	NH2CN	NH2CHO	CH2CHCN	CH2OHCHO	CH3C4H
						H2C6	CH3C5N
				H4O			CH3OCH3
				CHOH			C2H5OH
							CH3CONH2
							CH3COCH3
							OHCH2CH2OH
							C2H5OCHO
							C8H-
							NH2CH2COOH?

彗星サンプル中にアミノ酸
グリシンを発見

@ STARDUST (Elsila et al. 2009)

ROSETTA (Altwegg et al. 2016)

隕石中のアミノ酸

⇔ 星間分子との関連？

アミノ酸？

1970年
~10種



1980年
~50種



1995年
~100種



2018年
~210種

C3N-

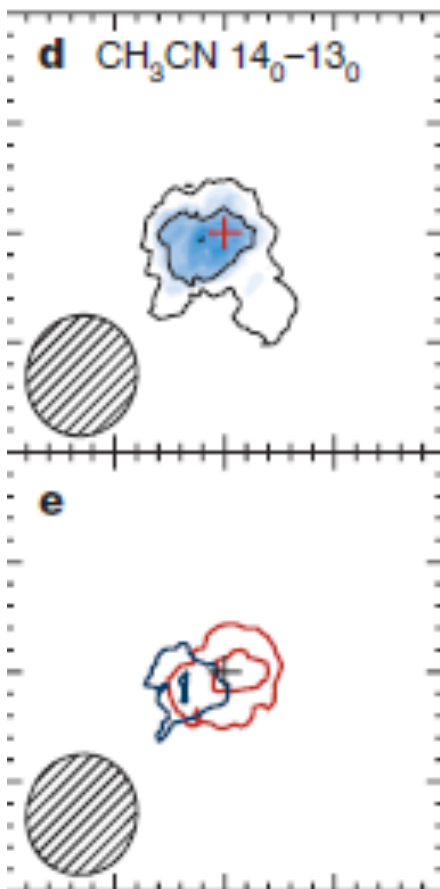
HCNH+

C4H-

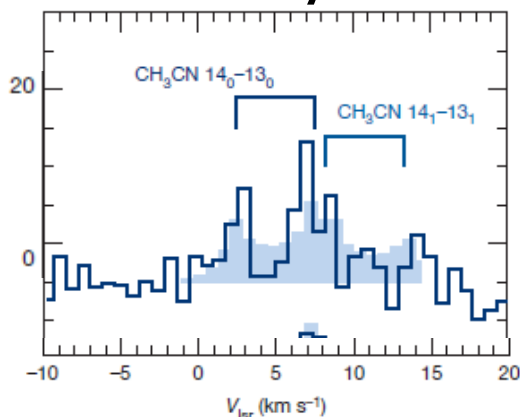
原始惑星系円盤からの有機分子の検出

HC_3N @ 91-146GHz, IRAM
(Chapillon et al. 2012)

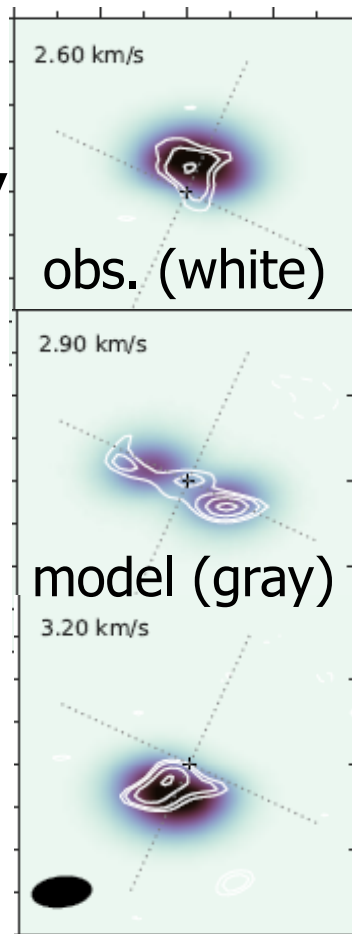
$c\text{-C}_3\text{H}_2$ @ 218GHz, ALMA SV
(Qi et al. 2013b)



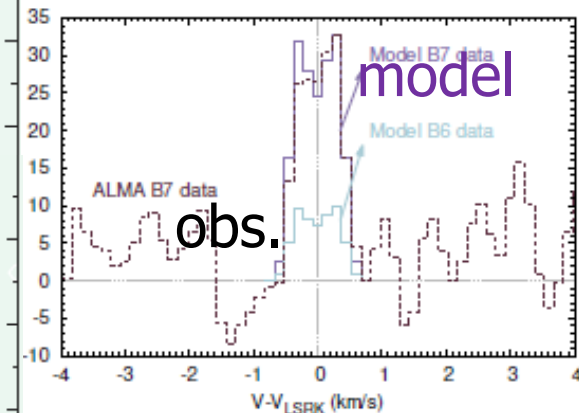
CH_3CN
14₀-13₀, 14₁-13₁,
@ 257GHz,
MWC480,
ALMA cycle 2



(Oberg et al. 2015)



CH_3OH @
304, 305, 307GHz
(stacking)
TW Hya,
ALMA cycle 2



(Walsh et al. 2016)

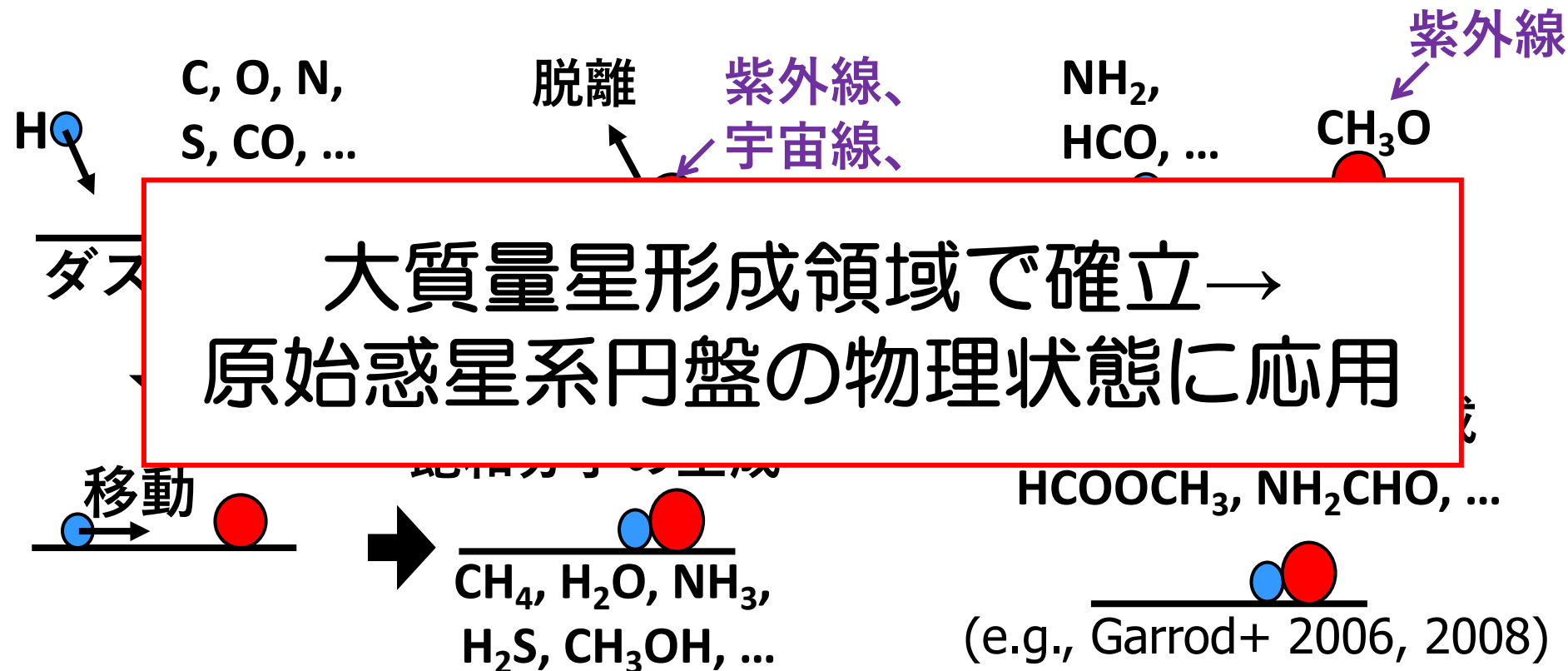
HCOOH @ 129GHz, TW Hya, ALMA cycle 3

(Favre et al. 2018)

ダスト表面反応による有機分子生成

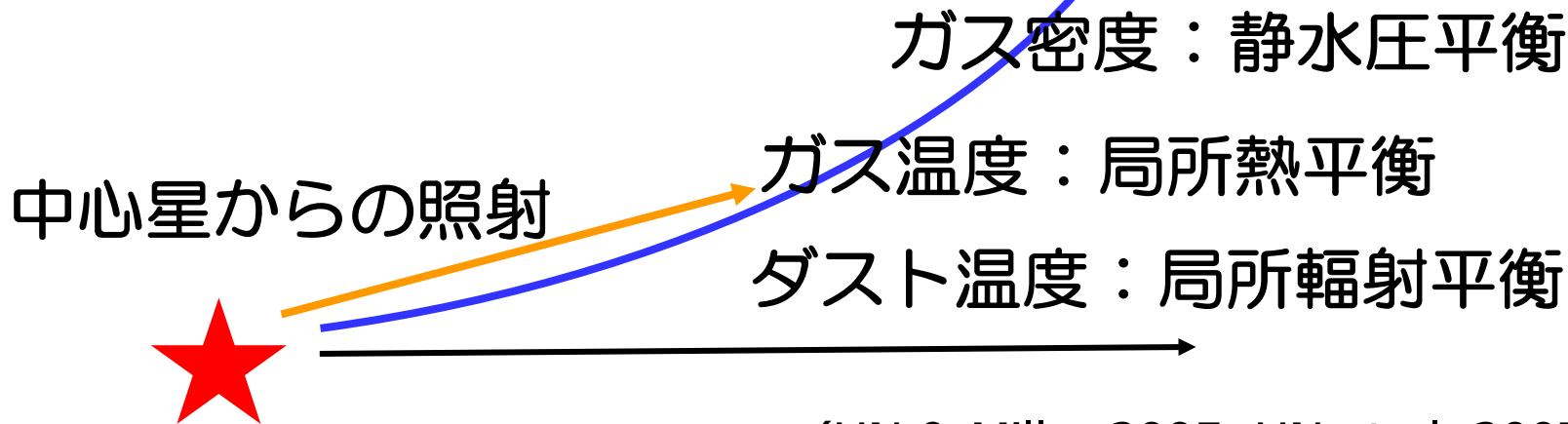
低温: < 20K

暖かい領域: 30-50K



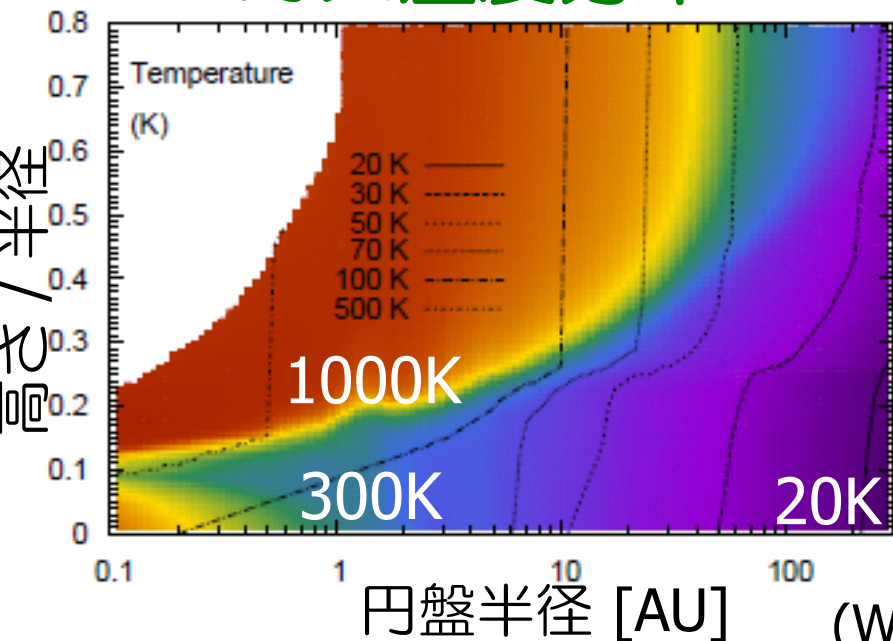
気相反応では生成されにくい分子種が生成される
暖かいダスト表面ではより複雑な分子種が生成

円盤の密度・温度構造モデル



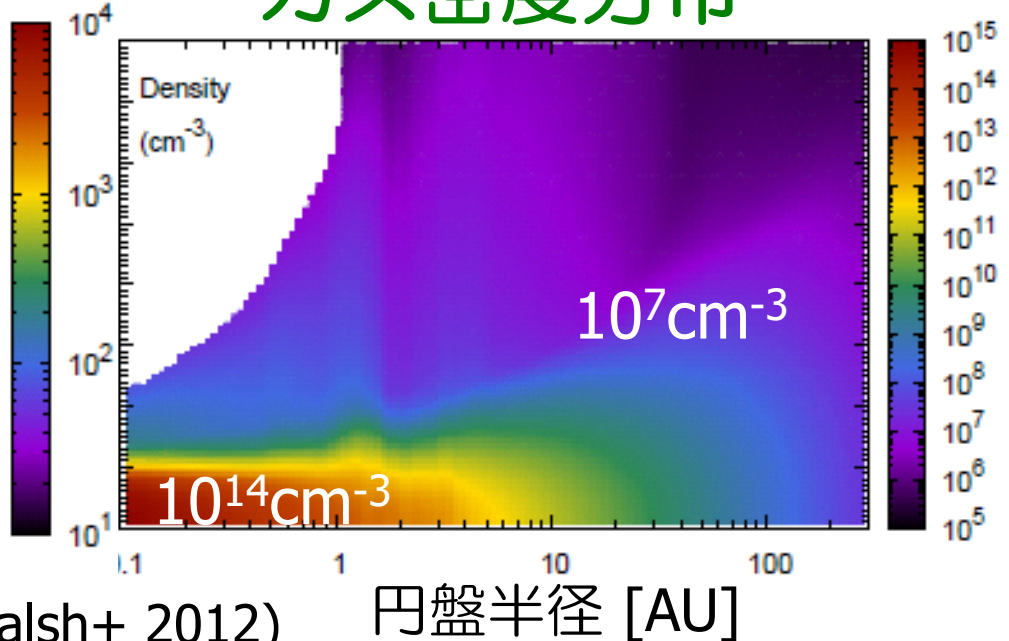
(HN & Millar 2005, HN et al. 2007)

ガス温度分布



(Walsh+ 2012)

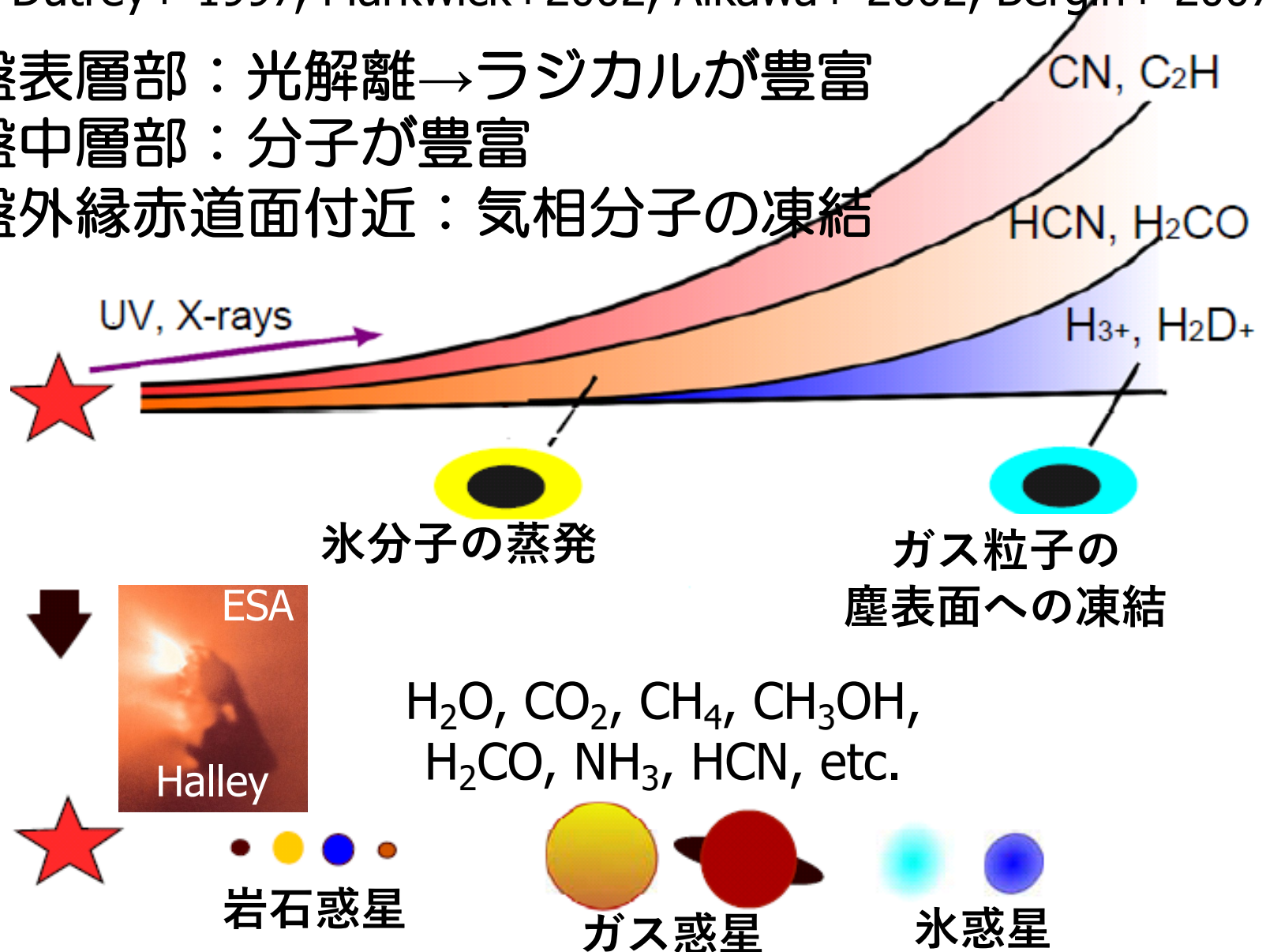
ガス密度分布



原始惑星系円盤の化学構造

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

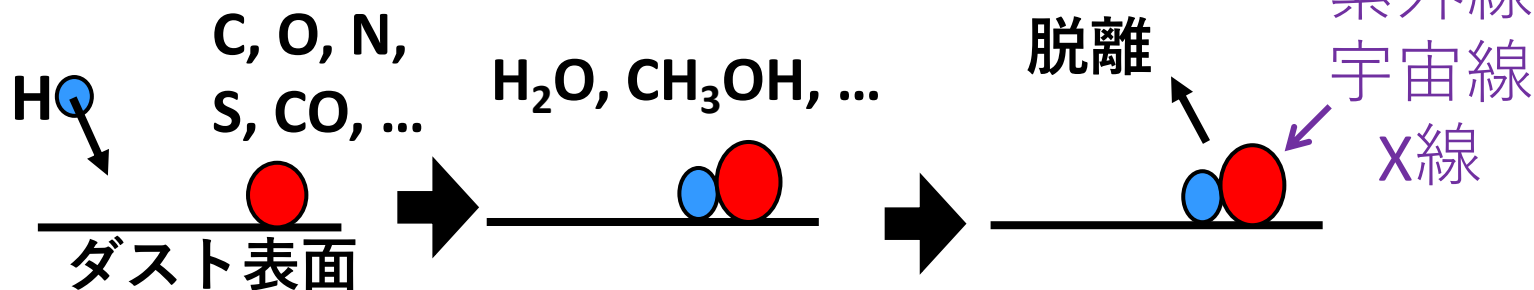
- 円盤表層部：光解離→ラジカルが豊富
- 円盤中層部：分子が豊富
- 円盤外縁赤道面付近：気相分子の凍結



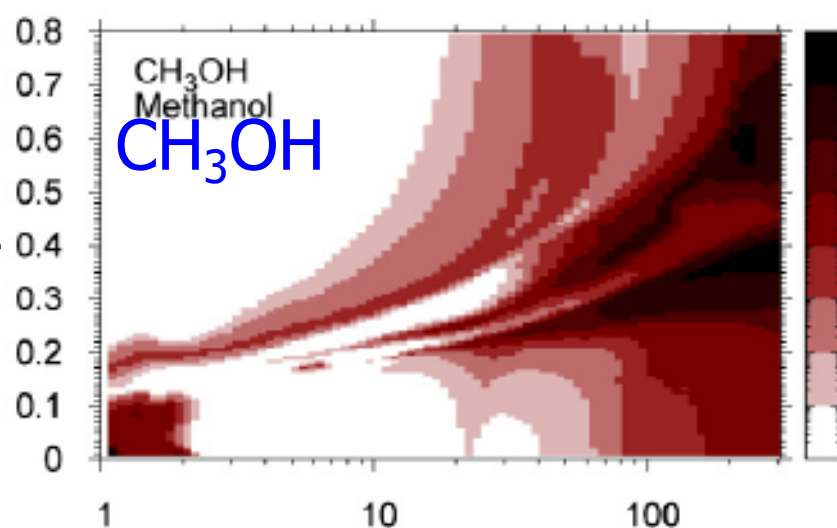
原始惑星系円盤中の有機分子生成

塵表面反応

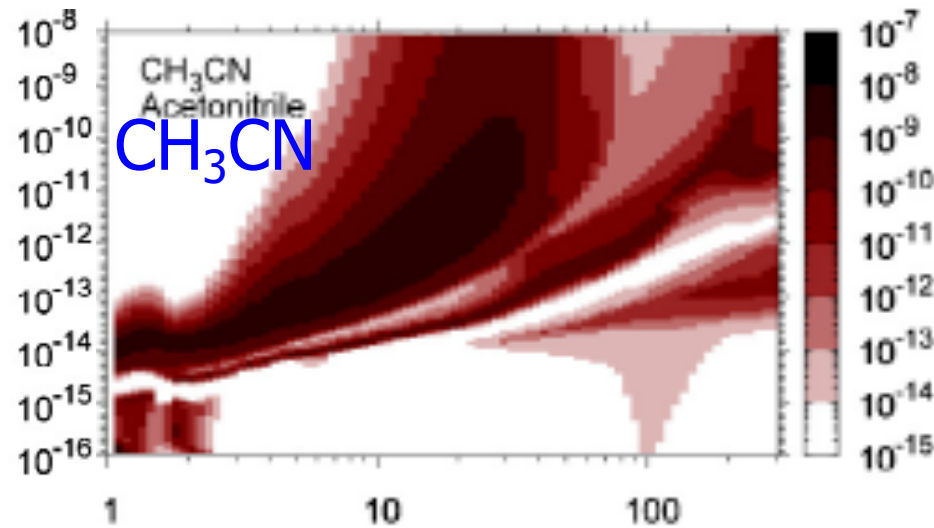
光脱離



半径 / 半徑



円盤半径 [AU]



円盤半径 [AU]

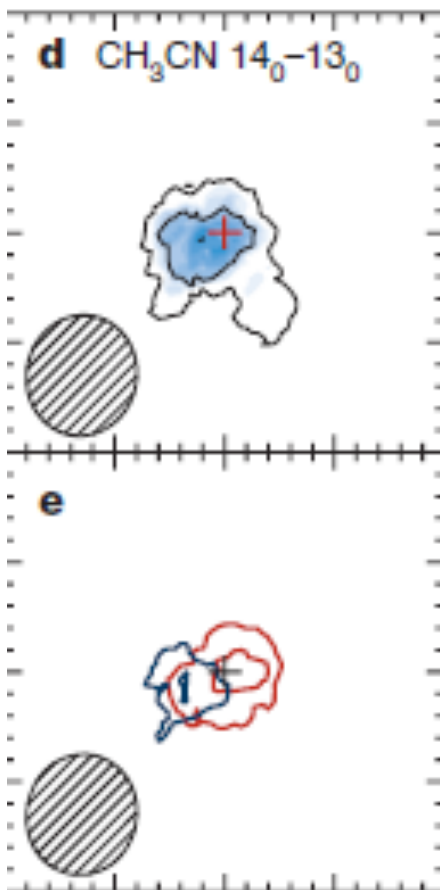
円盤赤道面付近で塵表面反応が効率的におこり、
複雑な有機分子が生成、非熱的脱離により気相へ

(Walsh, Millar, HN et al. 2014)

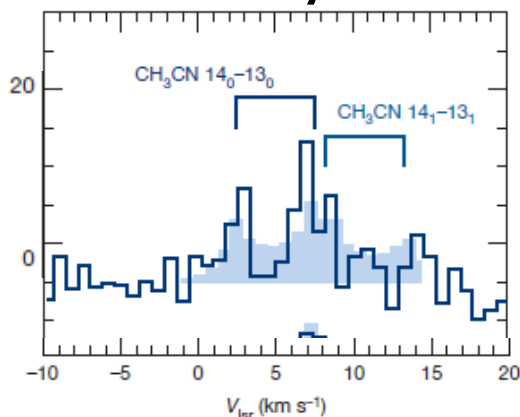
原始惑星系円盤からの有機分子の検出

HC_3N @ 91-146GHz, IRAM
(Chapillon et al. 2012)

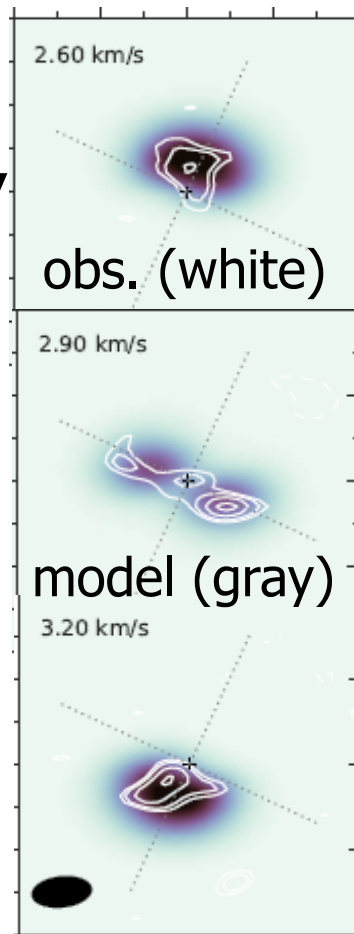
$c\text{-C}_3\text{H}_2$ @ 218GHz, ALMA SV
(Qi et al. 2013b)



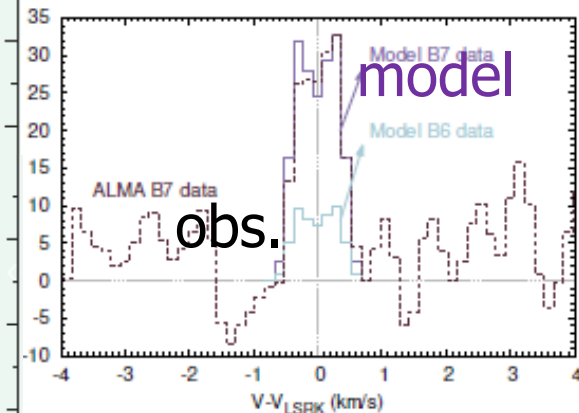
CH_3CN
14₀-13₀, 14₁-13₁,
@ 257GHz,
MWC480,
ALMA cycle 2



(Oberberg et al. 2015)



CH_3OH @
304, 305, 307GHz
(stacking)
TW Hya,
ALMA cycle 2



(Walsh et al. 2016)

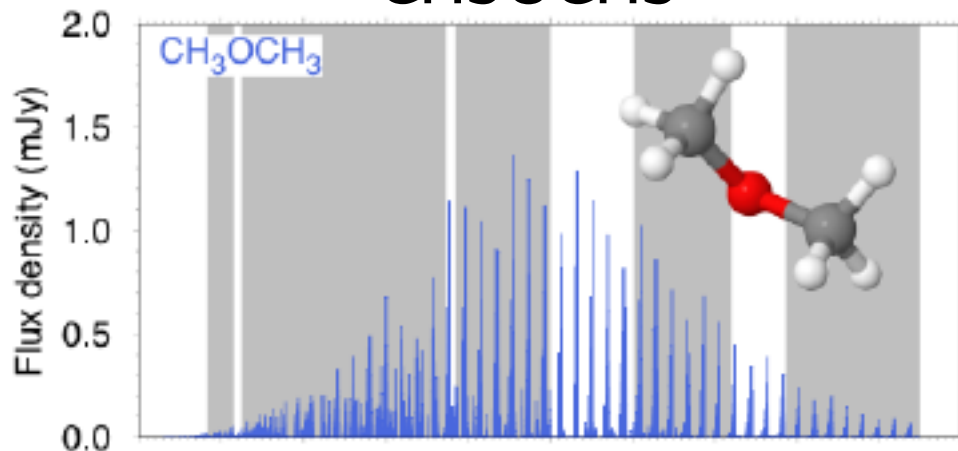
放射領域： 30-100AU for CH_3CN , 30-60AU for CH_3OH

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

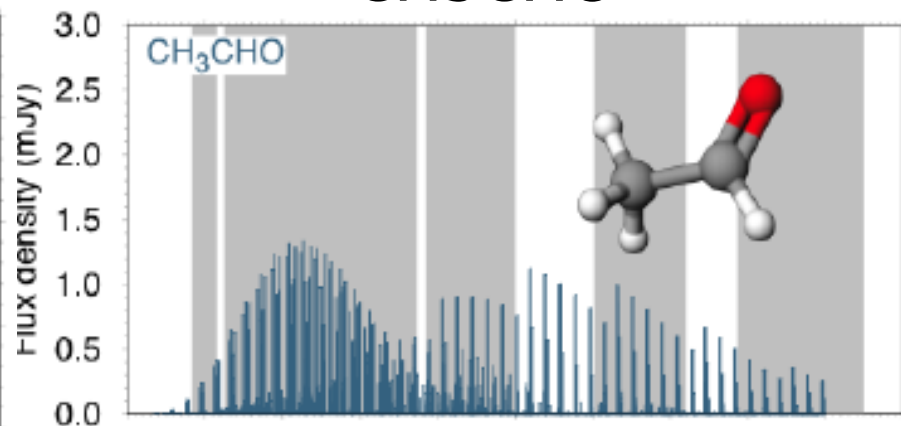
* gas-phase abundances \neq icy grain abundances

より複雑な有機分子の検出に向けて

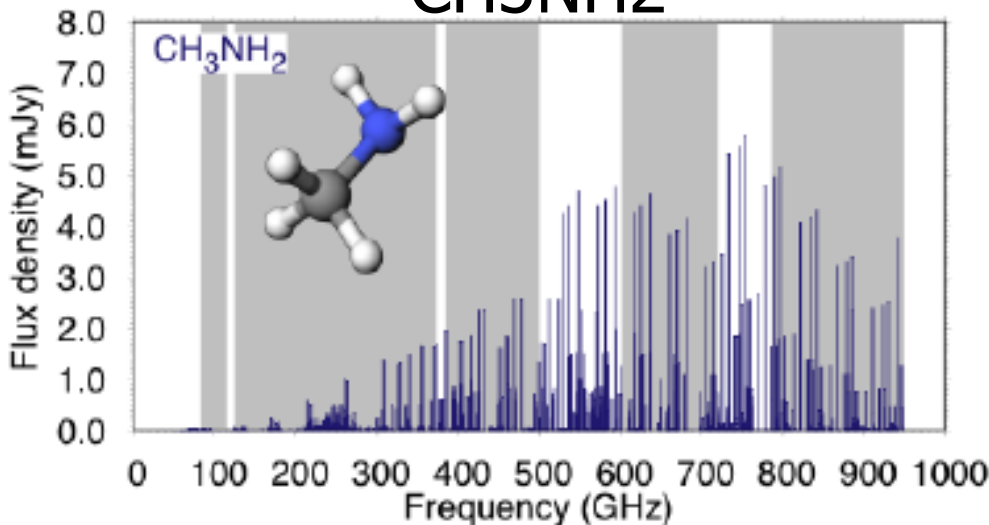
CH₃OCH₃



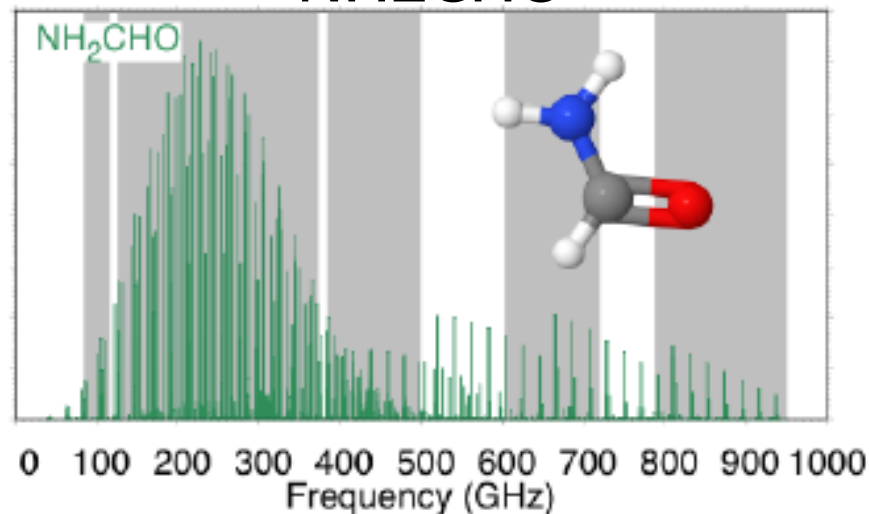
CH₃CHO



CH₃NH₂



NH₂CHO



ALMAによりさらに複雑な有機分子の検出へ

(Walsh et al. 2017)

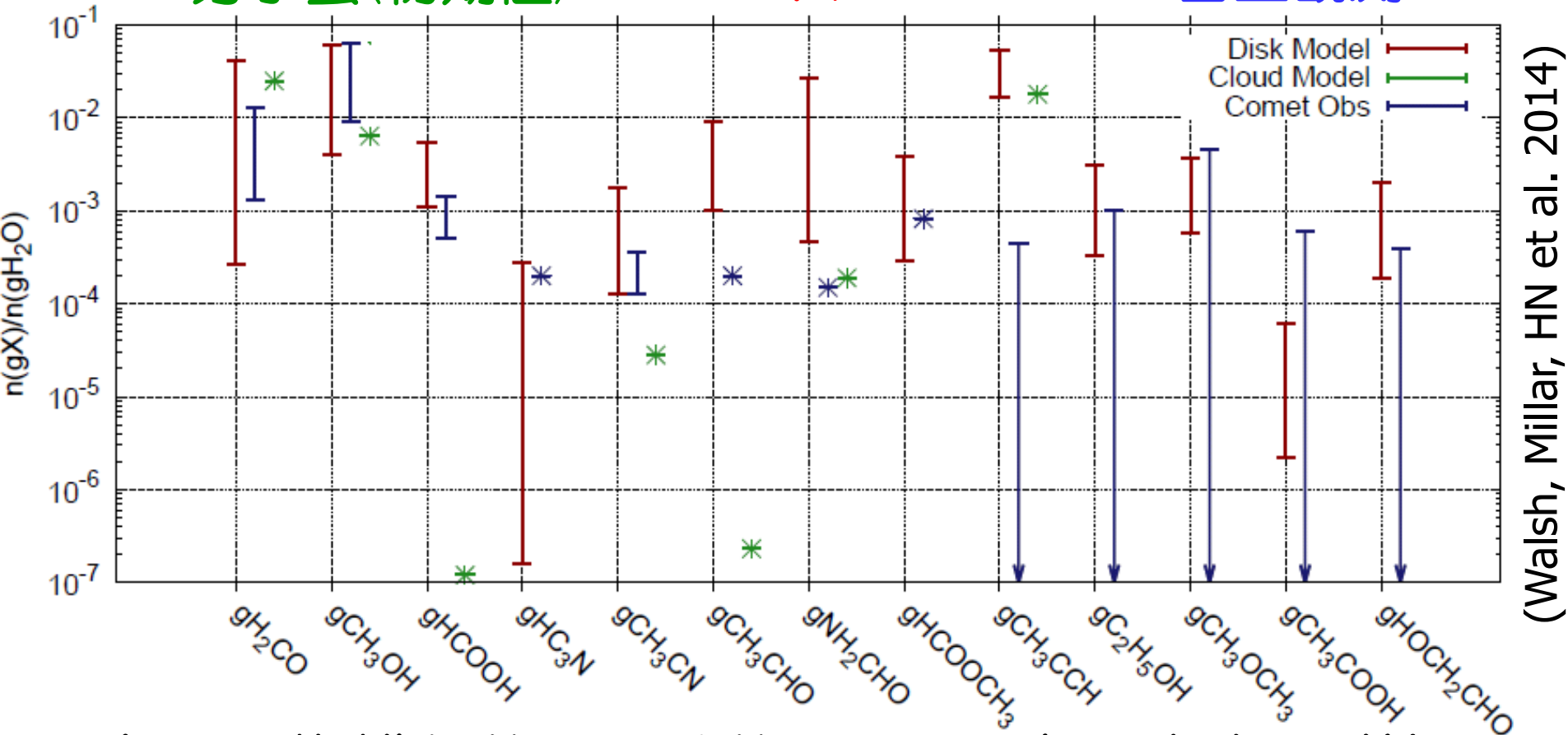
彗星で観測された分子存在量との比較

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

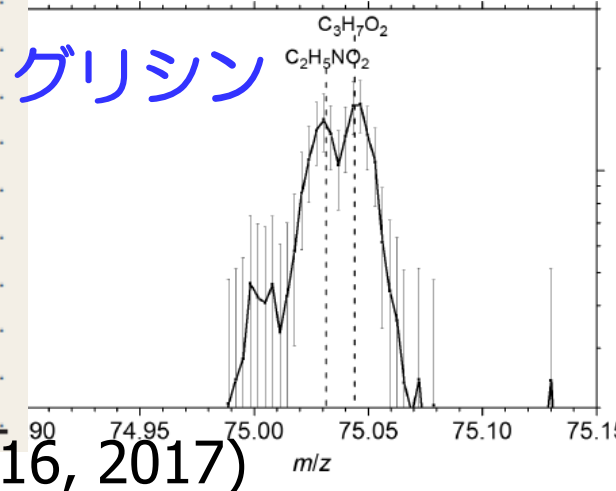
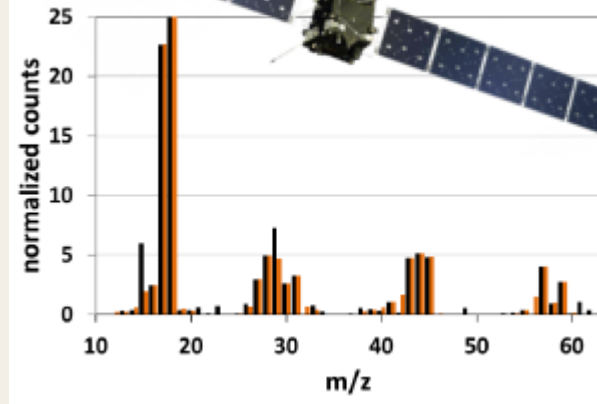
→ 彗星のALMA観測、Rosetta彗星探査機、、、

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

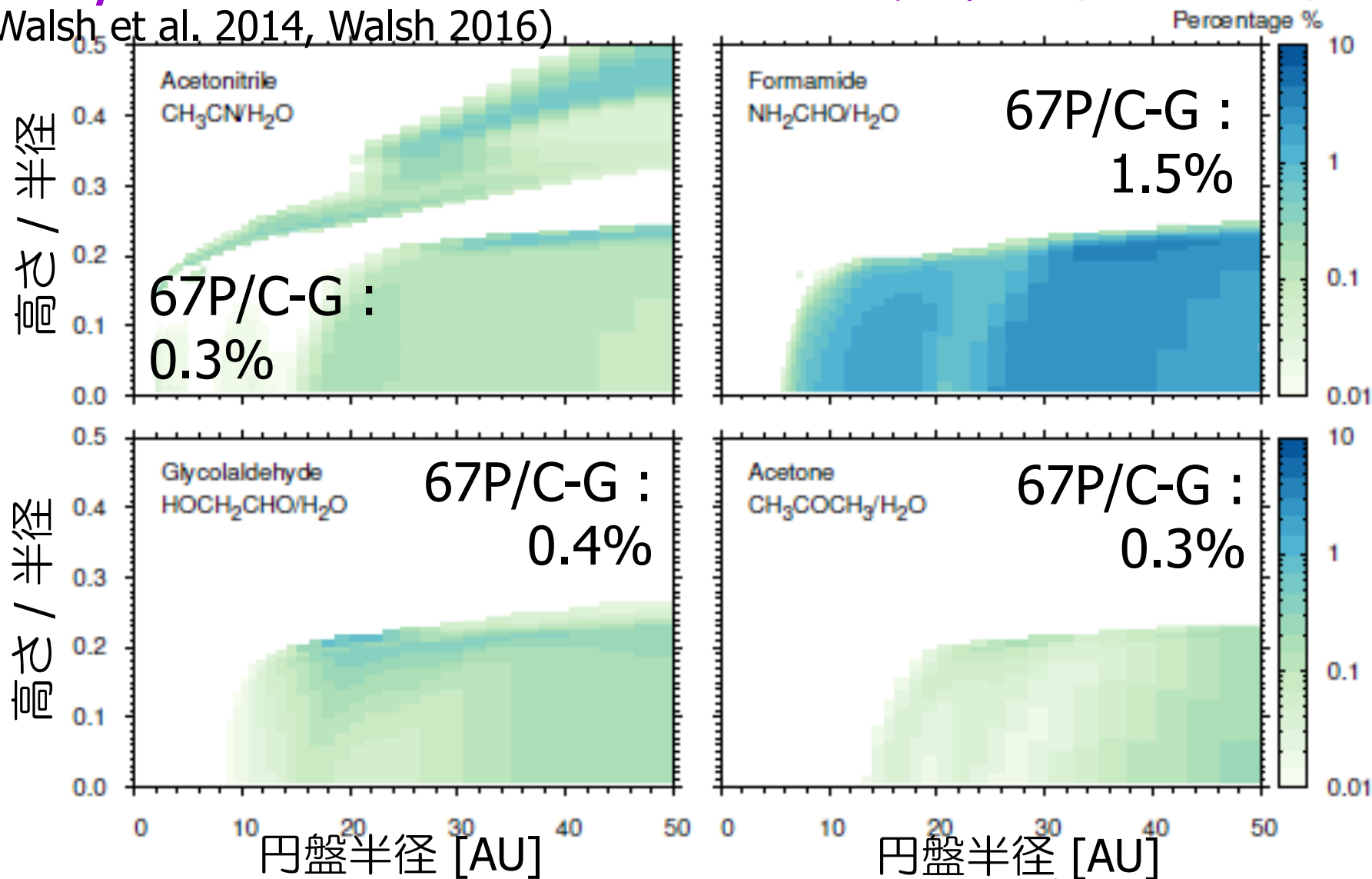


(Geosmann+ 2015, Altwegg+ 2016, 2017)

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、より大きな分子を説明するには**新たな反応**を取り入れる必要

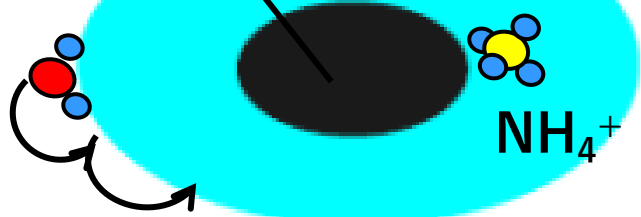
氷マントル反応：実験

三相モデル

氷マントル

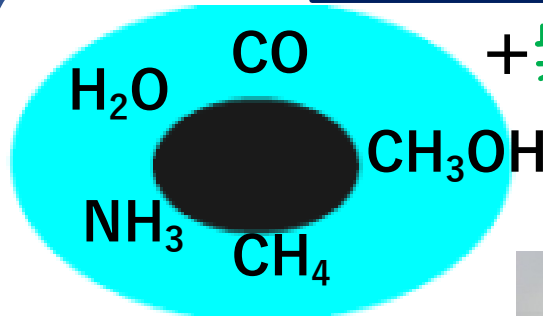
非熱的過程

珪酸塩・炭素塵



分子の熱拡散
→ 塵表面反応

気相



+ 紫外線, 宇宙線,
etc.

高分子化合物



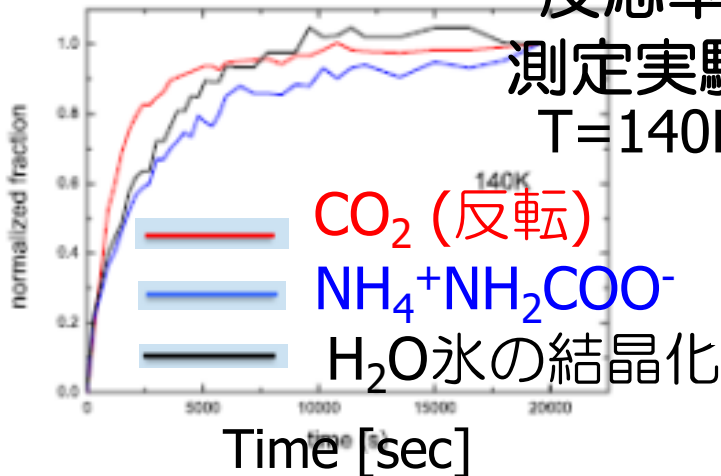
©小林憲正(横国)
→ 生命起源分子へ?

熱的過程

反応率

測定実験

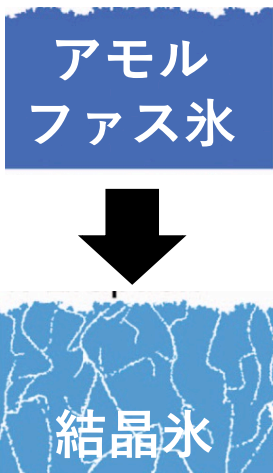
T=140K



(Ghesquiere et al. 2018)



H₂Oスノーライン
付近での氷化学



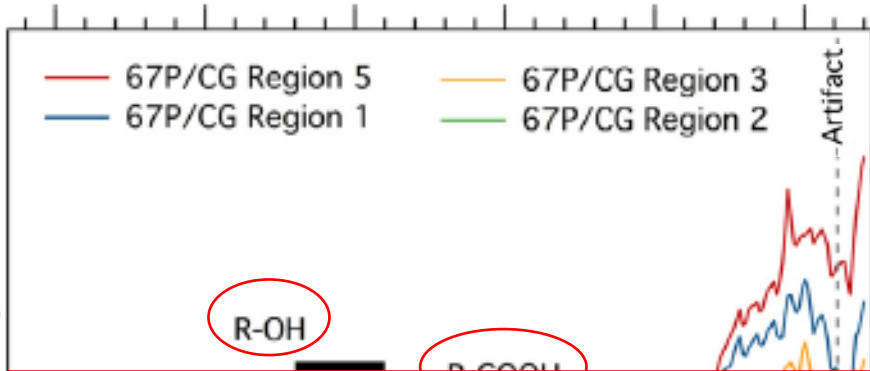
□ゼッタミッション：彗星中の有機分子



VIRTIS/Rosetta

67P/C-Gの近赤外線分光

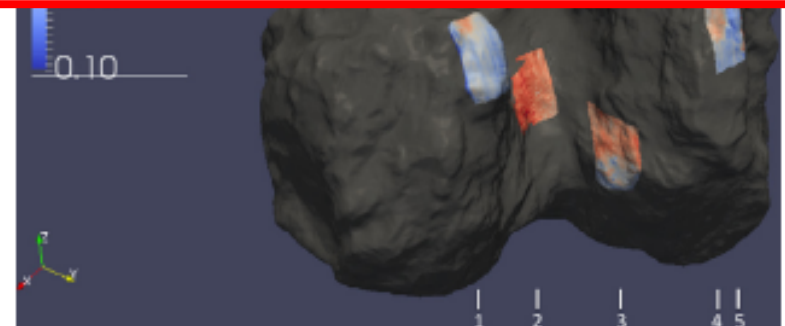
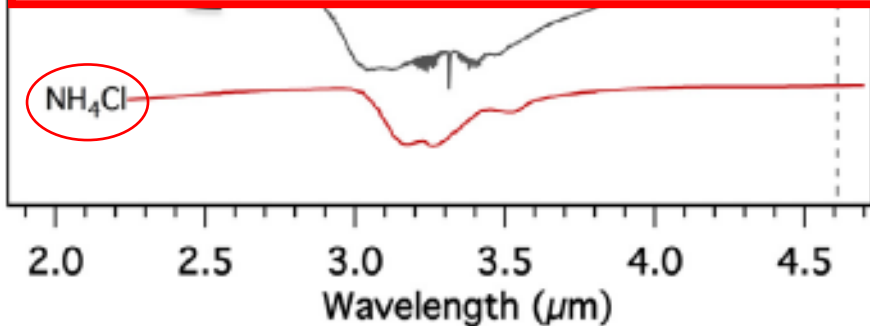
Transmission / Reflectance (REFF)



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

今後：化学反応ネットワーク計算への氷マントル反応の導入

→ 太陽系物質起源の解明へ



まとめ

高空間分解能・高感度ALMA観測による
原始惑星系円盤内の「構造」の観測

- 円盤内のダスト運動の検証
- 構造はいつできるのか？惑星形成との関連？

ALMA・ロゼッタによる円盤 & 彗星中の
複雑な有機分子の観測

- 冷たい塵・暖かい塵上の表面反応の検証
- より複雑な有機分子生成過程：氷マントル反応

惑星系の材料物質？

ALMA観測・小惑星探査による円盤から
太陽系内縁天体への物質進化の検証：
氷マントル反応 & 炭素塵破壊の効果？