

降着円盤大研究会2015

6月21日 @ 京都大学

原始惑星系円盤と 系外銀河の化学構造

野村英子 (東工大地惑)

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)

HL Tau (Brogan+ 2015)

ALMA

HD142527

(Fukagawa+ 2013)

(Qi et al. 2013)

TW Hya

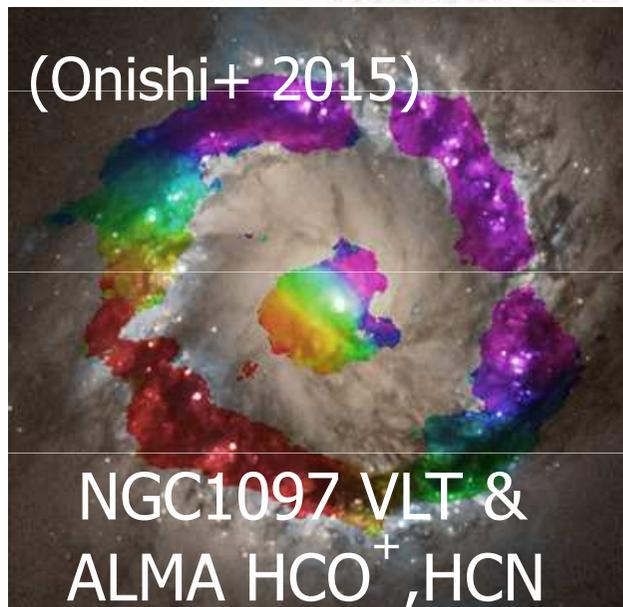
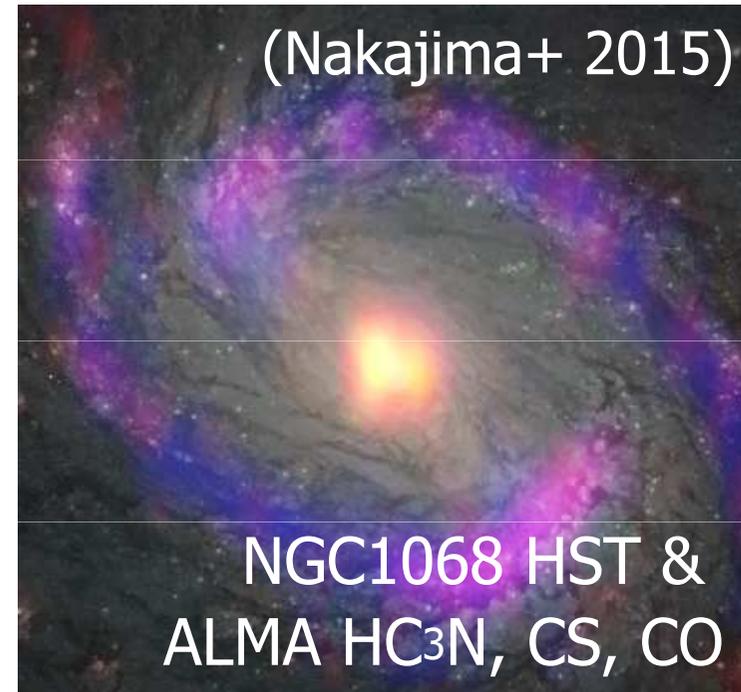
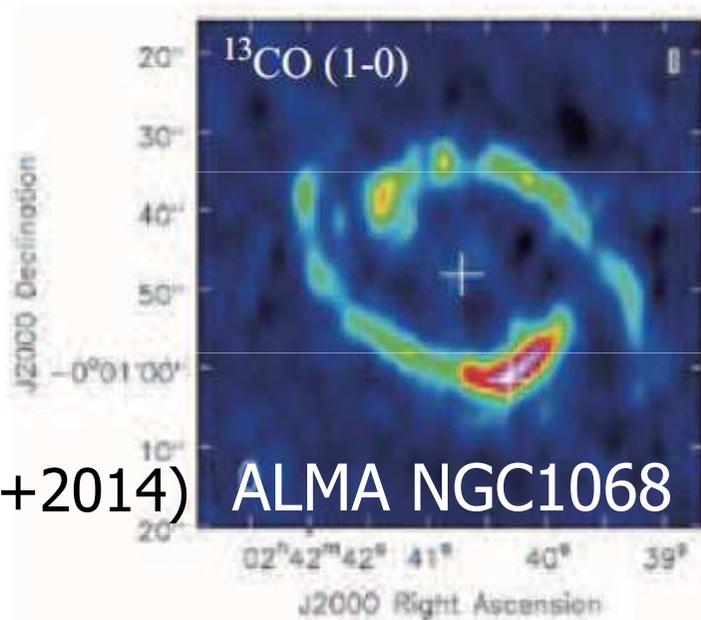
(Marcy et al. 2014)

Planet Size (Earth-radii)	Fraction of Stars with Planets (P = 5-100 days)
1.0	12.0%
1.41	14.2%
2.0	18.6%
2.82	5.9%
4.0	1.9%
5.66	1.0%
8.0	0.9%
11.3	0.7%
16.0	0.7%

原始惑星系円盤内の惑星形成の形跡を
ALMAで観測できるか？

4-3

系外銀河の分子遷移線の観測



近傍系外銀河中心の様々な分子種の分布が明らかになった

分子輝線のドップラーシフトより銀河中心ブラックホールの質量を測定

これまでに観測された星間分子の一部

CH+	HCN	H ₂ CO	HC ₃ N	CH ₃ OH	HC ₅ N	HCOOCH ₃	HC ₇ N
CS	HNC	H ₂ CS	HCOOH	CH ₃ CN	CH ₃ CCH	CH ₃ C ₃ N	HC ₉ N
CO	HCO	H ₂ CN	CH ₂ NH	CH ₃ NC	CH ₃ NH ₂	CH ₃ COOH	HC ₁₁ N
CN	OCS	HNCO	CH ₂ CO	CH ₃ SH	CH ₃ CHO	CH ₂ CHCHO	C ₂ H ₅ CN
C ₂	CH ₂	HNCS	NH ₂ CN	NH ₂ CHO	CH ₂ CHCN	CH ₂ OHCHO	CH ₃ C ₄ H
CH	C ₂ H	C ₃ H	C ₄ H	C ₅ H	C ₆ H	H ₂ C ₆	CH ₃ C ₅ N
CO+	C ₃	c-C ₃ H	c-C ₃ H ₂	H ₂ C ₄	c-C ₂ H ₄ O		CH ₃ OCH ₃
CF+	CO ₂	C ₃ N	H ₂ C ₃	HC ₃ NH+	CH ₂ CHOH		C ₂ H ₅ OH
CN-	C ₂ O	C ₃ O	CH ₂ CN	C ₅ N-	C ₆ H-		CH ₃ CONH ₂
	C ₂ S	C ₃ S	HCCNC				CH ₃ COCH ₃
	HCO+	CH ₃	HNCCC				OHCH ₂ CH ₂ OH
	HOC+	C ₂ H ₂	CH ₄				C ₂ H ₅ OCHO
	HCS+	HOCO+	H ₂ COH+	→ アミノ酸？			C ₈ H-
		HCNH+	C ₄ H-				NH ₂ CH ₂ COOH?

C₃N-

1970年
~10種



1980年
~50種



1995年
~100種

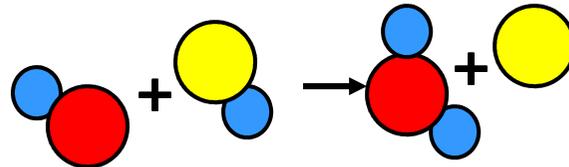


2015年
~180種

星間空間における化学反応

気相反応

中性種-中性種反応

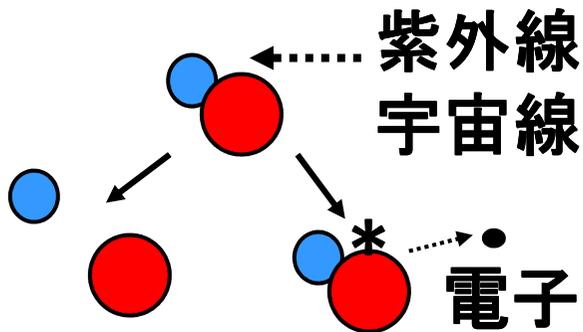


活性化エネルギーが高い → 低温(~10K)では非効率的

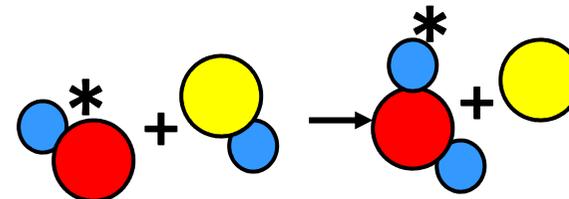
宇宙線による電離
光電離・光解離反応

+ イオン-中性種反応

* 化学反応ネットワークの過半数



* ラジカルも豊富



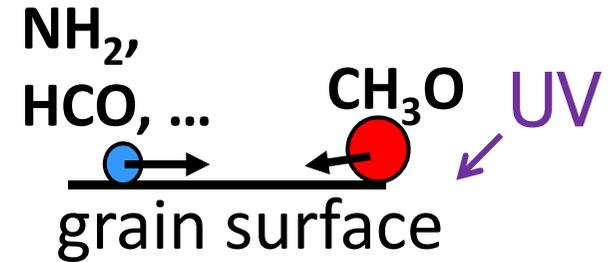
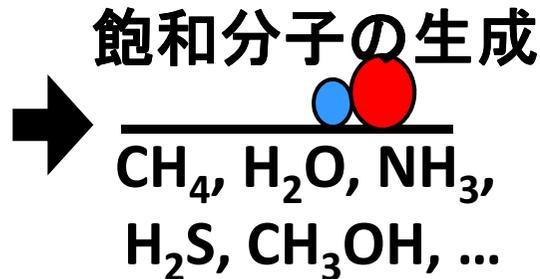
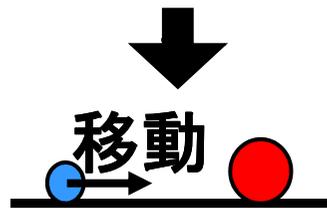
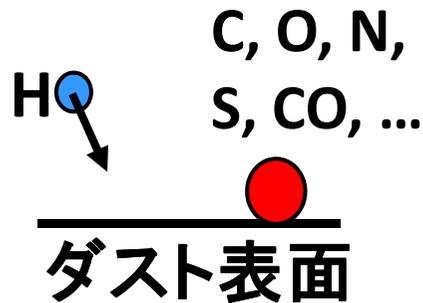
+ イオン-電子解離性再結合

星間空間における化学反応

ダスト表面反応

低温: < 20K

暖かい領域: 30–50K



非飽和分子の生成
HCOOCH₃, NH₂CHO, ...

(e.g., Garrod+ 2006, 2008)

分子の化学的特徴・生成過程

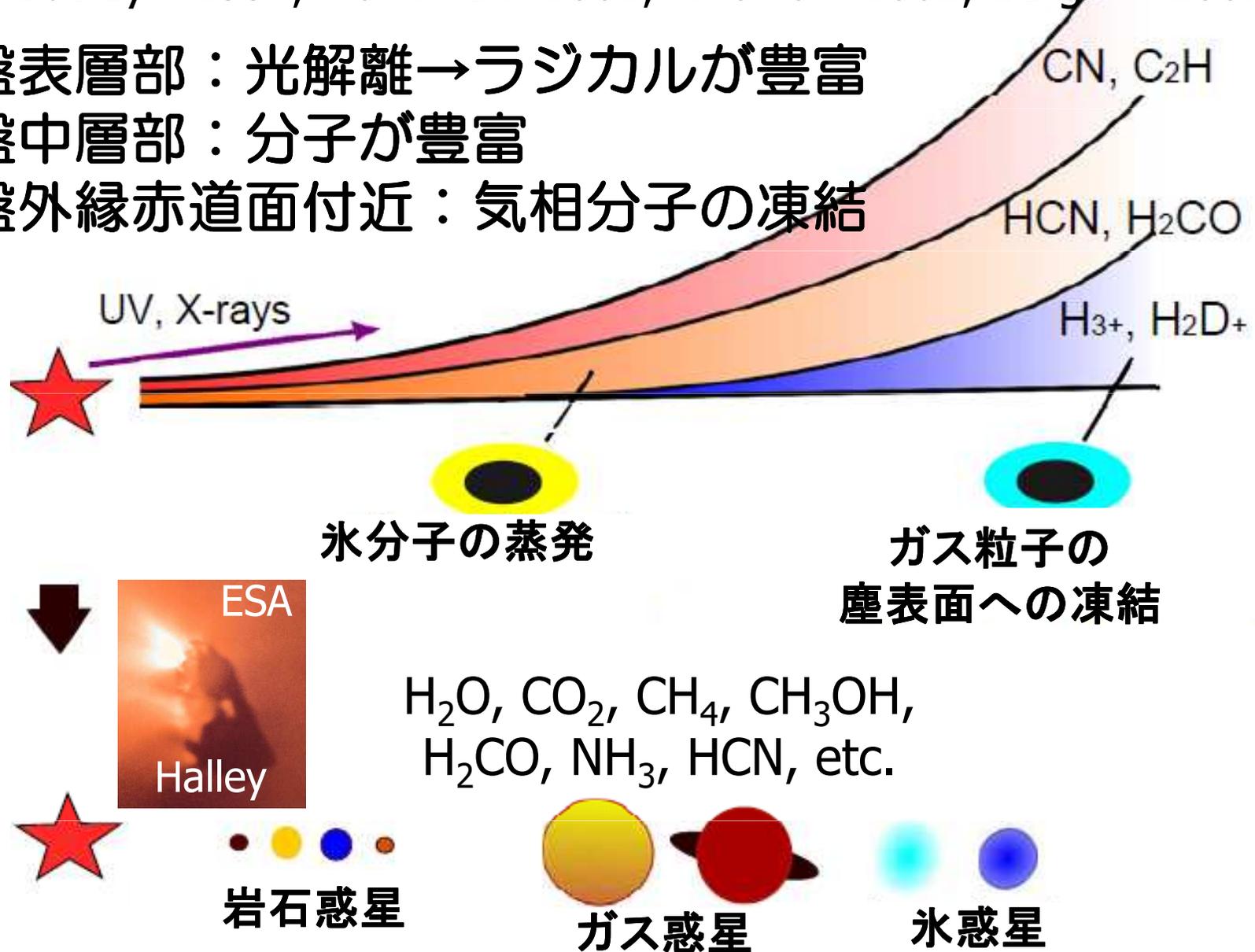
⇔ 天体の物理的特徴

(ガス・ダスト温度, 紫外線, 宇宙線, X線)

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

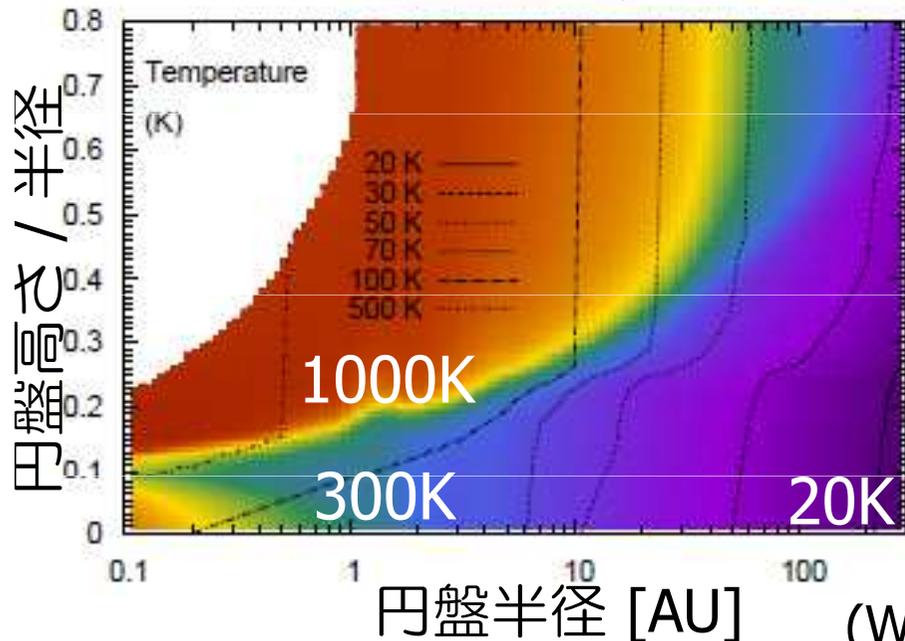


円盤の物理構造モデル

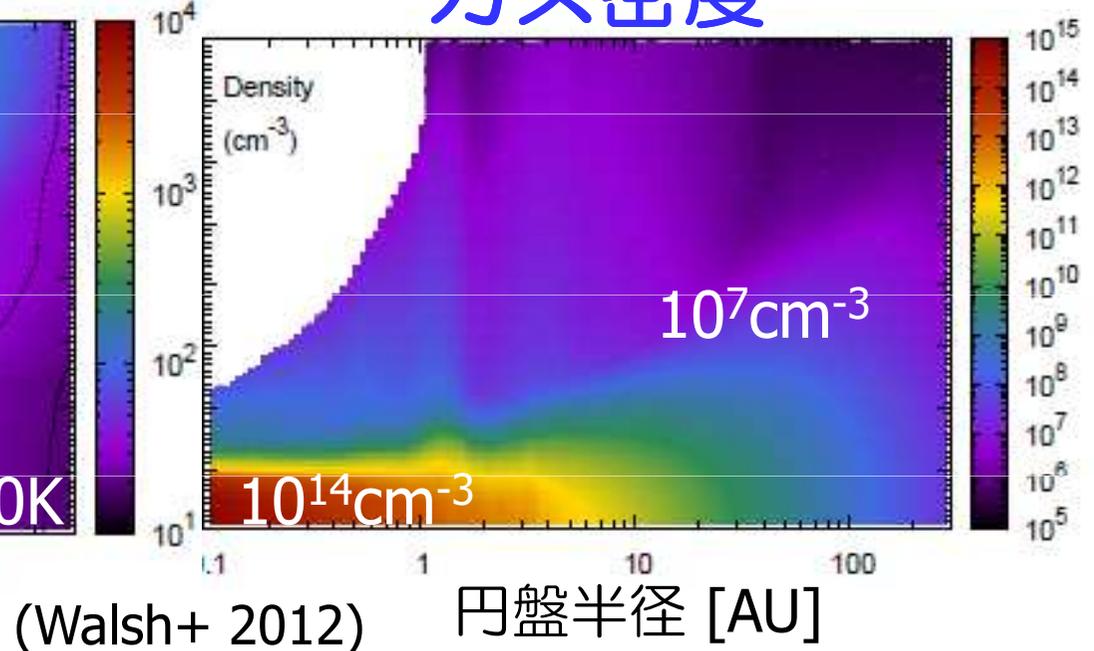
- 中心星：典型的なTタウリ型星 $M_* = 0.5M_\odot$, $T_* = 4000\text{K}$
- ガス密度分布：鉛直方向の静水圧平衡
- ガス温度分布：局所熱平衡 ($\Gamma_\chi + \Gamma_{pe} + L_{gr} - \Lambda_{line} = 0$)
- ダスト温度分布：局所輻射平衡 (2D 輻射輸送)

(Nomura et al. 2007)

ガス温度



ガス密度



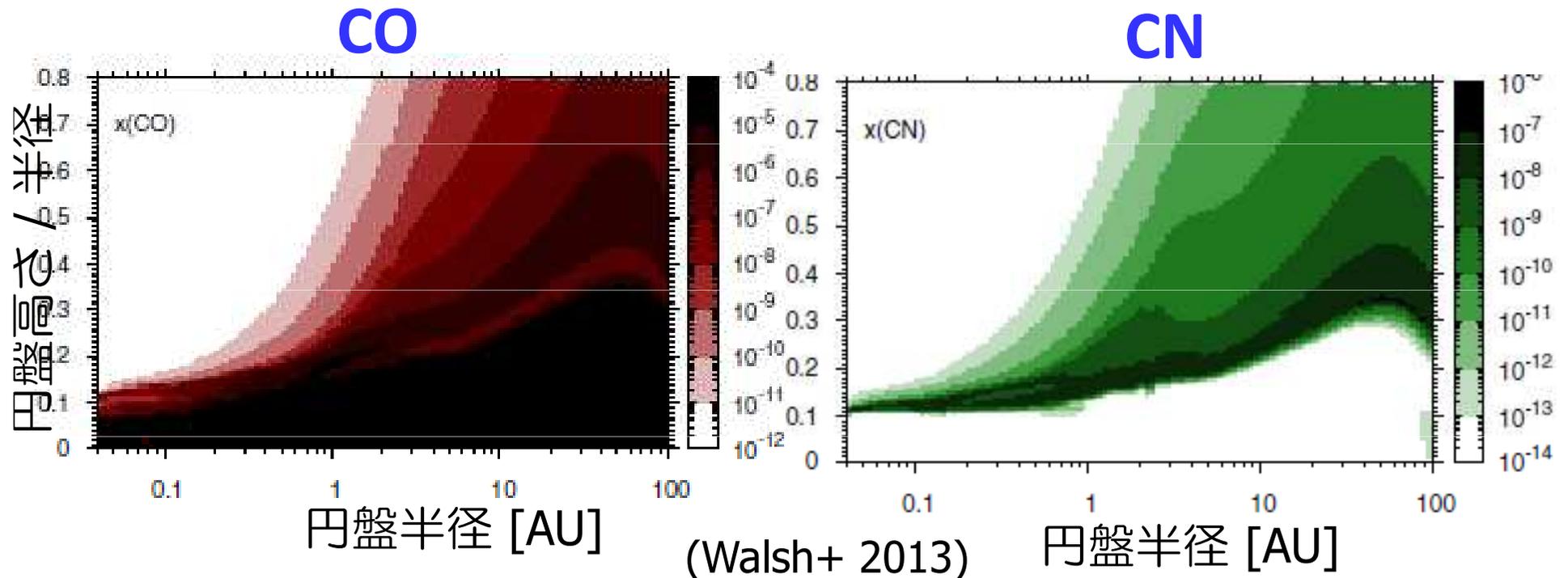
円盤の化学構造モデル

$$\frac{dn_{\alpha}}{dt} = \sum_{\beta} A_{\alpha\beta} n_{\beta} + \sum_{\beta,\gamma} B_{\alpha\beta\gamma} n_{\beta} n_{\gamma} - \sum_{\beta} A_{\alpha\beta} n_{\alpha} - \sum_{\beta} B_{\alpha\beta} n_{\alpha} n_{\beta}$$

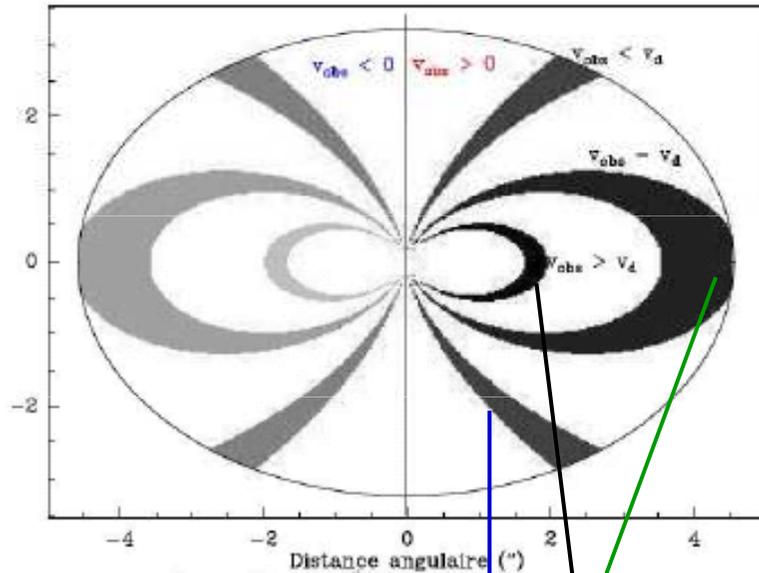
- **気相反応**: (Woodall et al. 2007) (Walsh et al. 2010)

UMIST Database for Astrochemistry (Rate06)

- **ダスト表面反応** (Hasegawa et al. 1992, 1993)
- **ガス・ダスト間の相互作用**:
ダスト表面への凍結, 熱的・非熱的脱離

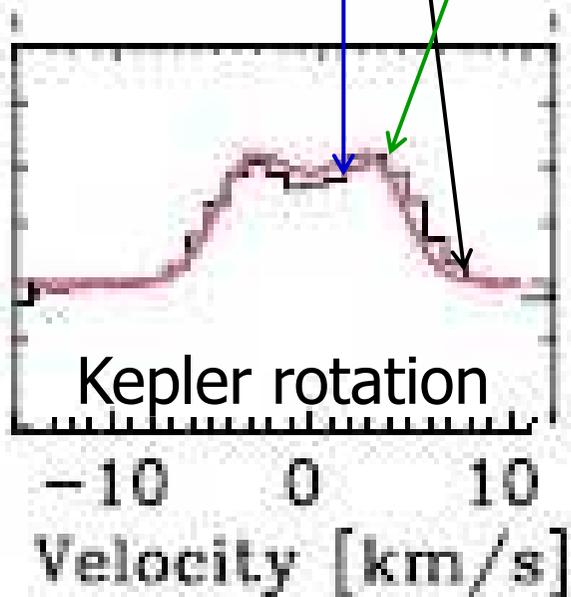
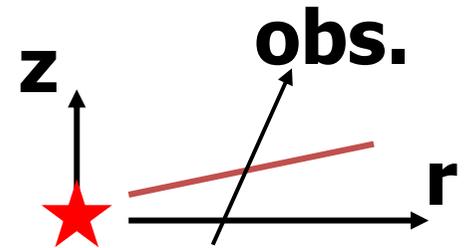


輝線プロファイルから円盤構造を探る

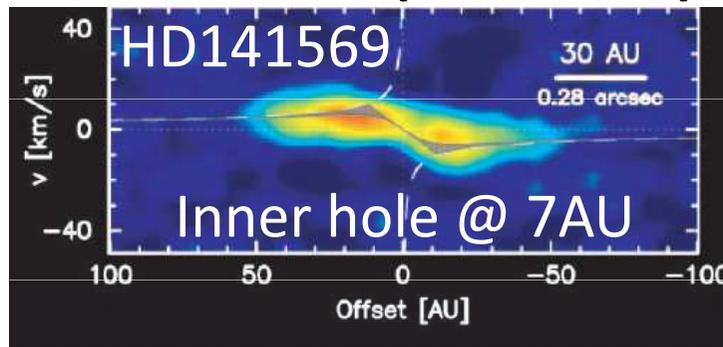


線幅 $\sim 10\text{-}20\text{km/s}$ \rightarrow 解析には
高分散 ($R \sim 100,000$) が必要

$$\frac{dI_{ul}}{dz} = -\alpha_{ul}(I_{ul} - S_{ul})$$



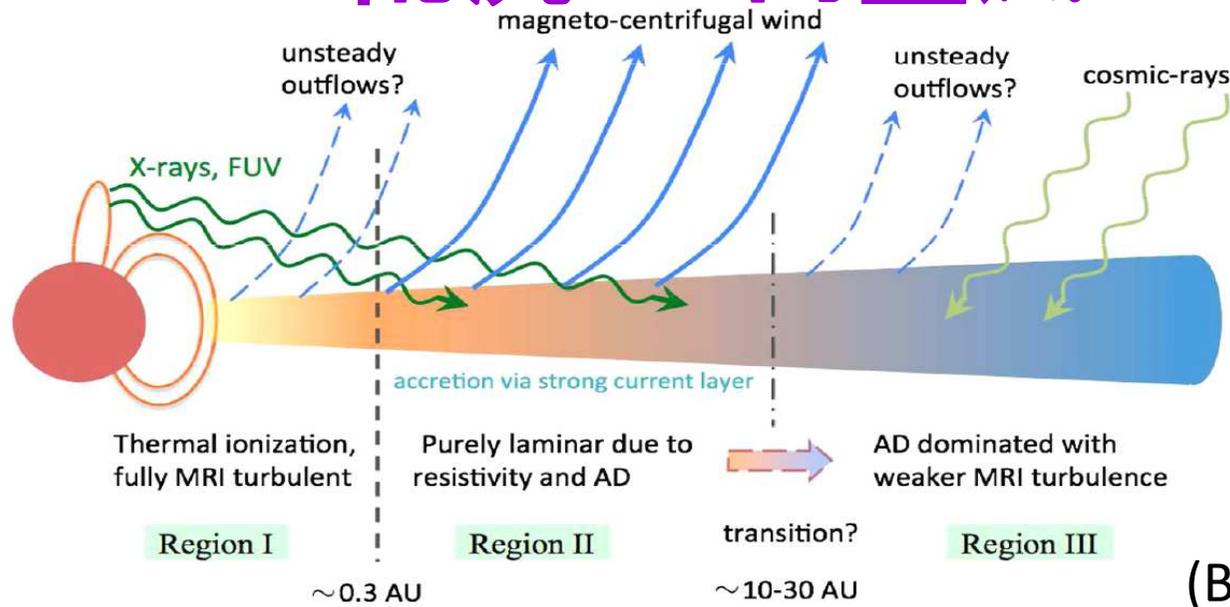
Subaru/IRCS (R=20,000)



(Goto et al. 2006)

4.7 μm CO 輝線プロファイルより
輝線放射領域に制限を与える

MIR乱流 & 円盤風

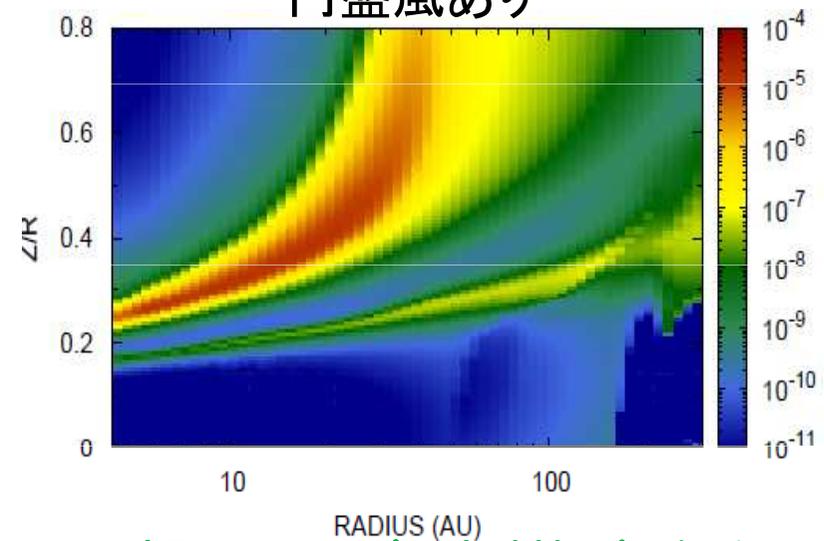
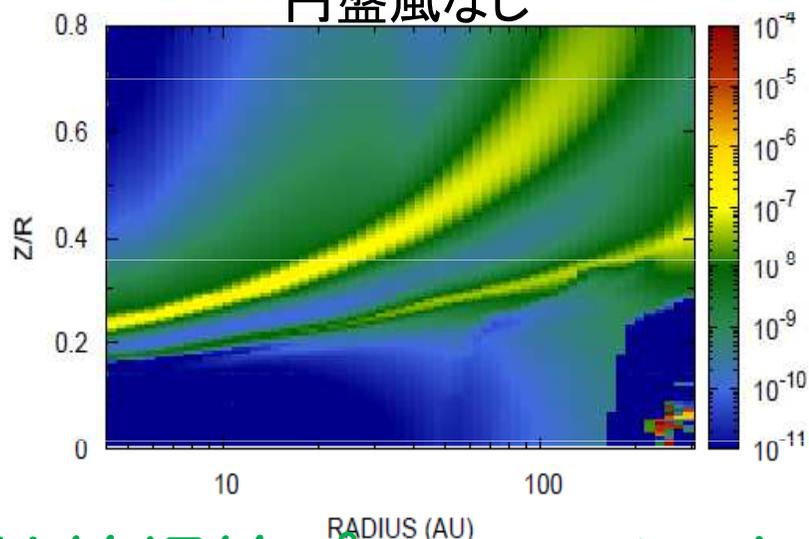


(Ishimoto+ in prep)

円盤風なし

H_2O abundance

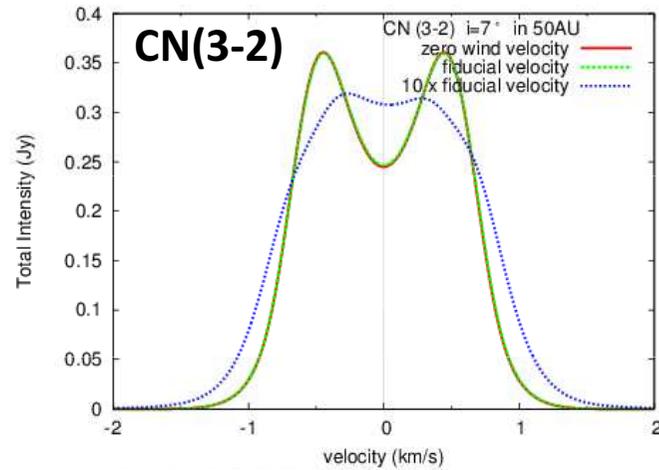
円盤風あり



赤外線輝線プロフィールから円盤風の速度構造を探る

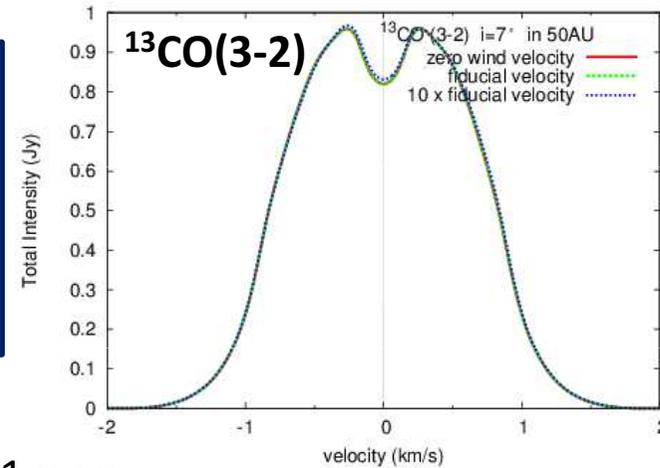
ALMAによる観測予測

(Ishimoto+ in prep)

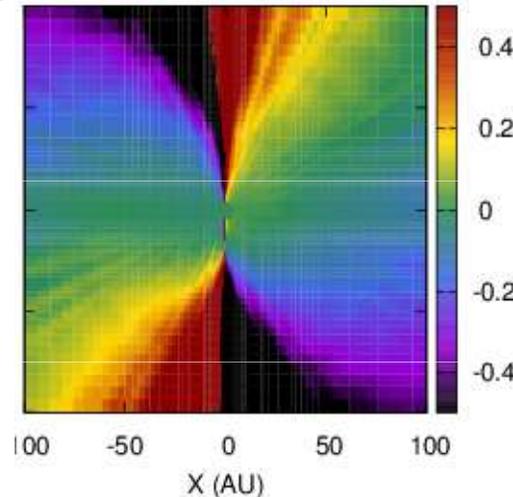
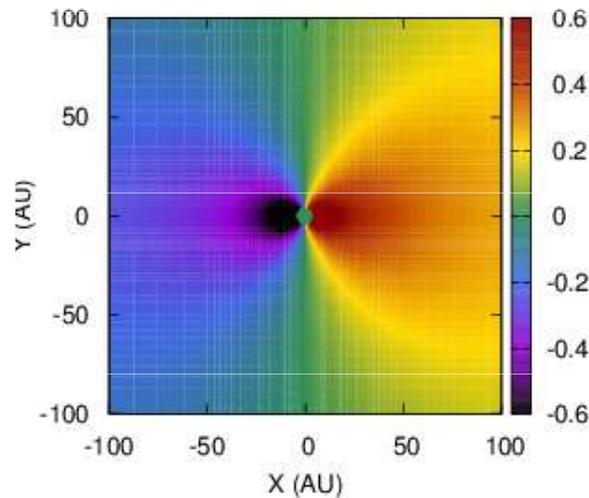


M1[^{13}CO]

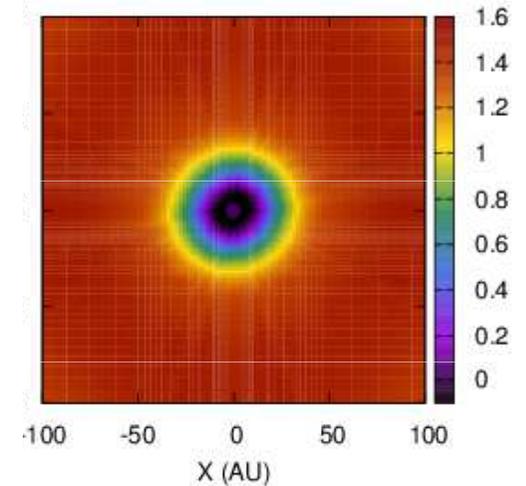
Blue : with
disk wind
Green :
w/o disk
wind



M1[CN] / M1[^{13}CO]



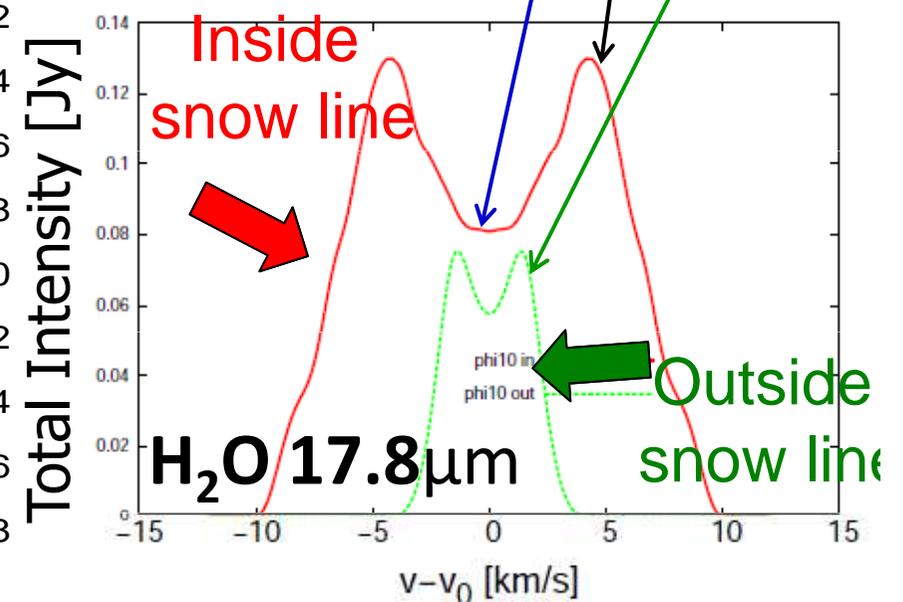
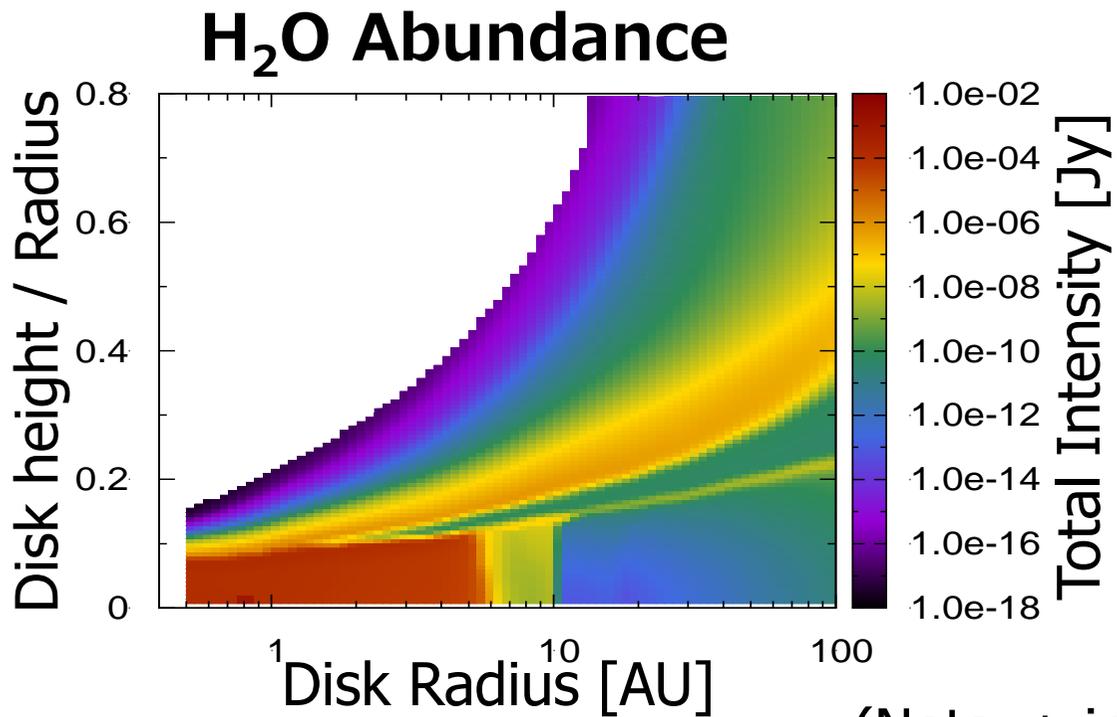
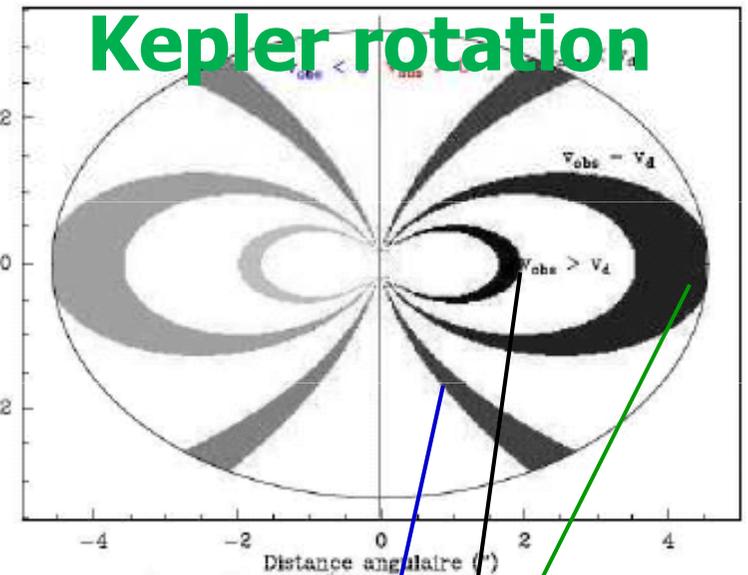
M2[CN] / M2[^{13}CO]



2つの輝線の速度構造の違いから円盤風の速度が測定可
ALMA cycle 2のプロポーザル通過

高分散観測によりH₂Oスノーラインを探る

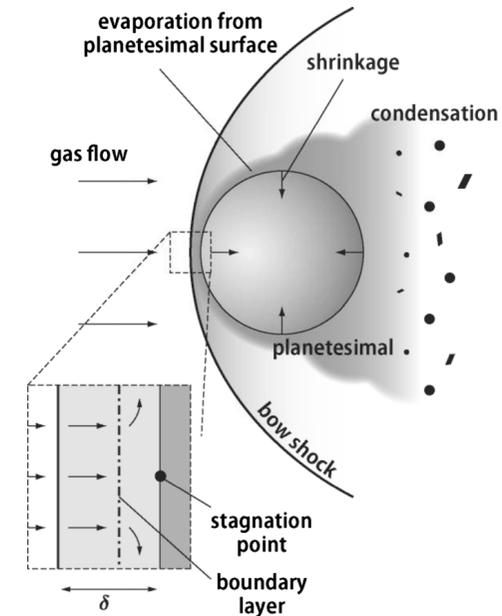
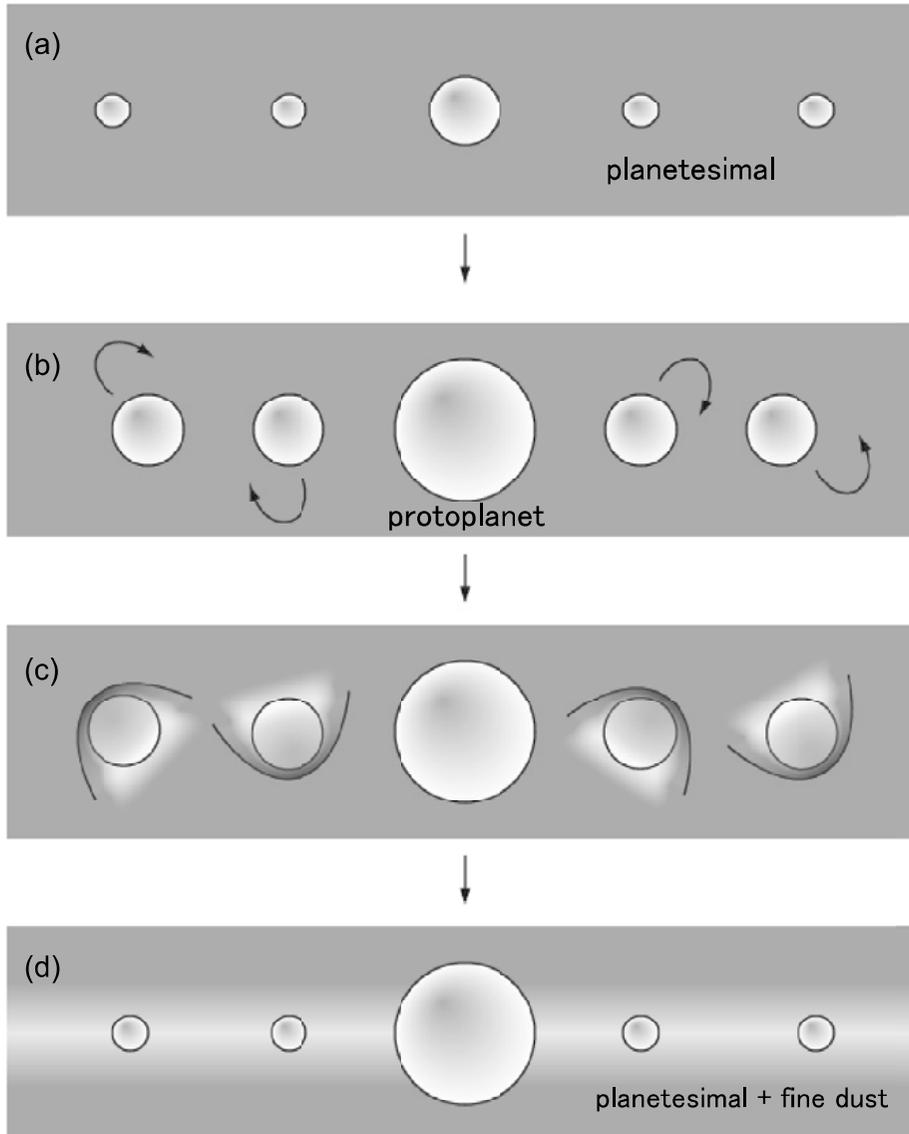
H₂O snow line will be detected using **high-R (R~100,000) spectroscopic observations** (ALMA, TMT, SPICA, ...)



(Notsu+ in prep.)

氷微惑星衝撃波加熱のALMA観測

野村、石本、長沢、田中(今)、三浦、中本、田中(秀)、山本



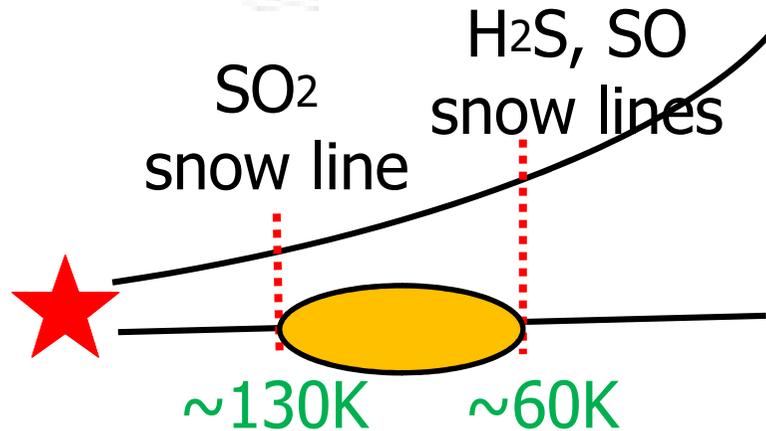
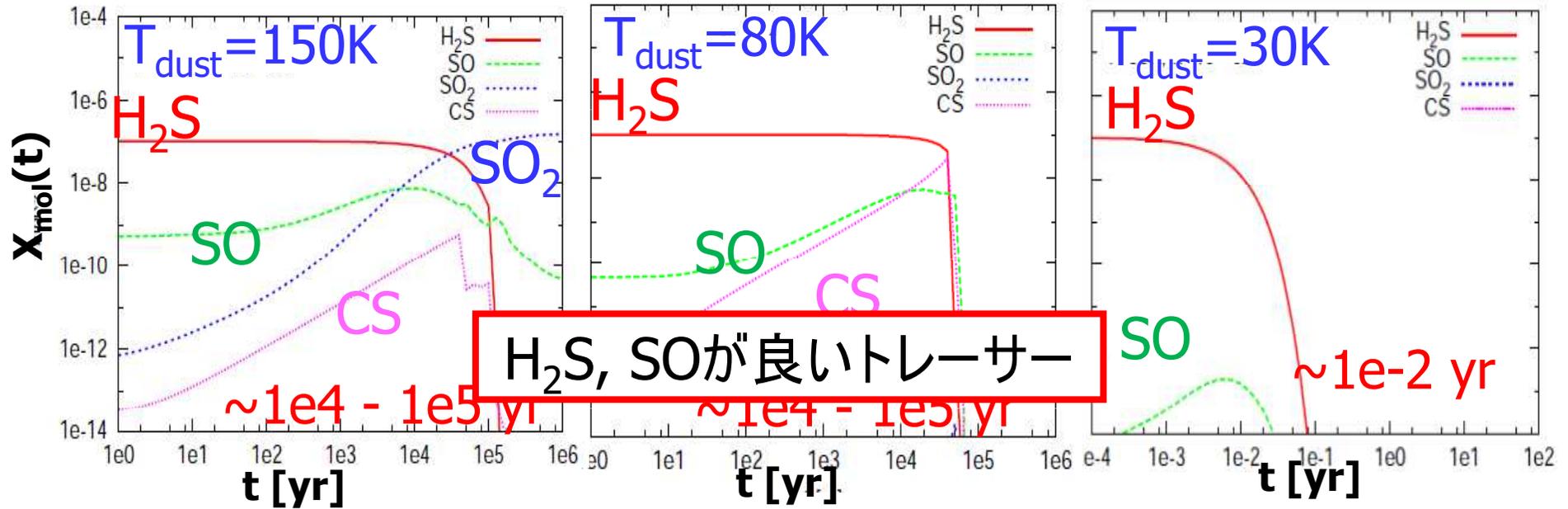
Tanaka et al. 2013

Nagasawa et al. 2014

原始惑星系円盤中の
原始惑星形成に伴う
氷微惑星の蒸発が
観測可能か？

硫黄を含む分子組成の時間進化

$V_p < 6 \text{ km/s}$, $n=1e12\text{cm}^{-3}$

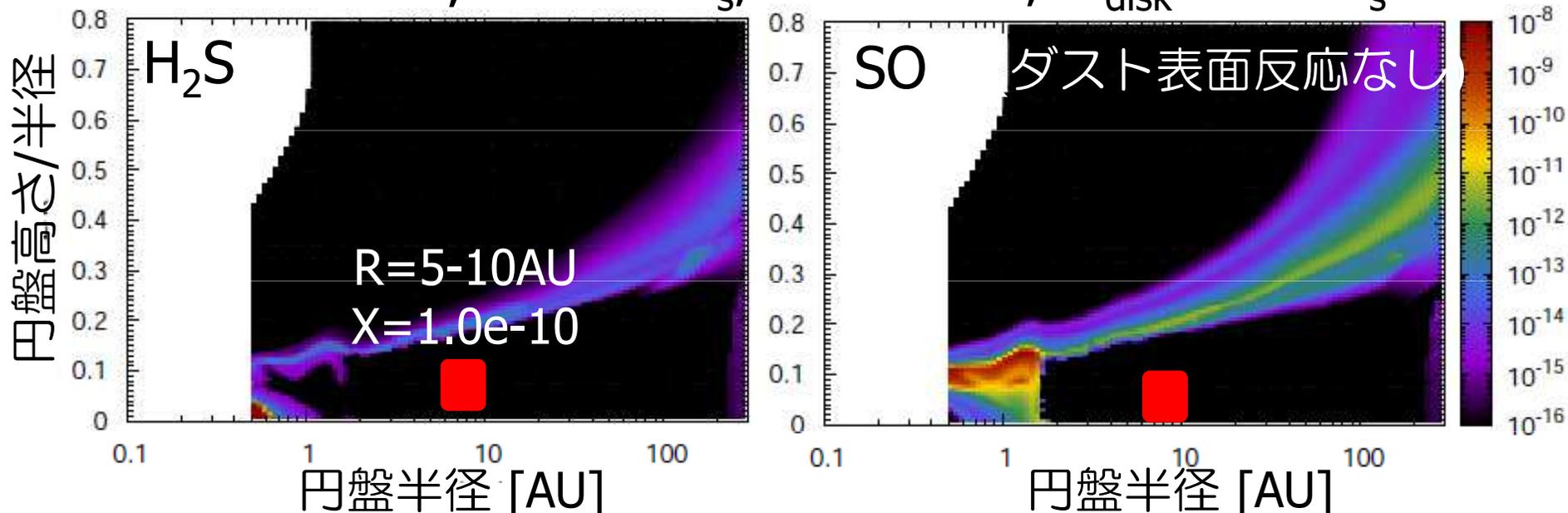


蒸発分子が化学反応により
失われる時間尺度 $\sim 10^{4-5}\text{yr}$
ダストへの凍結時間

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

H₂S & SO分子輝線のALMA観測可能性

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

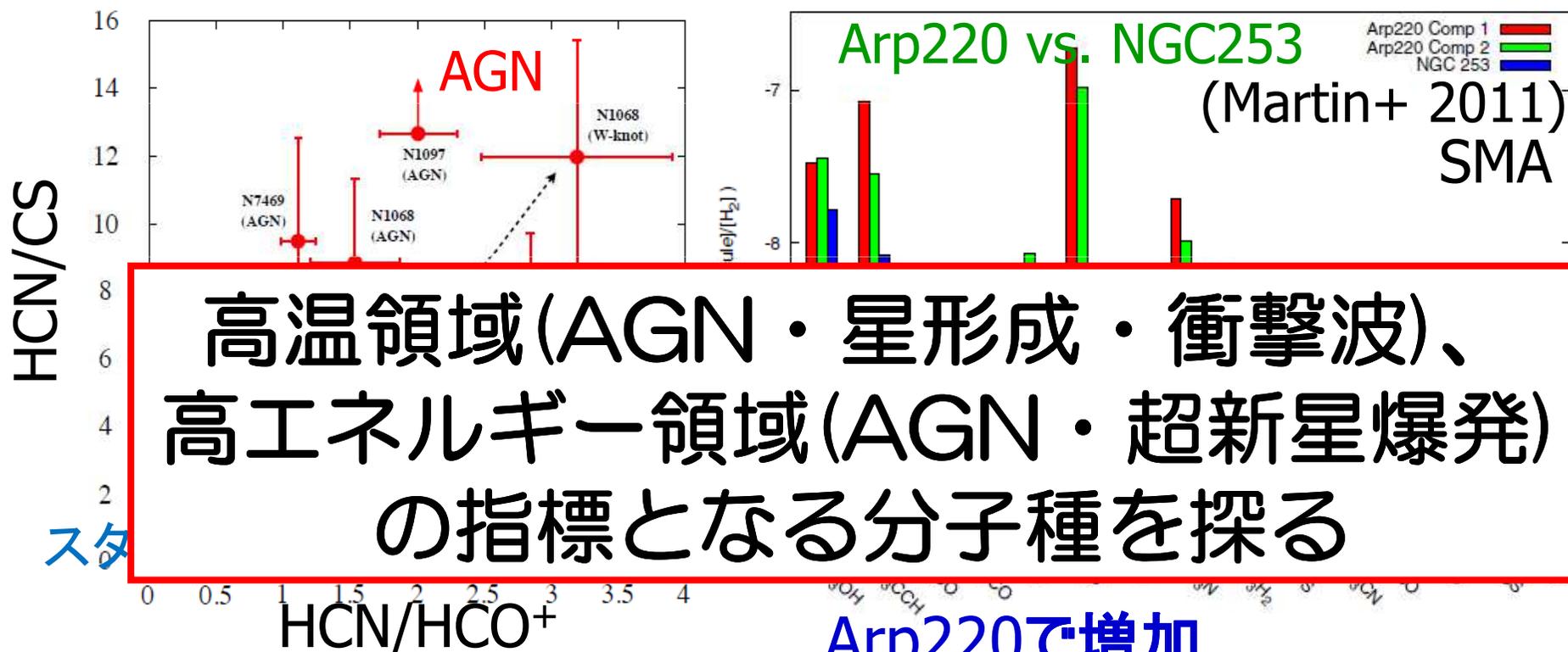


輝線ピーク フラックス密度	氷微惑星蒸発		これまでの観測 (IRAM 30m, Dutrey+11)
	なし	あり	
H ₂ S @300GHz	0.4mJy	10mJy	< 10mJy @ 169GHz
SO @ 301GHz	0.6mJy	22mJy	< 10mJy @ 99GHz

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, H₂S, SO分子輝線が観測可

系外銀河の分子組成の多様性

スターバースト vs. AGN (ULIRG)



高温領域 (AGN・星形成・衝撃波)、
高エネルギー領域 (AGN・超新星爆発)
の指標となる分子種を探る

HCN/CS vs. HCN/HCO⁺の
分布がSBとAGNで異なる
(Izumi+ 2015)

Arp220で増加

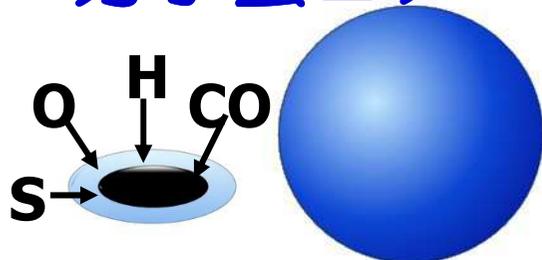
CO⁺, SiO, H₂S, SO, CS,
HC₃N, CH₃CN

同程度 CH₃OH, H₂CO, HNCO

ホットコア化学 + 宇宙線 (X線) による電離・解離
(e.g., Papadopoulos 2010, Bayet+ 2011, Harada+ 2013)

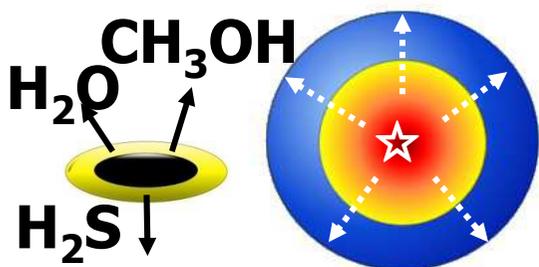
我々の銀河中心の分子輝線観測

分子雲コア

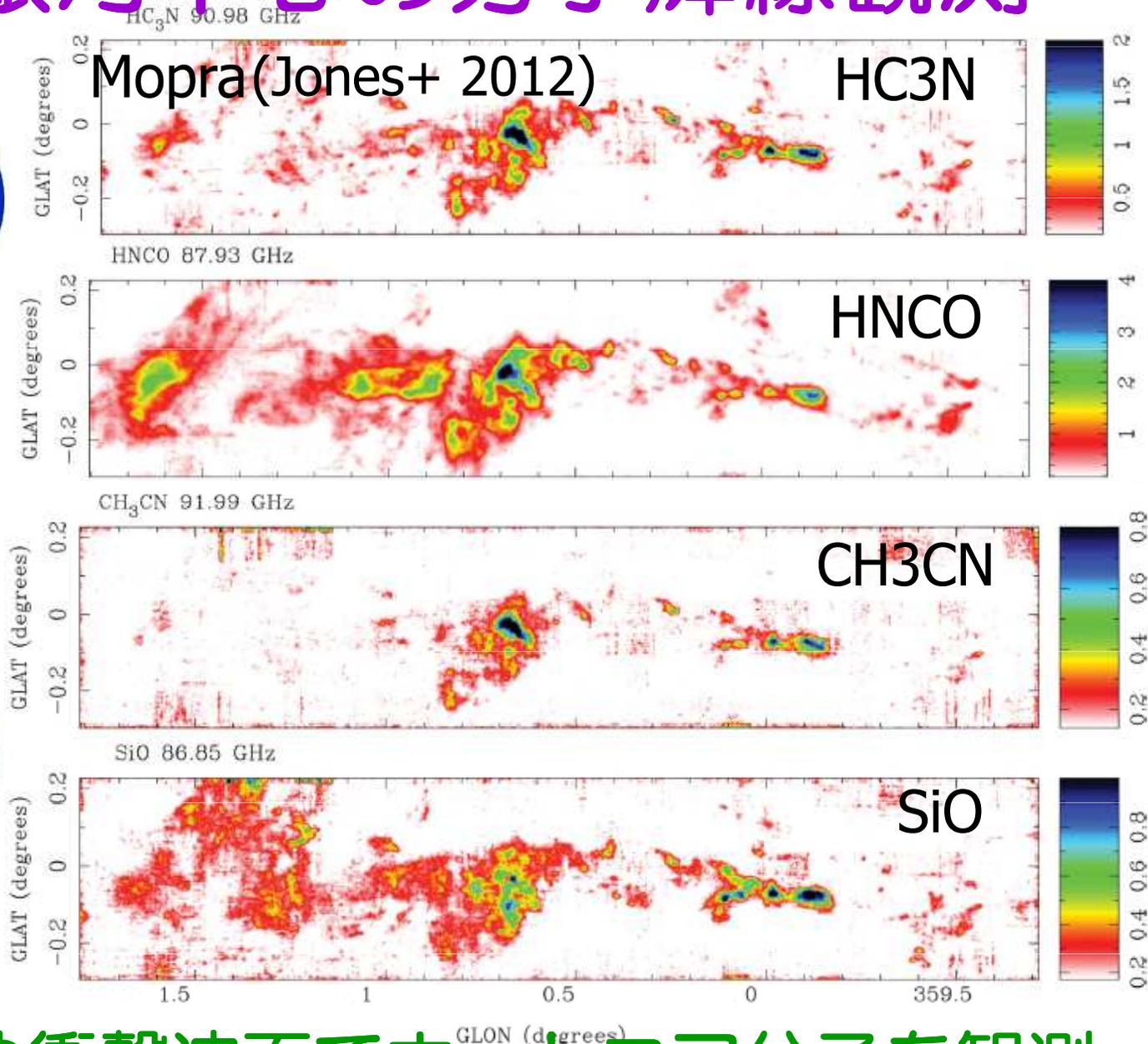


分子がダストへ
吸着+表面反応

星形成後



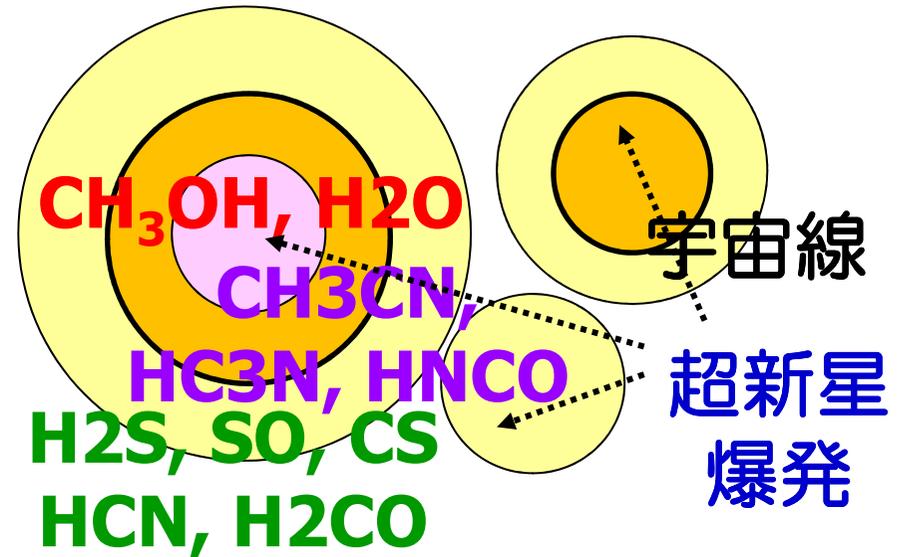
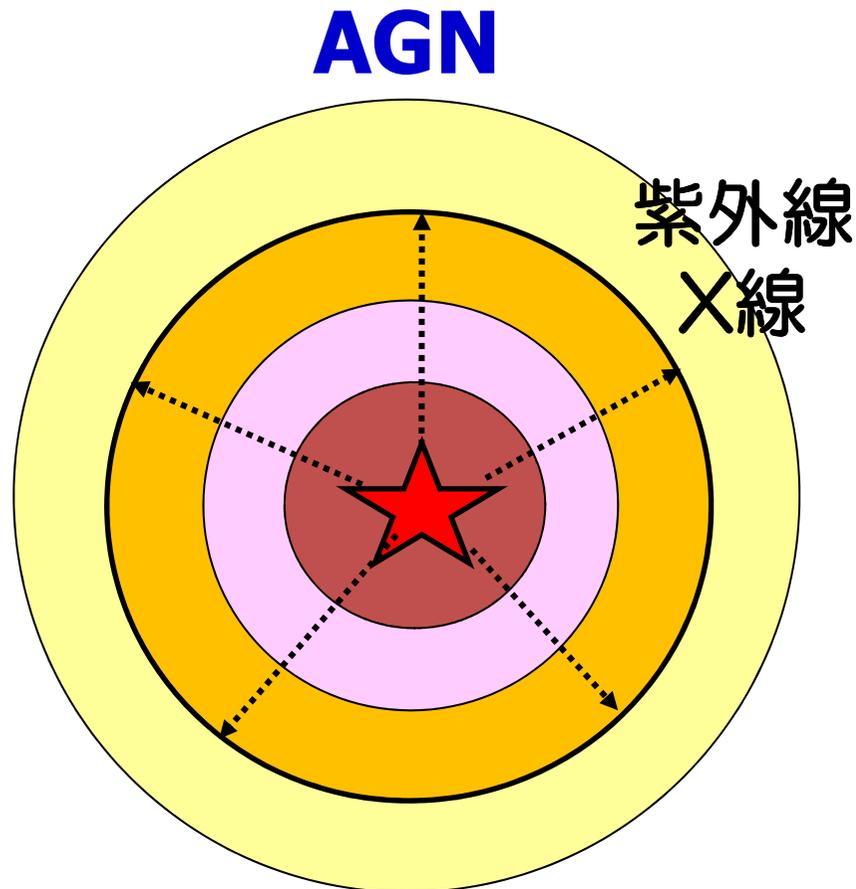
ダスト表面
分子の脱離



星形成領域や衝撃波面でホットコア分子を観測

化学構造に影響を及ぼす物理量

スターバースト



分子の空間分布は
分子のダストへの
束縛エネルギーに依存

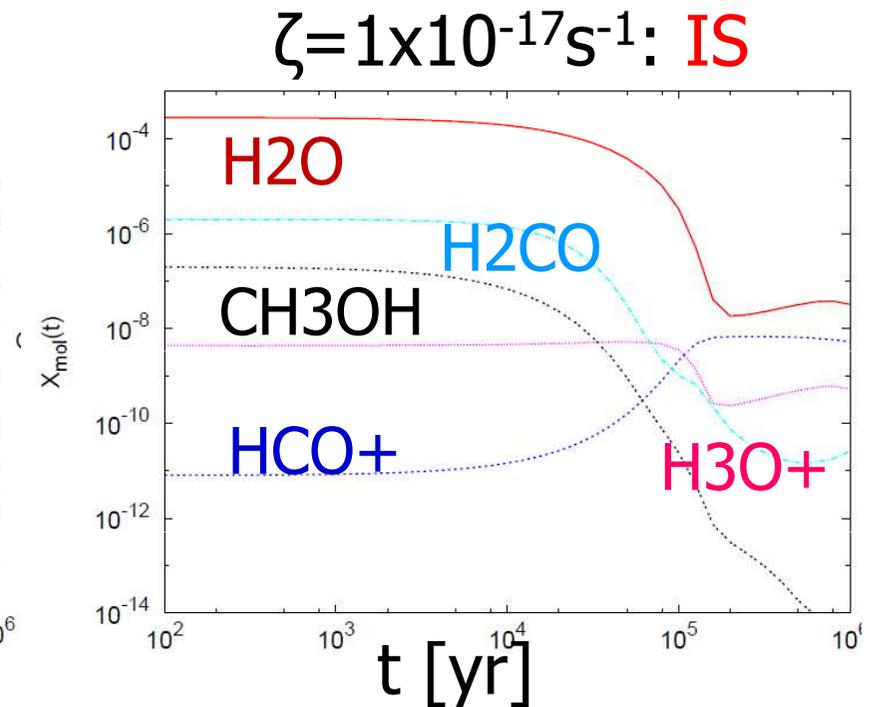
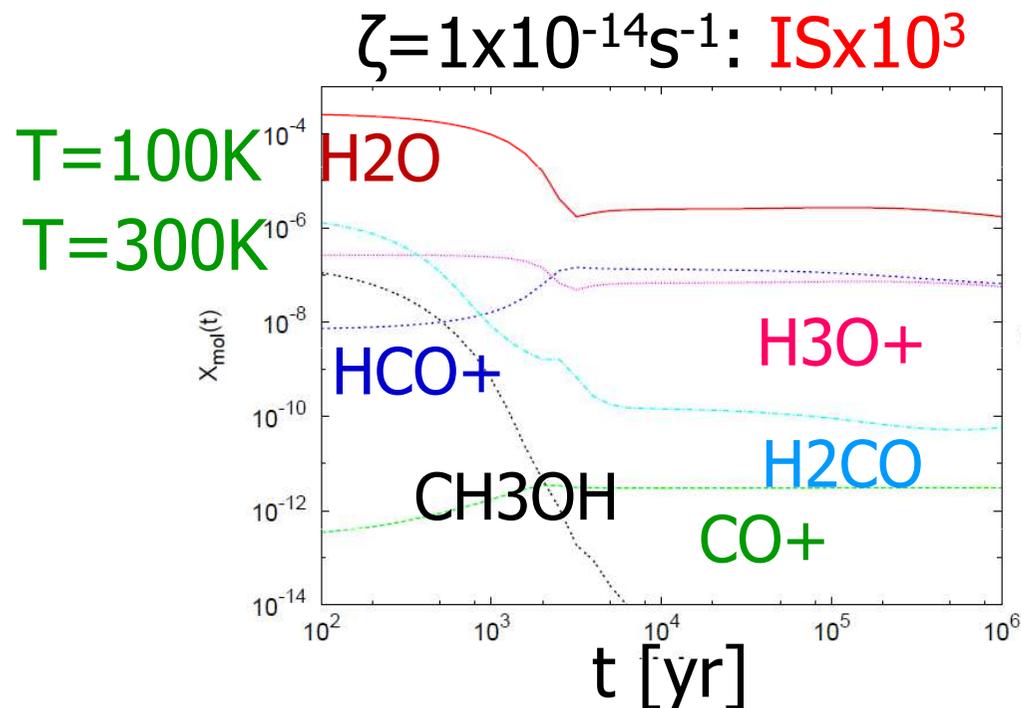
ホットコア化学+宇宙線化学

$$\frac{dn_{\alpha}}{dt} = \sum_{\beta} A_{\alpha\beta} n_{\beta} + \sum_{\beta,\gamma} B_{\alpha\beta\gamma} n_{\beta} n_{\gamma} - \sum_{\beta} A_{\alpha\beta} n_{\alpha} - \sum_{\beta} B_{\alpha\beta} n_{\alpha} n_{\beta}$$

化学ネットワーク：384種, 4402気相反応

初期条件：固相分子の気相への脱離

パラメータ：温度(100K, 300K), 宇宙線(X線) (IS, $10^3 \times \text{IS}$)



系外銀河の分子組成の多様性

E_{bin}

大 ↑

分子種	生成率@ >300K	CR X線
CH ₃ OH		↓
CH ₃ CN	↑	
HC ₃ N	↑	
HNCO		↓
H ₂ S		↓
SO		
H ₂ CO		↓
CS		

↓ 小

T ↑ → 束縛エネルギーの
大きい分子 ↑

T ↑ → 高温下の気相反応で
生成される分子 ↑

宇宙線 ↑ → H₂O, H₂CO, CH₃OH
(氷マントル分子) ↓

系外銀河の分子組成の多様性

スターバースト vs. ULIRG (Martin+ 2011)

Arp220 vs. NGC253

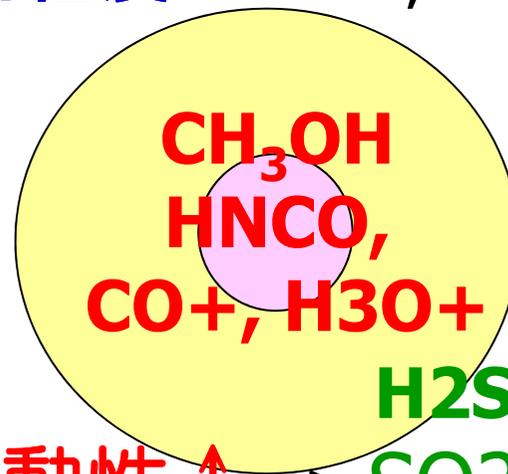
Arp220で増加

CO+, SiO, H₂S, SO, CS,
HC₃N, CH₃CN

同程度 CH₃OH, H₂CO, HNC

分子種	生成率@ >300K	CR X線
SO ₂		
CH ₃ OH		↓
H ₂ O	↑	↓
CH ₃ CN	↑	
HC ₃ N	↑	
HNC		↓
H ₂ S		↓
SO		
HCN	↑	
H ₂ CO		↓
CS		

E_{bin}
大
↑
小



活動性 ↑ → H₂S, SO, CS
SO₂, HNC ↑,
(HCO+以外の)イオン ↑,
H₂O: 脱離と解離の
兼ね合いで決まる

まとめ

原始惑星系円盤の物理・化学構造を 分子輝線から探る

- ・ 分子の特徴を利用して円盤風を検出する
- ・ 輝線形状からH₂Oスノーラインを検出する
 - ・ H₂S, SOから氷微惑星蒸発を探る

ホットコア化学 + 宇宙線化学で 系外銀河の化学を考える

塵表面反応 + 固相分子蒸発 + 高温気相反応

イオンと分子の空間分布は高温領域

(AGN・星形成・衝撃波)、高エネルギー領域
(AGN・超新星爆発)の指標となる可能性を示唆