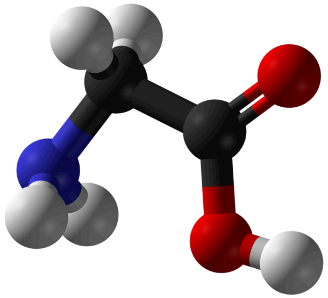
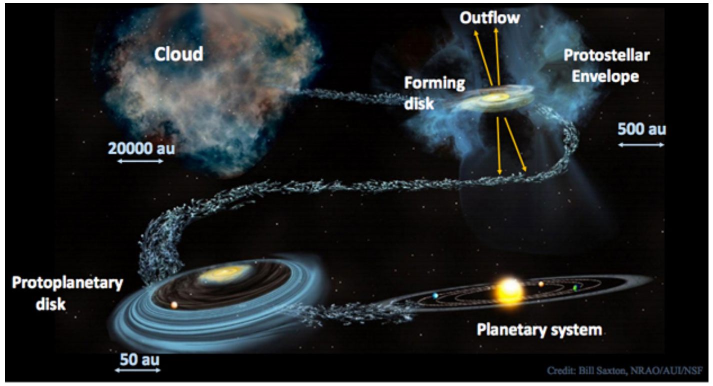
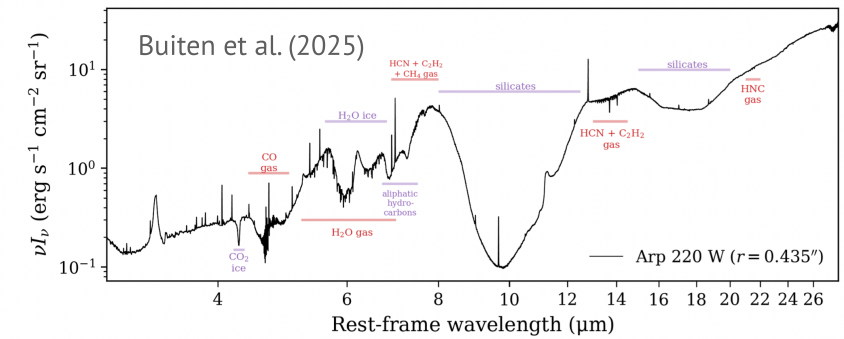


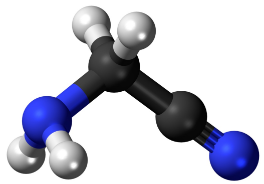


AstrochemistryとTMTへの展望

原田ななせ（国立天文台科学研究部）

TMT Webinar
Mar 10, 2026

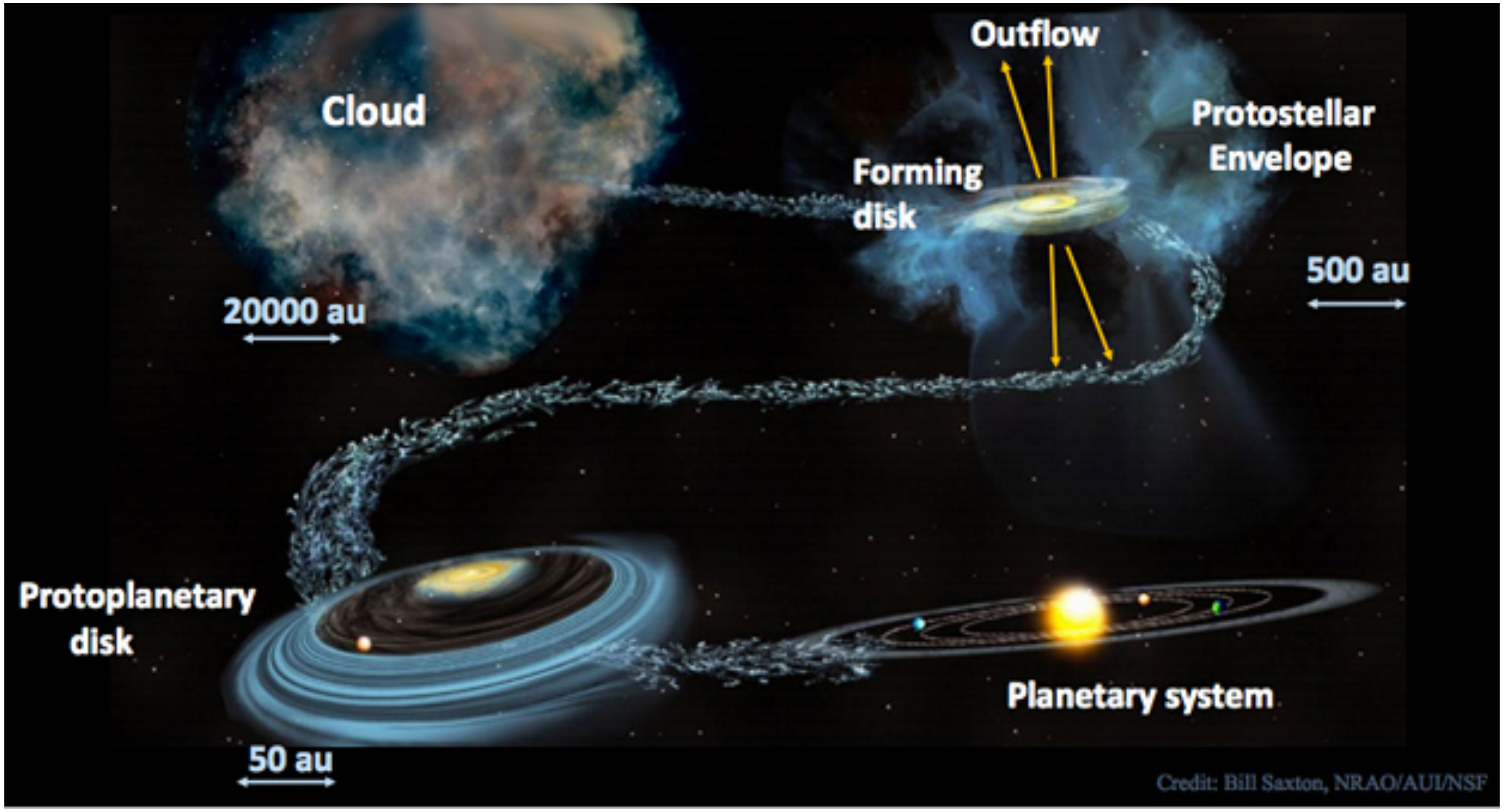




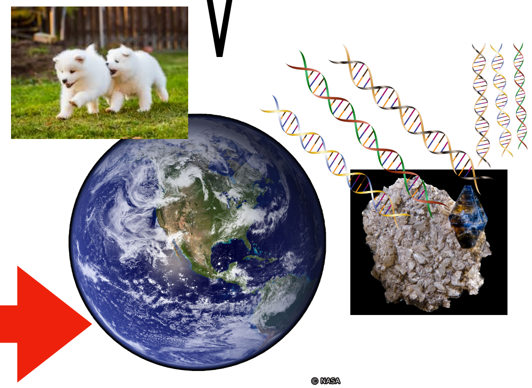
Outline

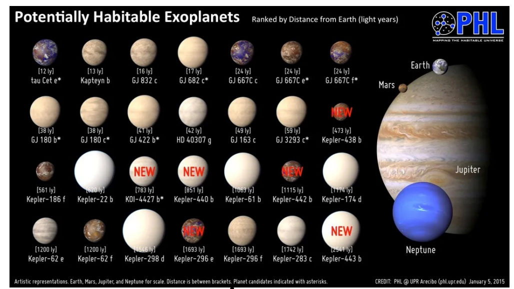
- 背景
  - 分野の目的
  - 分子の観測
- これまでの観測結果(電波、赤外)
  - 銀河系内の星形成領域
    - 分子雲→星なしコア→原始星→原始惑星系円盤
  - 近傍の系外銀河
- TMTへの展望

地球の物質の起源は？



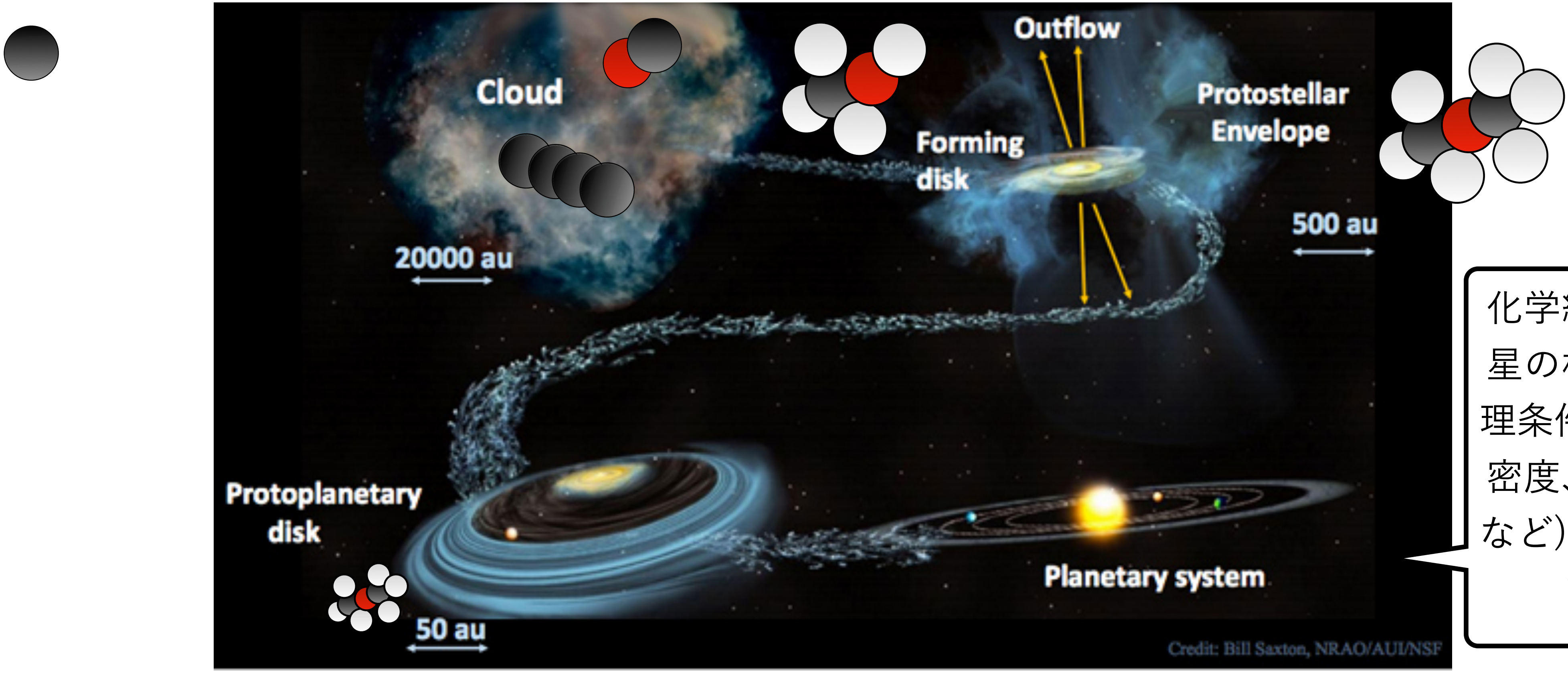
生命を作る物質や地球を構成する物質はいつ、どこでできたのか





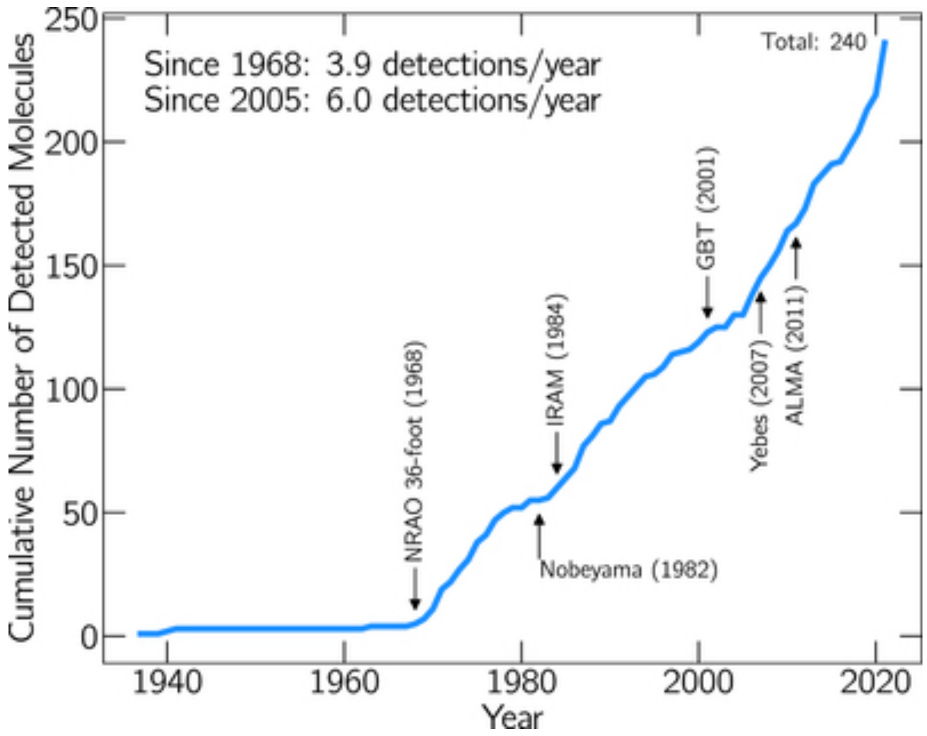
系外惑星の組成は？

星形成領域での物理条件の診断



化学組成から星の材料の物理条件(温度、密度、電離度など)を診断できる

これまでに検出された星間分子



McGuire et al. (2022)

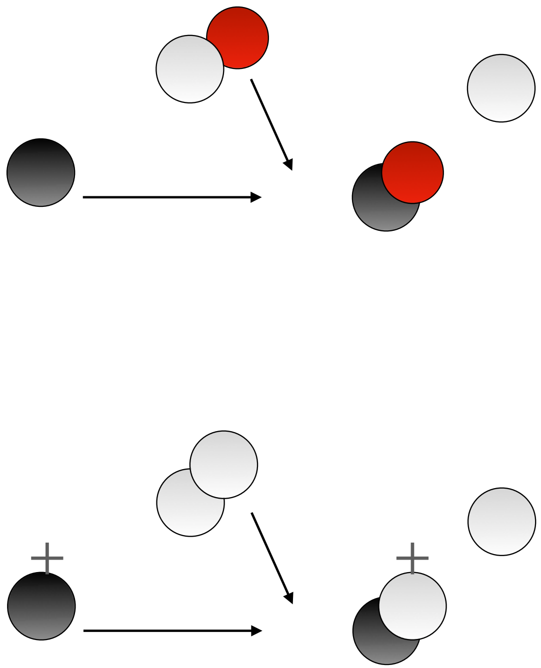
2 atoms	3 atoms	4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms	8 atoms	9 atoms	10 atoms	11 atoms	12 atoms	>12 atoms
CH^+	H_2O	NH_3	HC_3N	CH_3OH	CH_3CHO	$HC(O)OCH_3$	$(CH_3)_2O$	$(CH_3)_2CO$	HC_9N	c-$C_6H_6^*$	C_{60}^*
CH	HCO^+	H_2CO	HCOOH	CH_3CN	CH_3C_2H	CH_3C_3N	CH_3CH_2OH	$(CH_2OH)_2$	CH_3C_6H	n-C_3H_7CN	C_{70}^*
CN	HCN	HNCO	H_2CNH	NH_2CHO	CH_3NH_2	C_7H	CH_3CH_2CN	CH_3CH_2CHO	C_2H_5OCHO	i-C_3H_7CN	C_{60}^{+*}
OH	OCS	H_2CS	H_2NCN	CH_3SH	CH_2CHCN	CH_3COOH	HC_7N	CH_3C_5N	$CH_3OC(O)CH_3$	$C_2H_5OCH_3$	c-C_6H_5CN
CO	HNC	$C_2H_2^*$	H_2C_2O	$C_2H_4^*$	HC_5N	C_6H_2	CH_3C_4H	CH_3CHCH_2O	$CH_3C(O)CH_2OH$	1-c-C_5H_5CN	$HC_{11}N$
H_2	H_2S	C_3N	C_4H	C_5H	C_6H	CH_2OHCHO	C_8H	CH_3OCH_2OH	c-C_5H_6	2-c-C_5H_5CN	1-$C_{10}H_7CN$
SiO	N_2H^+	HNCS	SiH_4^*	CH_3NC	c-C_2H_4O	l-HC_6H^*	$CH_3C(O)NH_2$	c-C_6H_4	$HOCH_2CH_2NH_2$	CH_3C_7N (?)	2-$C_{10}H_7CN$
CS	C_2H	$HOCO^+$	c-C_3H_2	HCCCHO	H_2CCHOH	CH_2CHCHO	C_8H^-	H_2CCCHC_3N	H_2CCCHC_4H	n-C_3H_7OH	c-C_9H_8
SO	SO_2	C_3O	H_2CCN	l-C_4H_2	C_6H^-	CH_2CCHCN	C_3H_6	C_2H_5NCO	$C_{10}H^-$	i-C_3H_7OH	1-c-C_5H_5CCH
SiS	HCO	l-C_3H	C_5^*	HC_3NH^+	CH_3NCO	H_2NCH_2CN	CH_3CH_2SH	$C_2H_5NH_2$ (?)	$H_2C(CH)_3CN$?	$(CH_3)_2C{=}CH_2$	2-c-C_5H_5CCH
NS	HNO	$HCNH^+$	SiC_4	C_5N	HC_5O	CH_3CHNH	CH_3NHCHO	HC_7NH^+			c-$C_5H_4CCH_2$
C_2^{**}	HCS^+	H_3O^+	l-C_3H_2	l-HC_4H^*	$HOCH_2CN$	CH_3SiH_3	HC_7O	E-$CH_3CHCHCN$			2-C_9H_7CN
NO	HOC^+	C_3S	CH_4^*	l-HC_4N	HCCCHNH	$H_2NC(O)NH_2$	HCCCHCHCN	Z-$CH_3CHCHCN$			C_6H_5CCH
HCl	c-SiC_2	c-C_3H	HCCNC	c-H_2C_3O	HC_4NC	$HCCCH_2CN$	H_2CCHC_3N	$CH_3C(CN)CH_2$			$CH_3OCH_2CH_2OH$ (2024)
NaCl	C_2S	HCCN	HNC_3	H_2CCNH	c-C_3HCCH	HC_5NH^+	$H_2CCCHCCH$	CH_2CHCH_2CN			1-$C_{12}H_7CN$ (2024)
KCl	C_3^*	H_2CN	H_2COH^+	C_5N^-	l-H_2C_5	CH_2CHCCH	HOCHCHCHO (2024)	$HOCH_2C(O)NH_2$			5-$C_{12}H_7CN$ (2024)
AlCl	CO_2^*	c-SiC_3	C_4H^-	HNCHCN	MgC_5N	MgC_6H	HC_7N^+ (2024)	CH_3CH_2CCH (2024)			1-$C_{16}H_9CN$ (2024)
AlF	CH_2	CH_3^*	HC(O)CN	SiH_3CN	CH_2C_3N	$C_2H_3NH_2$	$CH_2(CCH)_2$ (2024				2-$C_{16}H_9CN$ (2025)
PN	C_2O	C_3N^-	HNCNH	C_5S	NC_4NH^+	$(CHOH)_2$	$(CH_3)_2S$ (2025)				4-$C_{16}H_9CN$ (2025)
SiC	MgNC	PH_3	CH_3O	MgC_4H	MgC_5N^+	$HC_2(H)C_4$					$C_{24}H_{11}CN$ (2025)
CP	NH_2	HCNO	NH_4^+	CH_3CO^+	HC_5N^+ (2024)	C_7N^-					$C_{13}H_{10}$ (2025)
NH	NaCN	HOCN	H_2NCO^+	C_3H_3	HNC_5 (2024)	CH_3CHCO					3-$C_{12}H_7CN$ (2026)
SiN	N_2O	HSCN	$NCCNH^+$	H_2C_3S	$CH_2(CN)_2$ (2024	MgC_6H^+					4-$C_{12}H_7CN$ (2026)
SO^+	MgCN	H_2O_2	CH_3Cl	HCCCHS	HCCCHCN (2025)	Z-$(CH)_2(CN)_2$ (2024					
CO^+	$H_3^{+(*)}$	C_3H^+	MgC_3N	C_5O	CH_3CHS (2025)	CH_2CHCHS (2025)					
HF	SiCN	HMgNC	NH_2OH	C_5H^+	SiC_6 (2025)						
SiH?	AlNC	HCCO	HC_3O^+	$HCCNCH^+$							
FeO?	SiNC	CNCN	HC_3S^+	c-C_3C_2H							
O_2	HCP	HONO	H_2C_2S	HC_4S							
CF^+	CCP	MgC_2H	C_4S	$HMgC_3N$							
PO	AlOH	HCCS	HC(O)SH	MgC_4H^+							
AlO	H_2O^+	HNCN	HC(S)CN	$H_2C_3H^+$							
OH^+	H_2Cl^+	H_2NC	HCCCO	H_2C_3N							
CN^-	KCN	$HCCS^+$	NaCCCN	$(HO)_2CO$							
SH^+	FeCN	CH_3^+	MgC_3N^+	H_2CNCN (2024)							
SH	HO_2	HCNS (2024)	HC_3N^+ (2024)	NCHCCS (2024)							
HCl^+	TiO_2	$HOCS^+$ (2024)	HC_3S (2024)	c-H_2C_3S (2025)							
TiO	C_2N	HNSO (2024)	NC_3S (2024)	SiC_5 (2025)							
ArH^+	Si_2C	l-SiC_3 (2025)		l-H_2C_3O (2026)							
N_2	HS_2										
NO^+	HCS										
NS^+	HSC										
HeH^+	NCO										
PO^+	CaNC										
SiP ?	NCS										
FeC	MgC_2										
MgS (2024)	HSO										
NaS (2024)	CaC_2 (2024)										
CaS (2025)											

> 340分子種

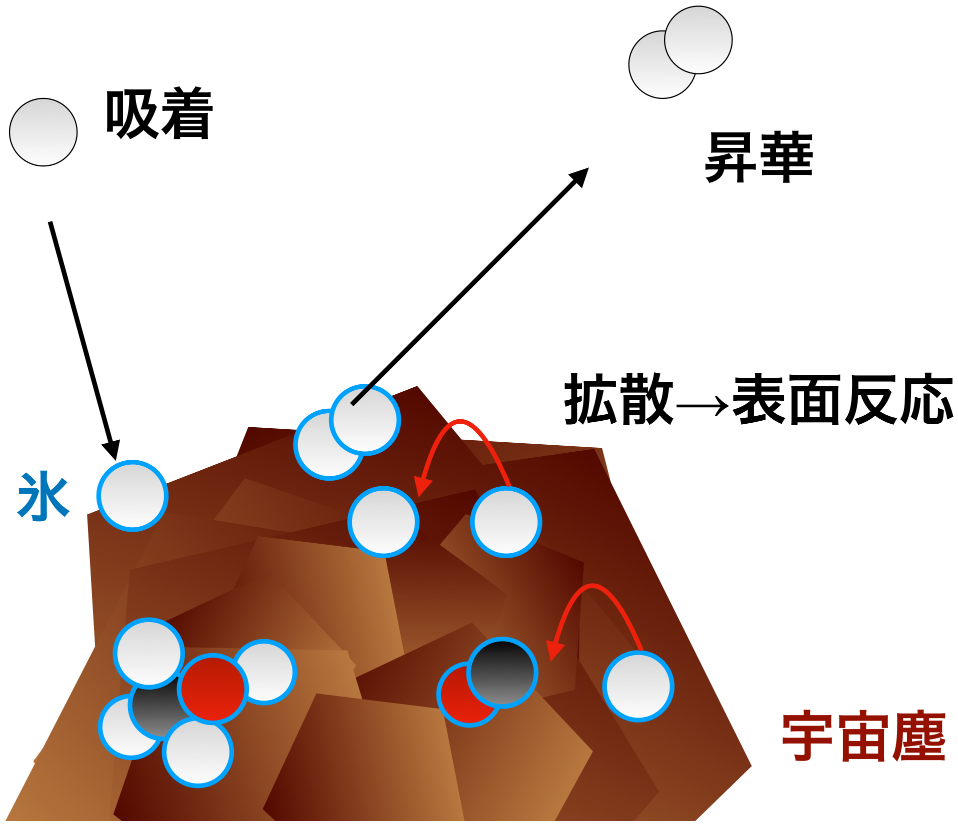
Gas-grain models: Hasegawa et al. (1992), Garrod & Herbst (2006)

星間化学的プロセス

気中の反応



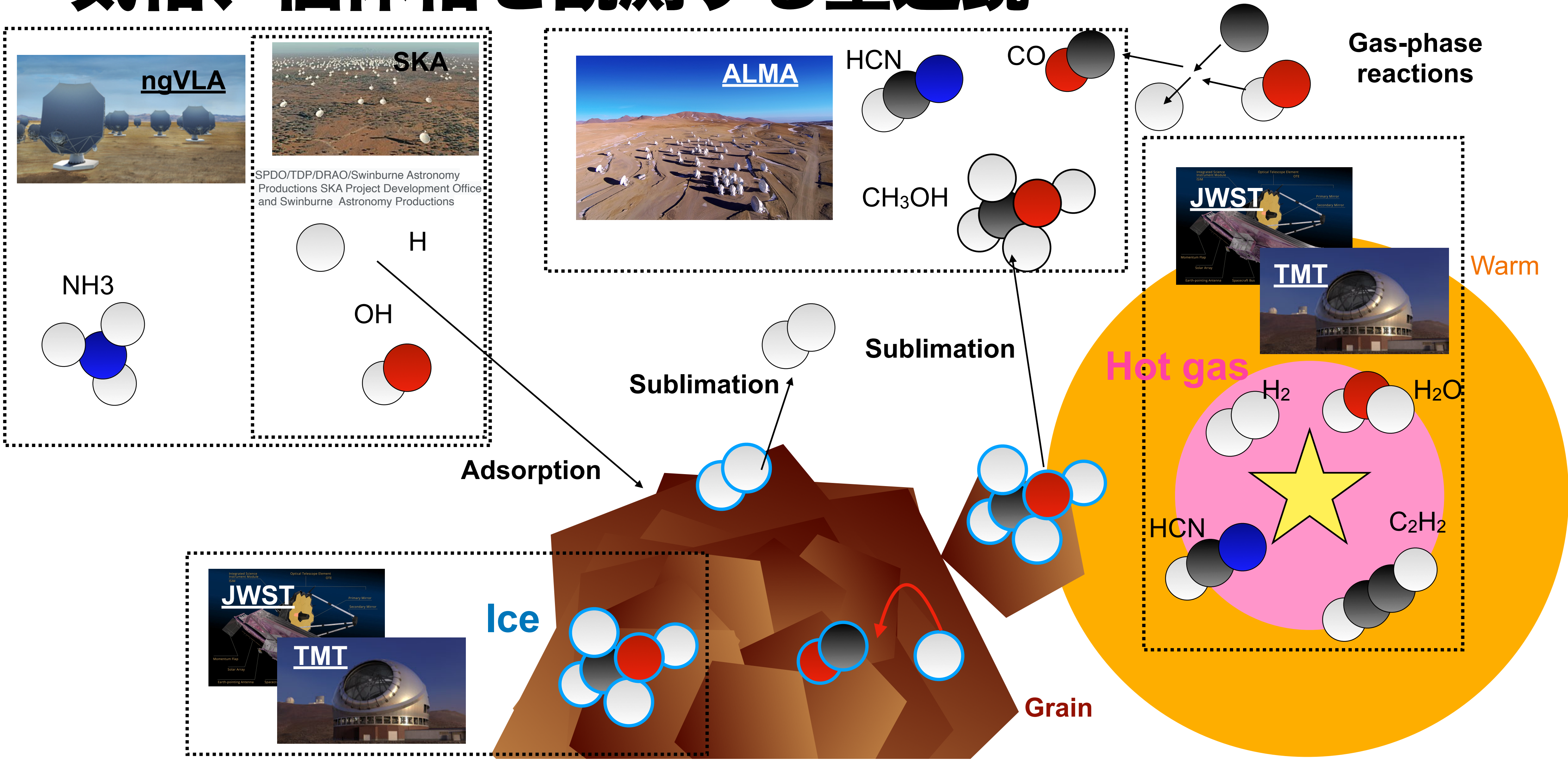
宇宙塵の表面上反応



分子の遷移

- 量子状態
  - 電子的遷移 (~10^4K)
    - 分子の初観測 1937年 (later identified in 1941)
  - 振動遷移 (~10^3K)
    - 暖かいガス→JWST, TMTなどの赤外線
  - 回転遷移 (~10 K)
    - 冷たいガス→ ALMAなどのミリ波、サブミリ波

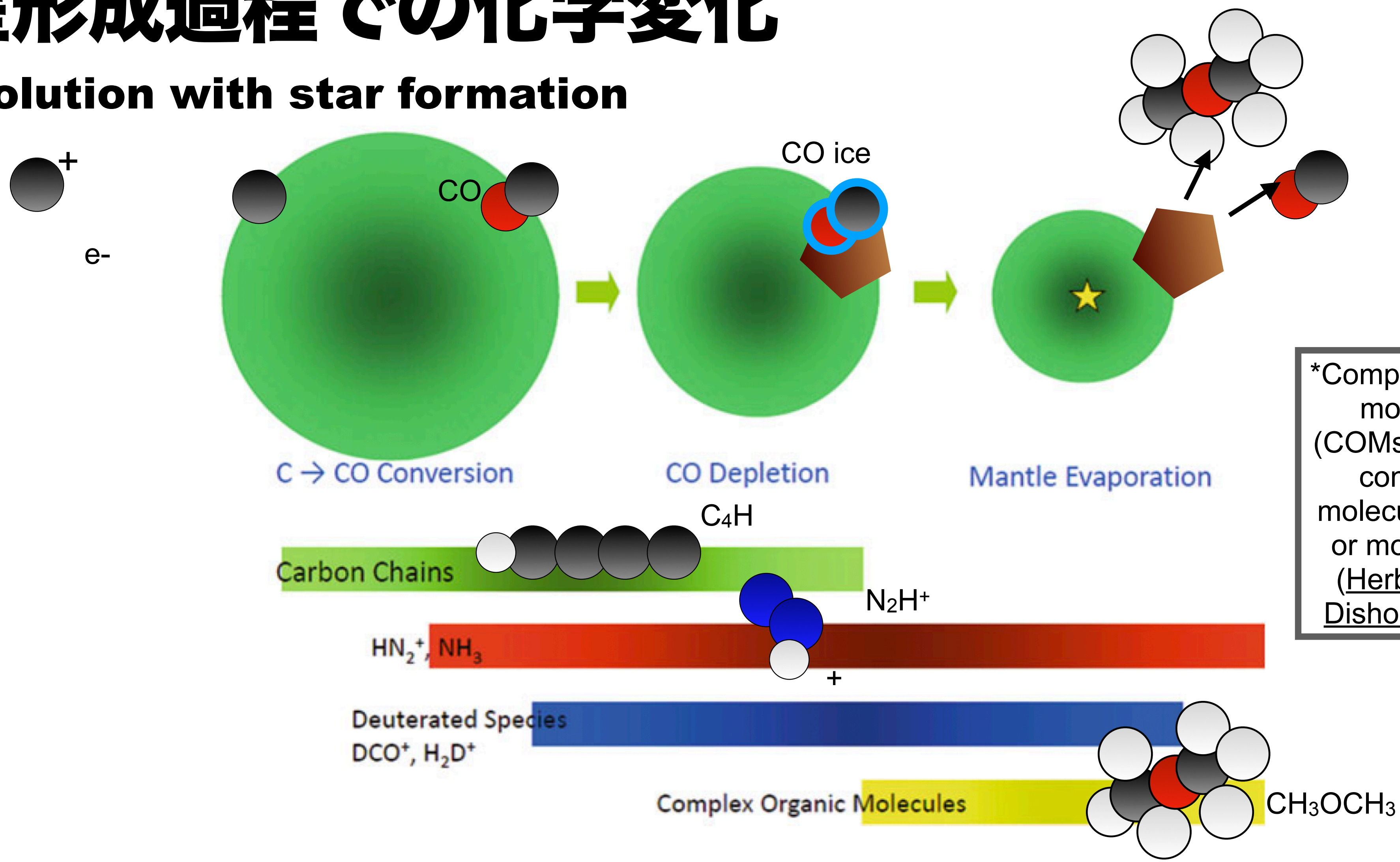
気相、個体相を観測する望遠鏡



Yamamoto et al. (2017)

星形成過程での化学変化

Evolution with star formation

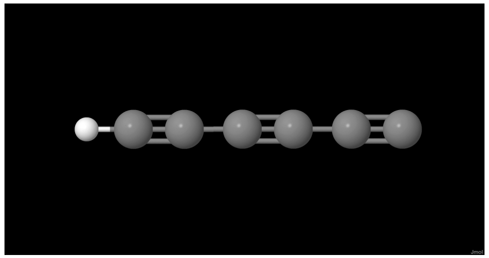


*Complex organic molecules (COMs): Carbon-containing molecules with 6 or more atoms (Herbst & van Dishoeck 2009)

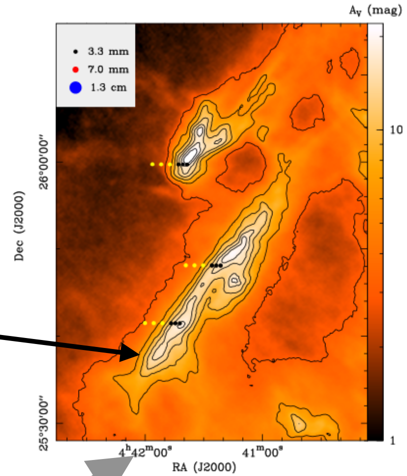
高密度分子雲

- 星なしの高密度雲 - T~10K, n~10^4 cm^{-3}

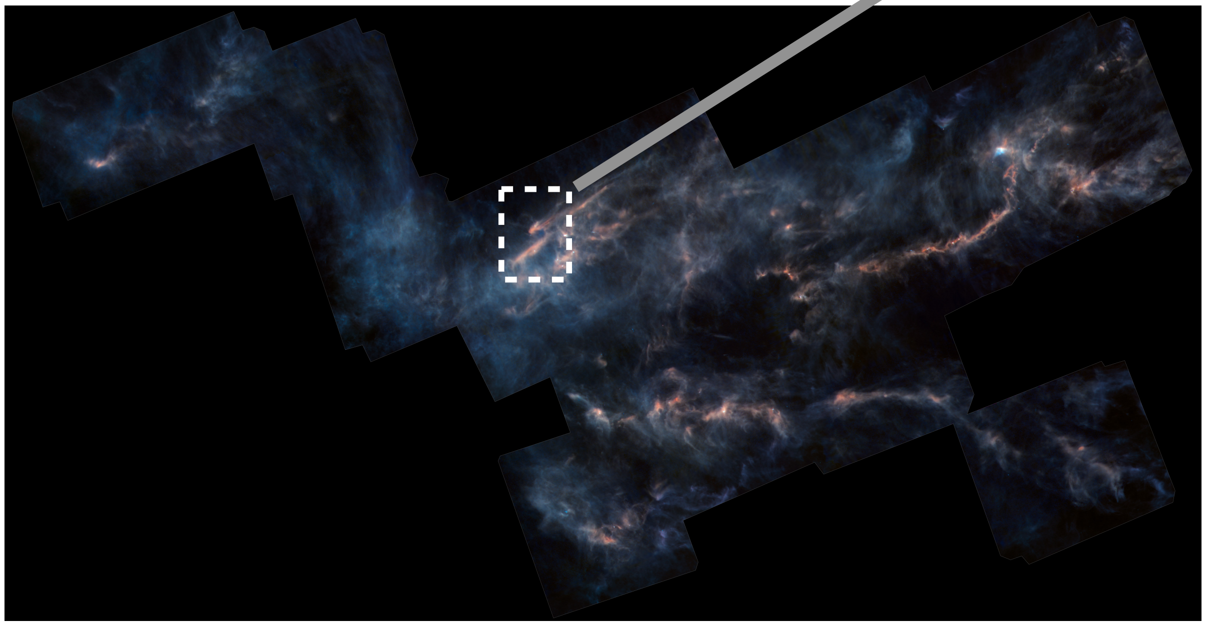
冷たい分子雲：
炭素原子がCOに変わりきっていないため、飽和されていない分子も多くある。



Fuente et al. (2019)

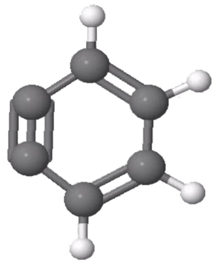


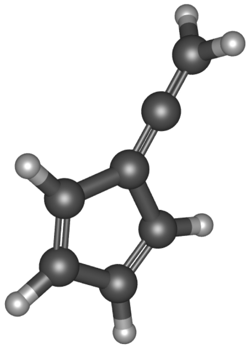
Taurus Molecular Cloud-1
Cyanopolyyne Peak
(TMC-1 CP)

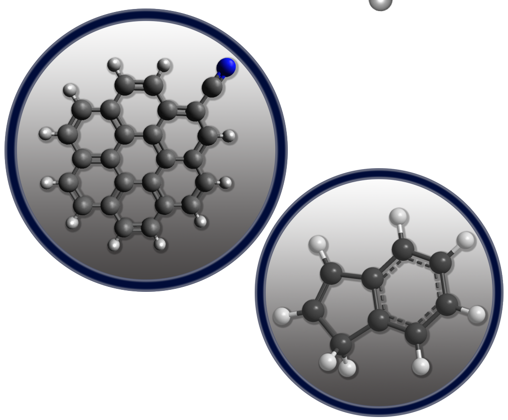


高密度分子雲

Extensive surveys of a dense cloud TMC-1

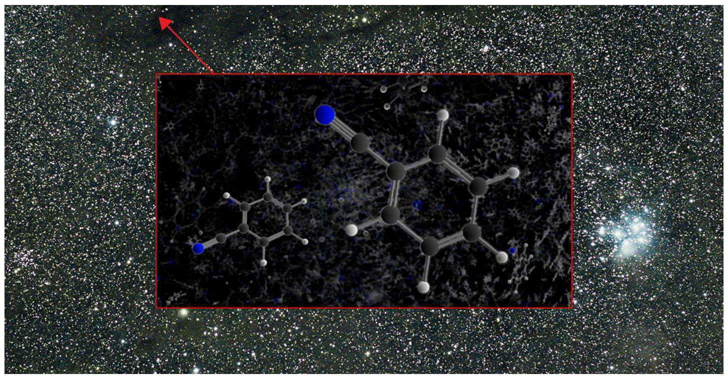




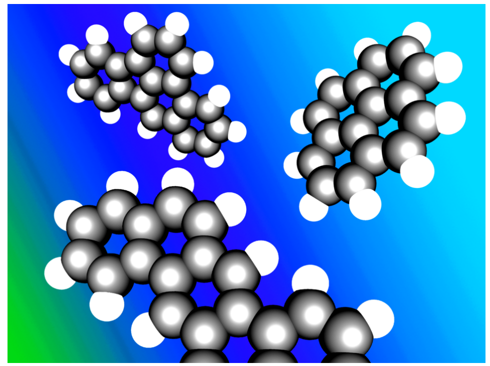


ベンゼン環を含む分子の発見

Recent deep surveys
Yebes 40m QUIJOTE survey
(Cernicharo et al. 2021, 2022, etc).,
GBT GOTHAM survey
(McGuire et al. 2020)

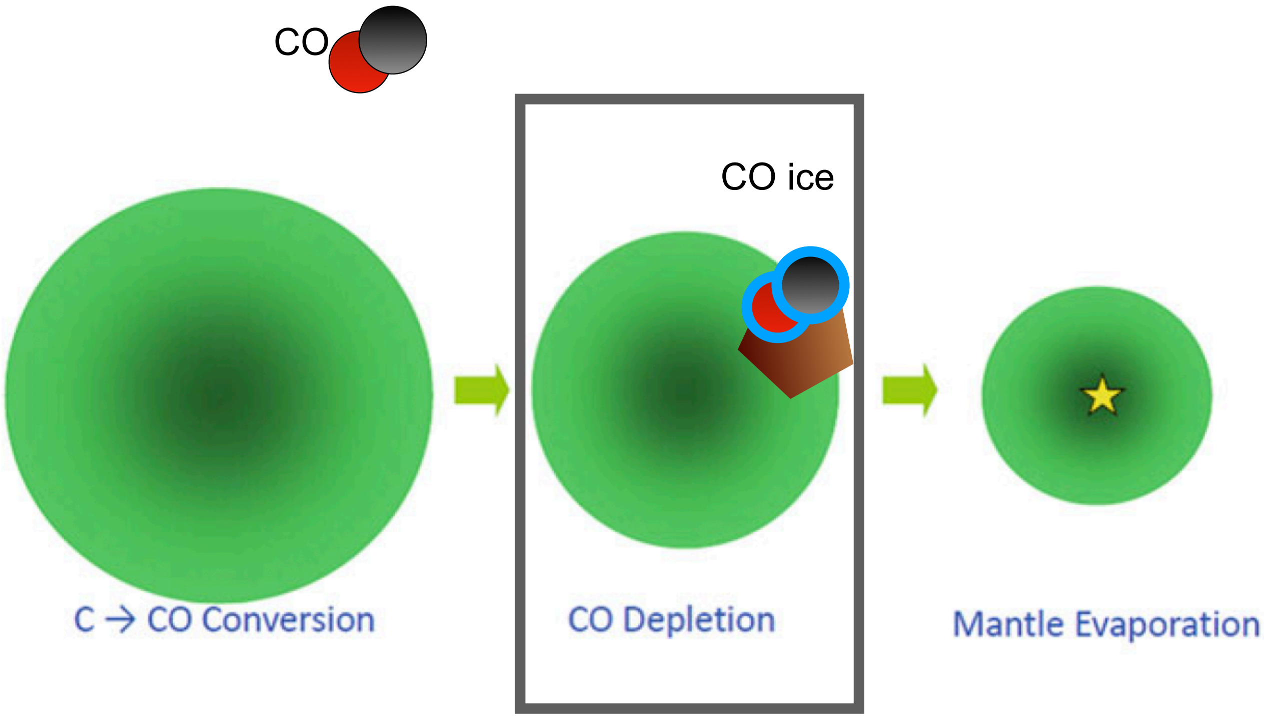


PAHの起源

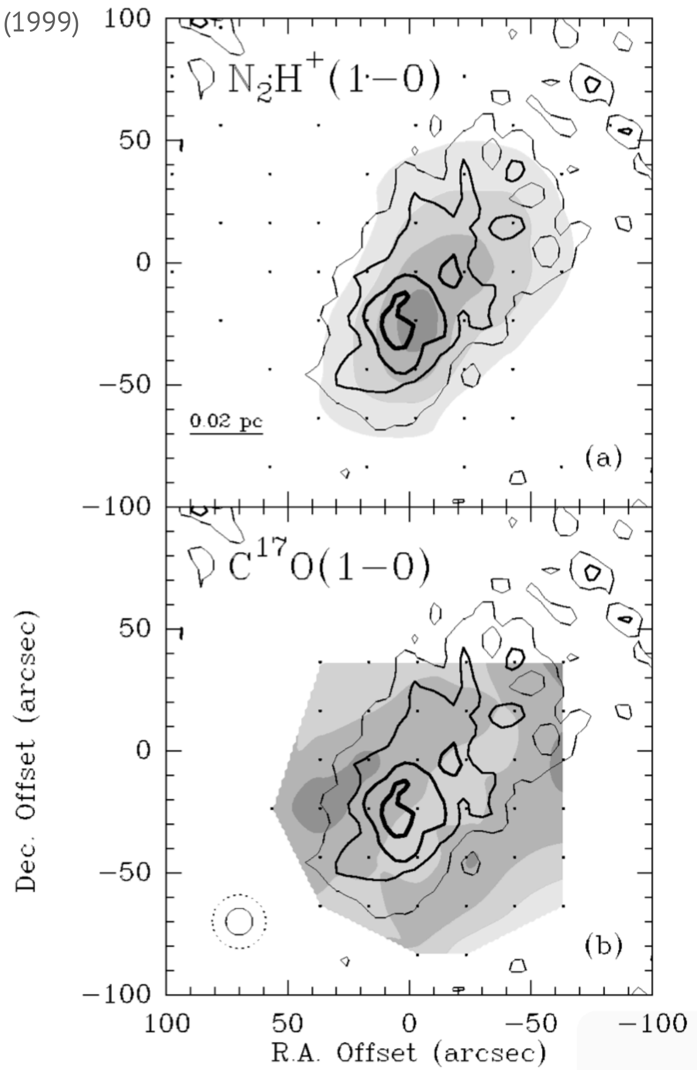


- **小さい分子から生成？(bottom up)**
- **大きい分子を一気に生成？ (top down)**
    - 漸近巨星分枝（AGB star）など

星なしコア



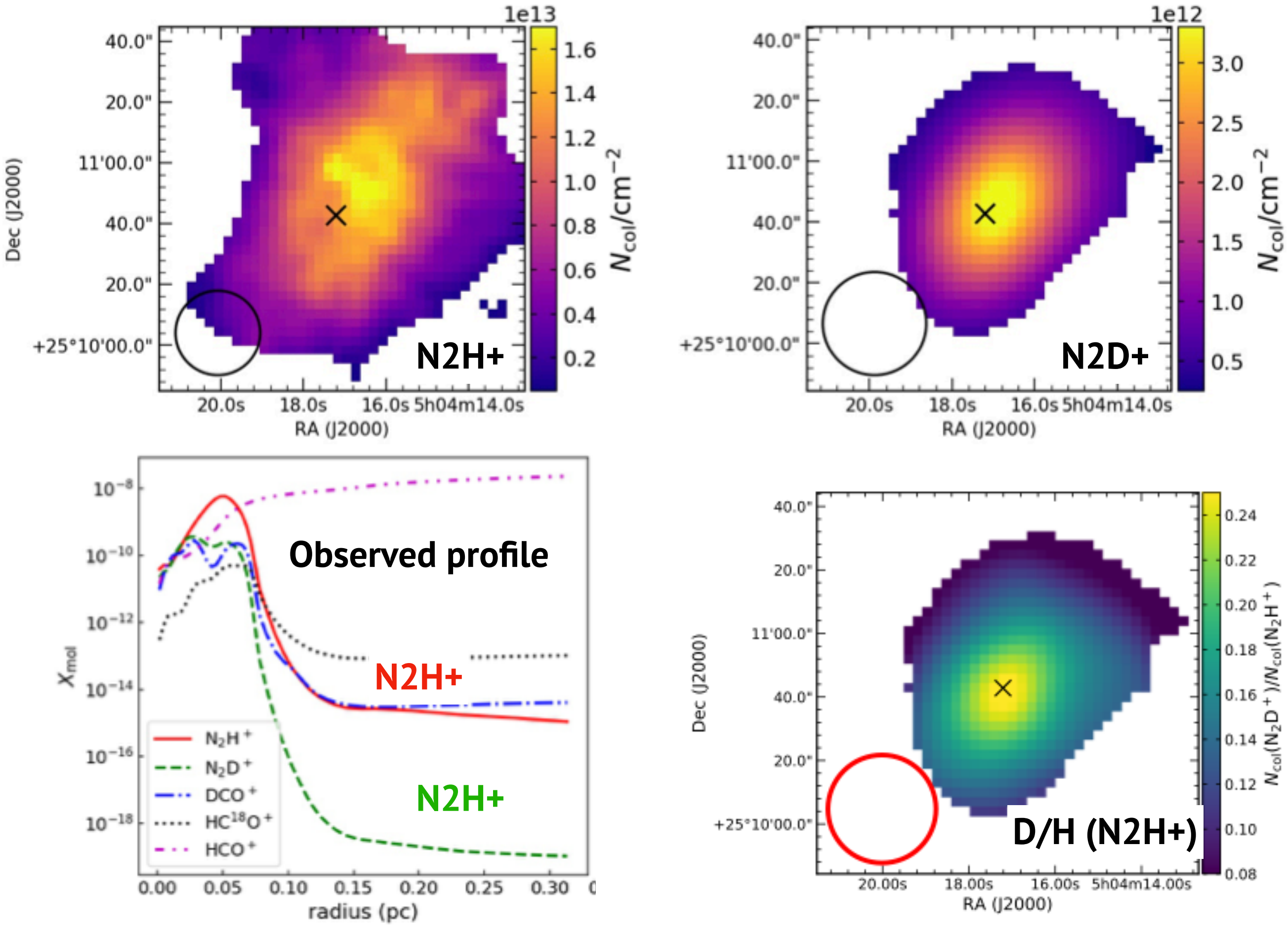
Caselli et al. (1999)



星なしコア

Deuterium fraction

Radaelli et al. (2019)



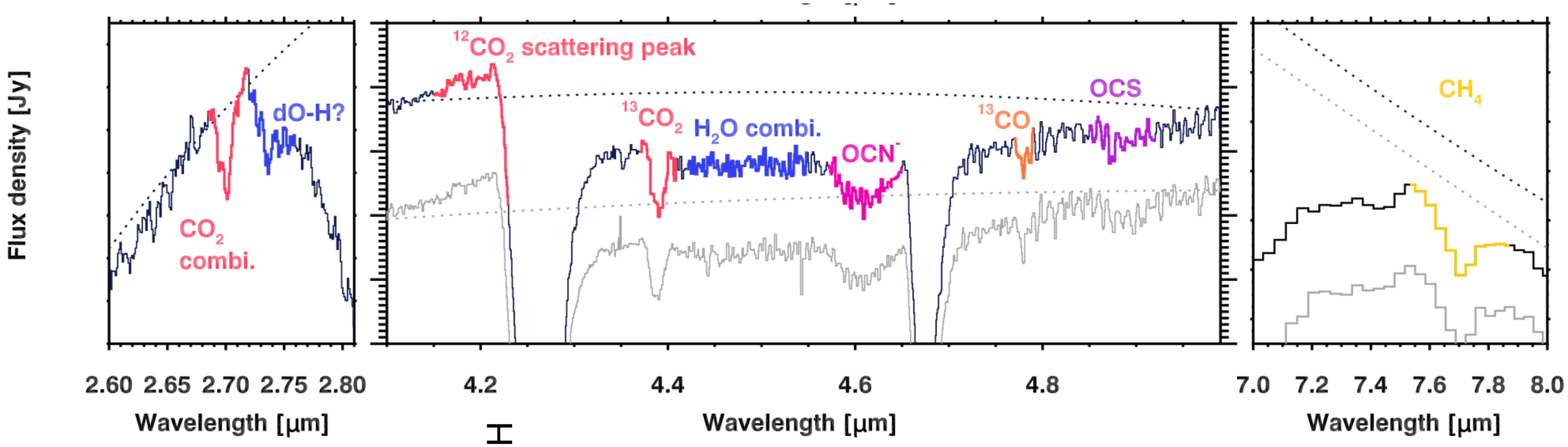
- ALMA observations of L1544
- D/H比が時間とともに増加する
- 時間が経ったコアを見つけることができる

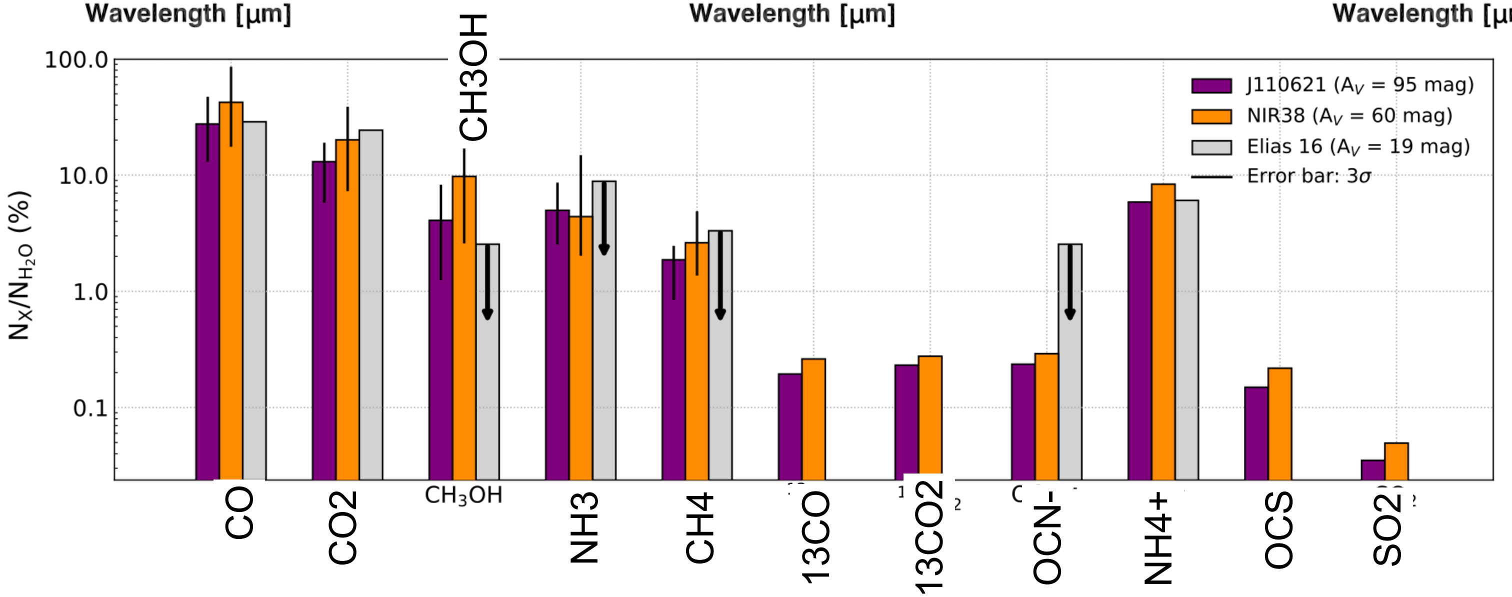
星なしコアの氷

JWST NIRSpec, MIRI, NIRCam

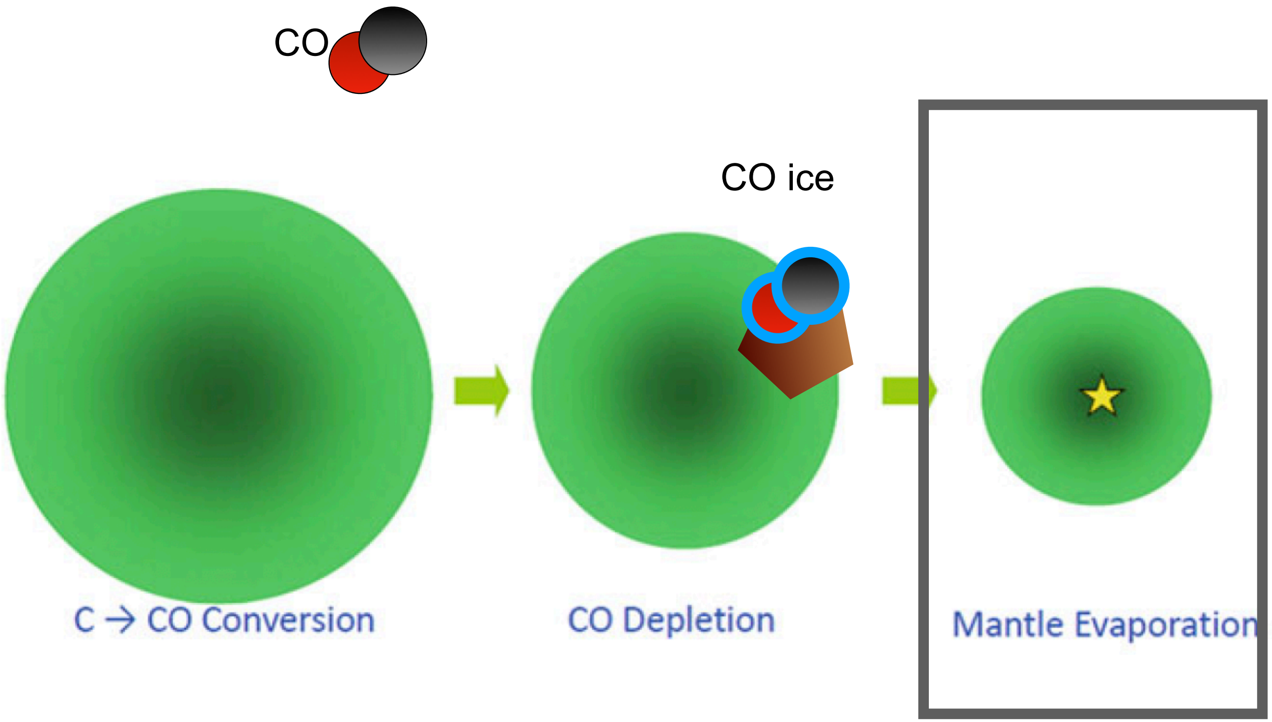
McClure et al. (2023)

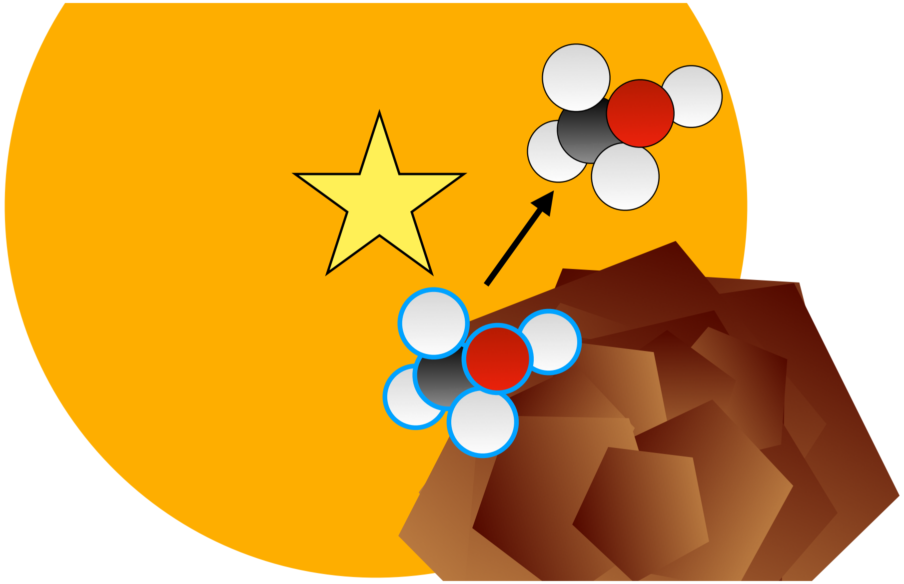
- いつ氷が発達する？
- JWSTによる観測：比較的早いうちに様々な氷(CO2, CH3OH)が発達している

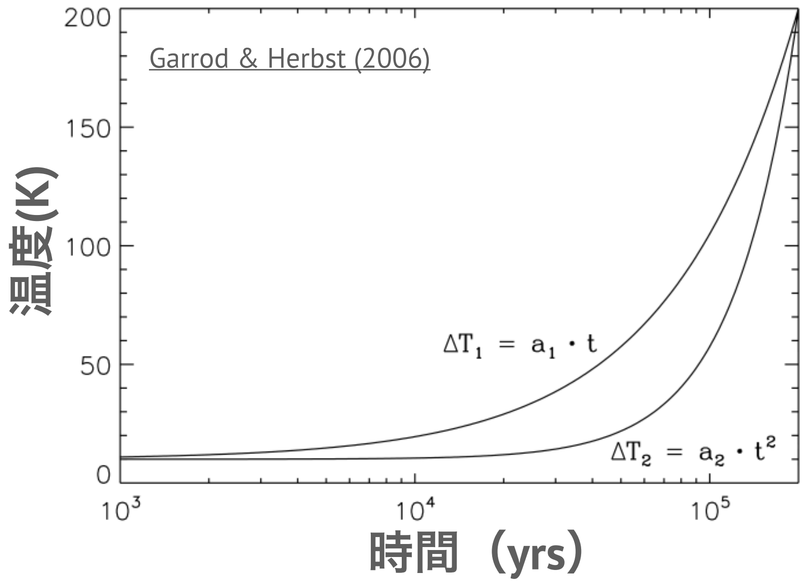




原始星(Class 0/I)

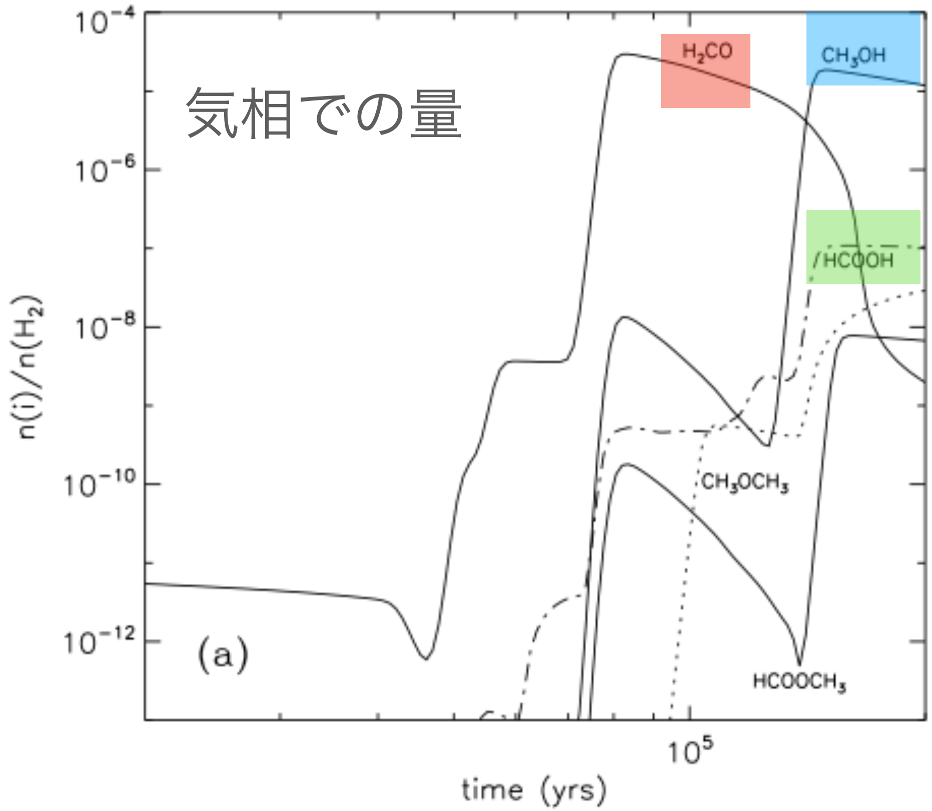

CO
CO ice
C → CO Conversion
CO Depletion
Mantle Evaporation

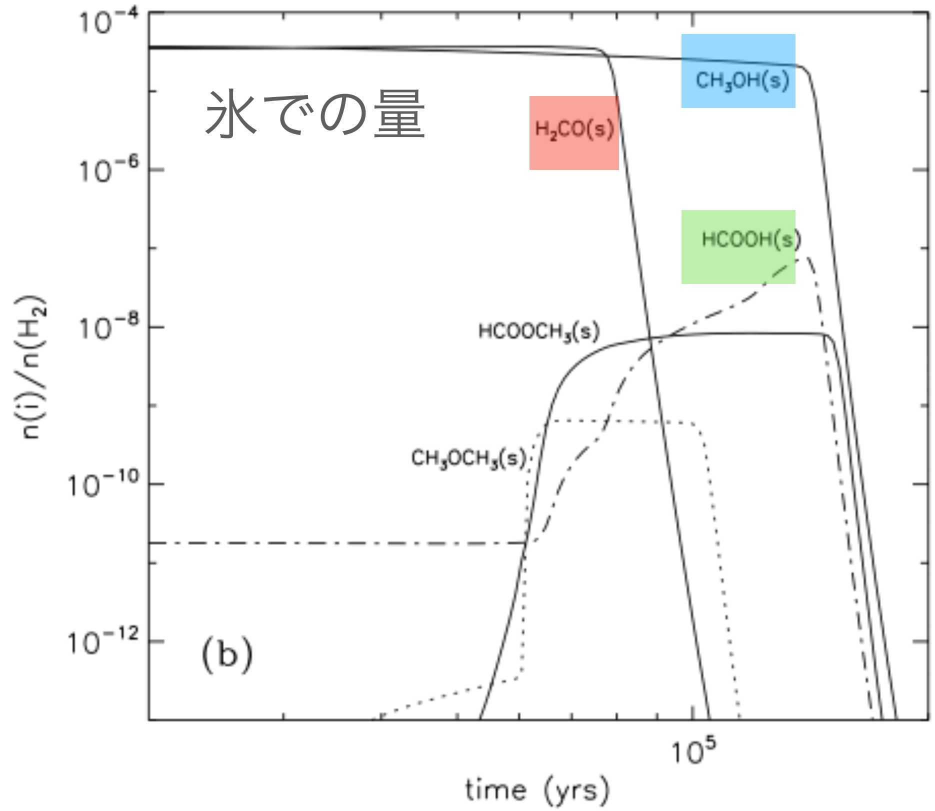



Garrod & Herbst (2006)
温度(K)
200
150
100
50
0
$\Delta T_1 = a_1 \cdot t$
$\Delta T_2 = a_2 \cdot t^2$
10^3
10^4
10^5
時間（yrs）

原始星
複雑な有機分子

Garrod & Herbst (2006)

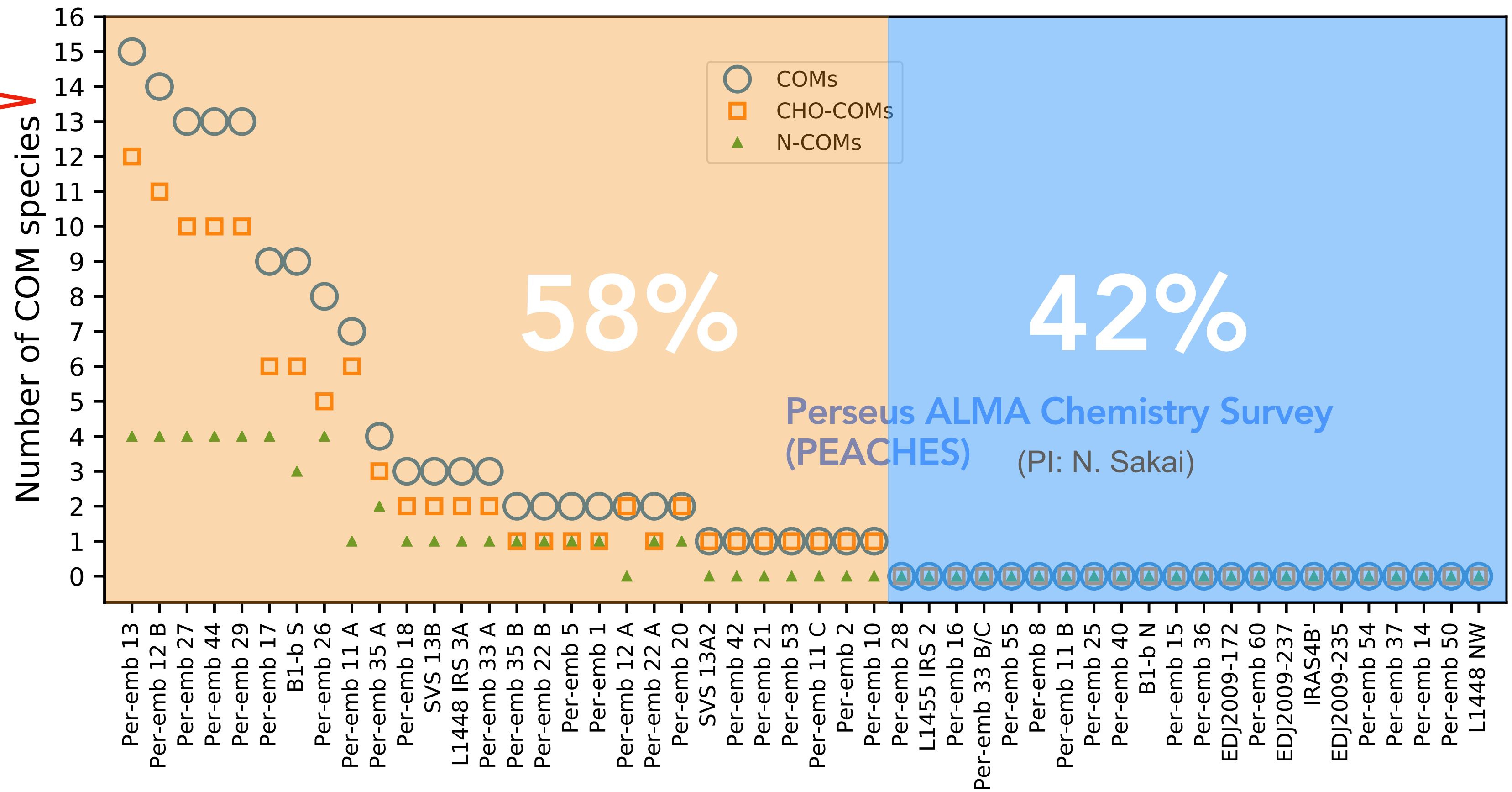




See also PILS survey (Jørgensen et al.)

原始星

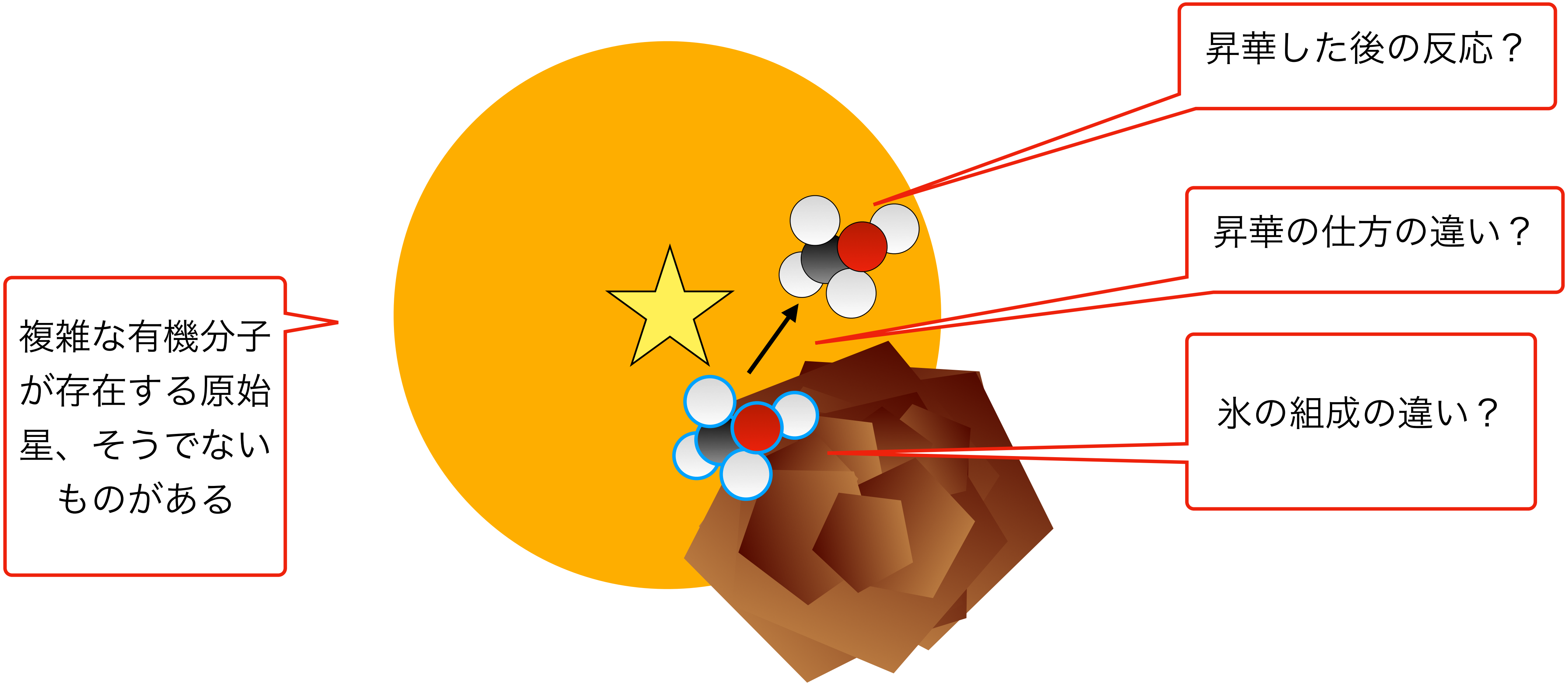
複雑な有機分子
(原子６個以上の
炭素を含む分子)
が存在する原始
星、そうでない
ものがある



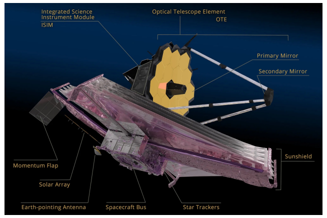
Yang et al. (2021)

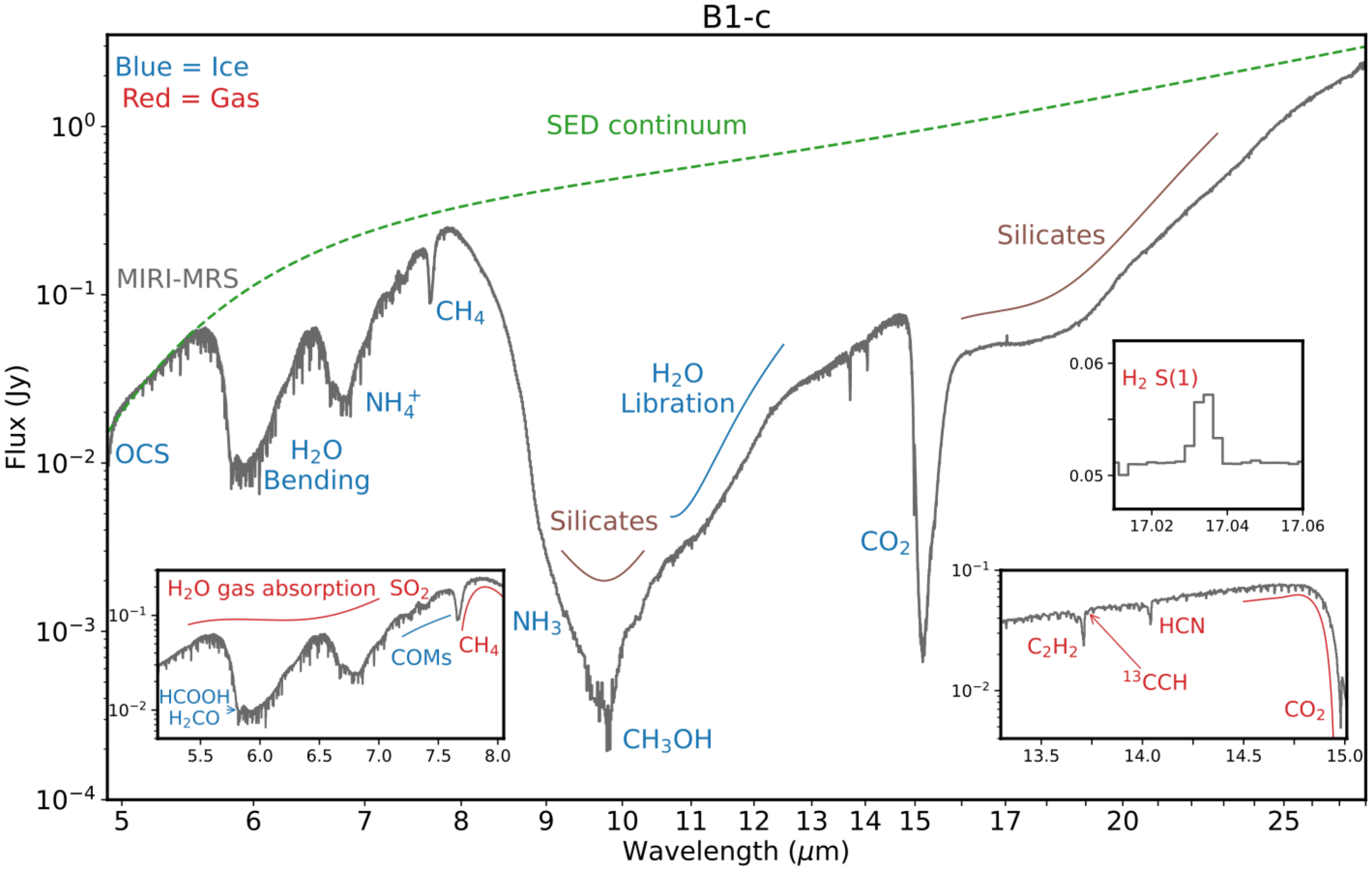
A slide in part courtesy of Yao-lun Yang

原始星



原始星周りの氷



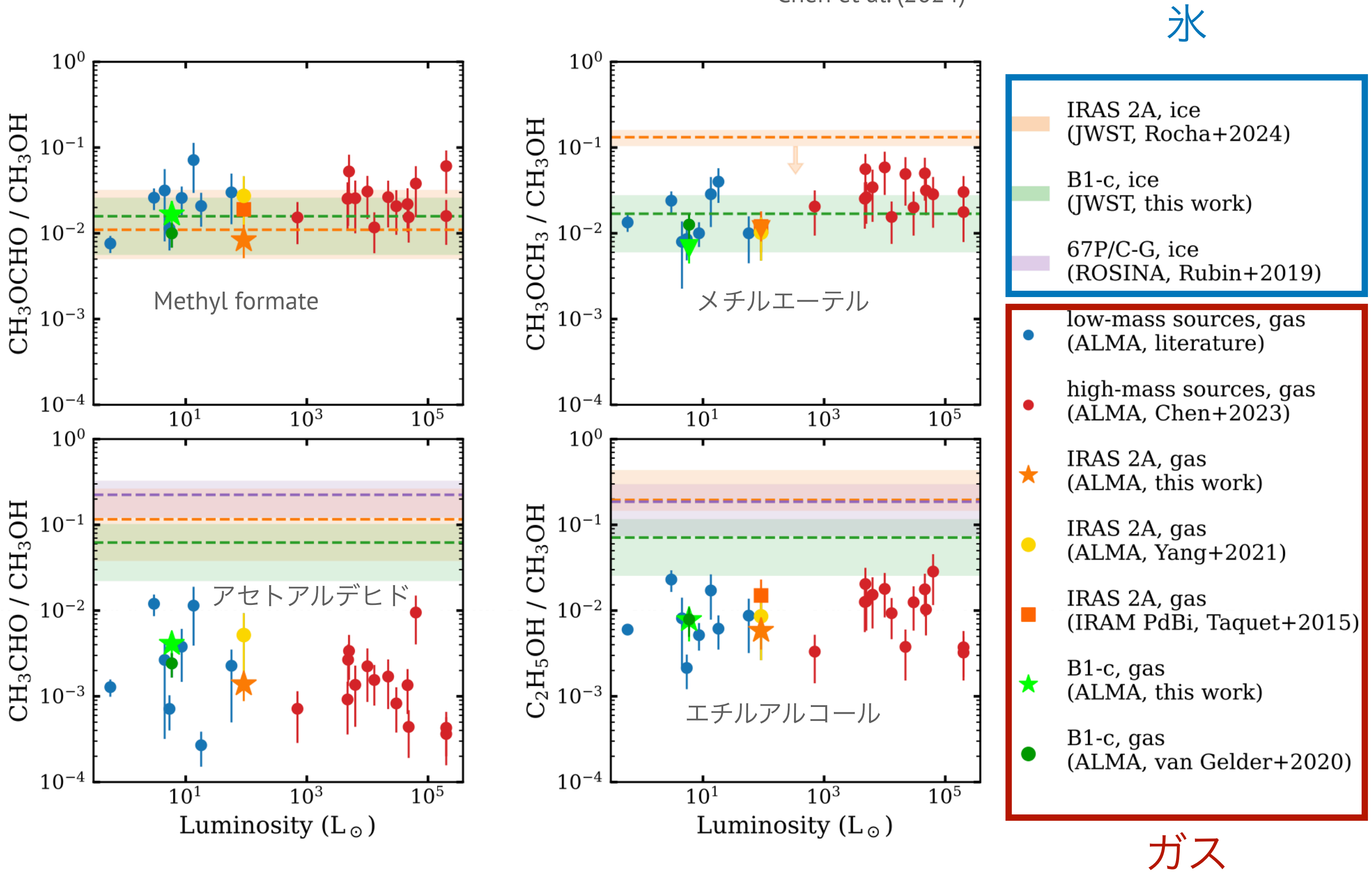


van Dishoeck et al. (2025)

- JWSTは吸収線で氷を観測することができる
- 複雑な有機分子を含む多数の分子の検出

原始星周りの氷

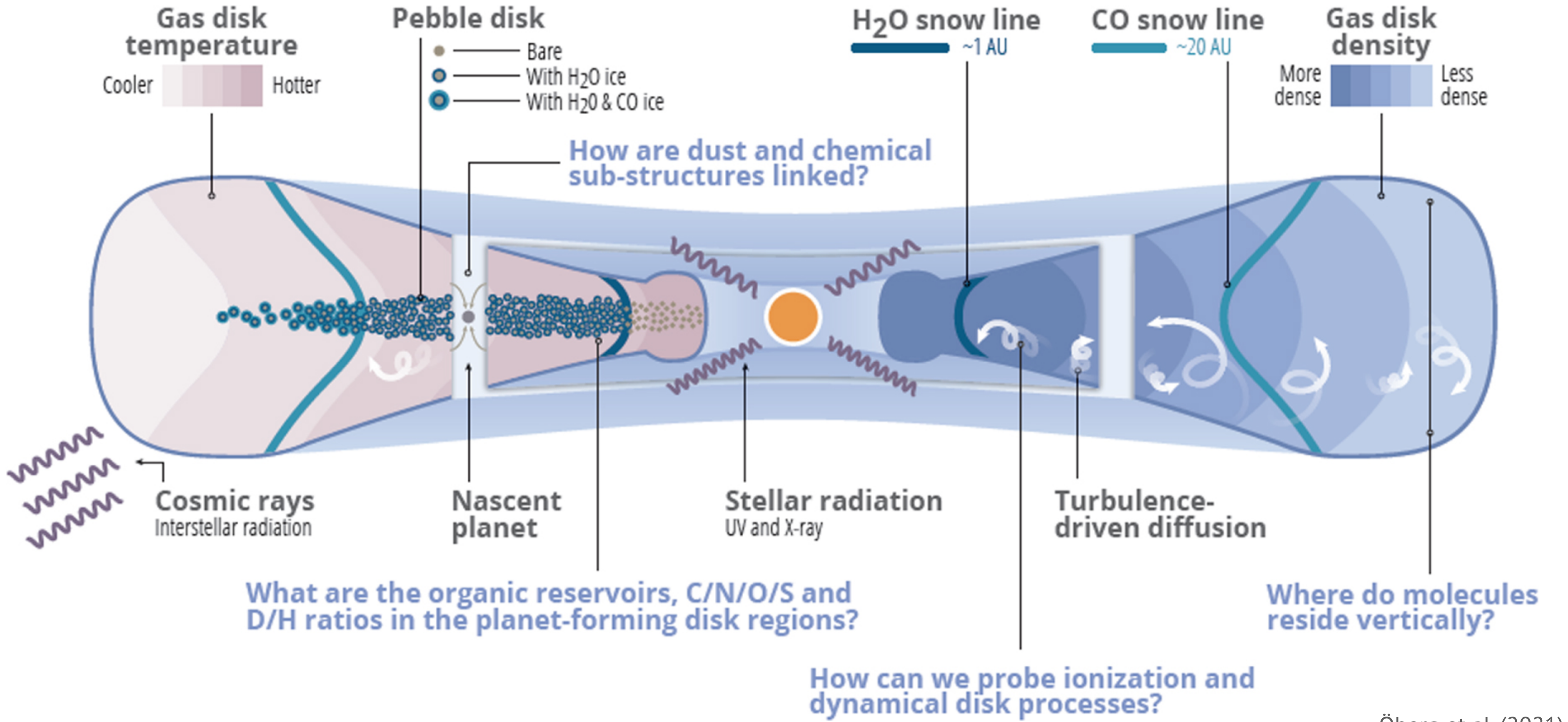
Chen et al. (2024)



- 氷とガスの組成が似た分子種もあれば違うものもある

原始惑星系円盤 (Class II)

Molecules on planets - inheritance or in-situ?



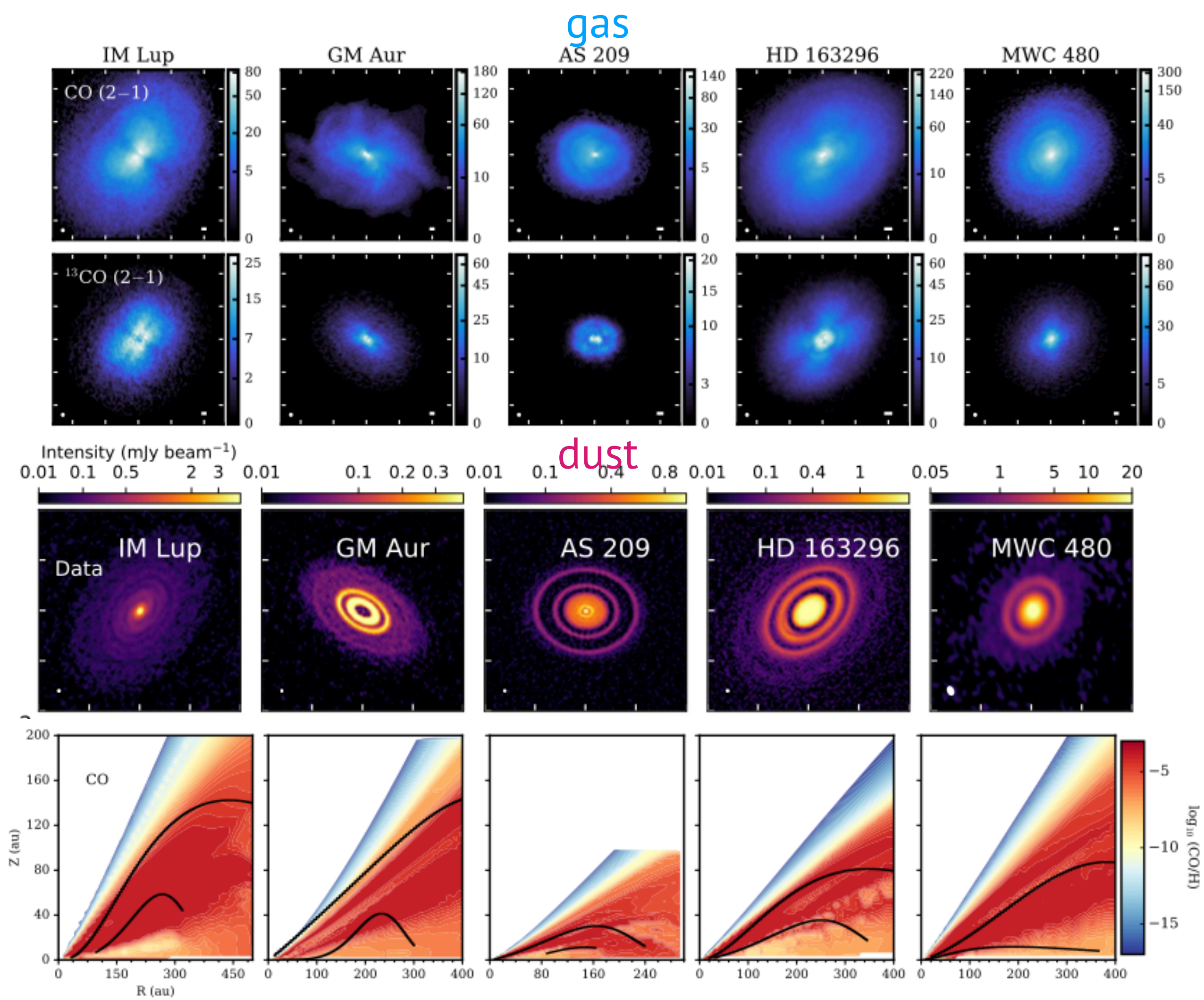
Öberg et al. (2021)

原始惑星系円盤

- ガスの質量の測定にCOが使われてきた
- ダストから得た質量に比べCOからの質量は1–2桁少ない
- CO/H2が減量？
    - CO iceへ変化?
    - CO2へ変化?

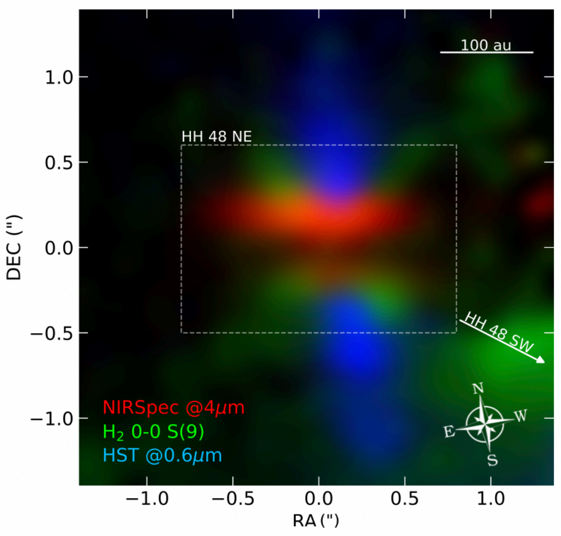
ALMA observations

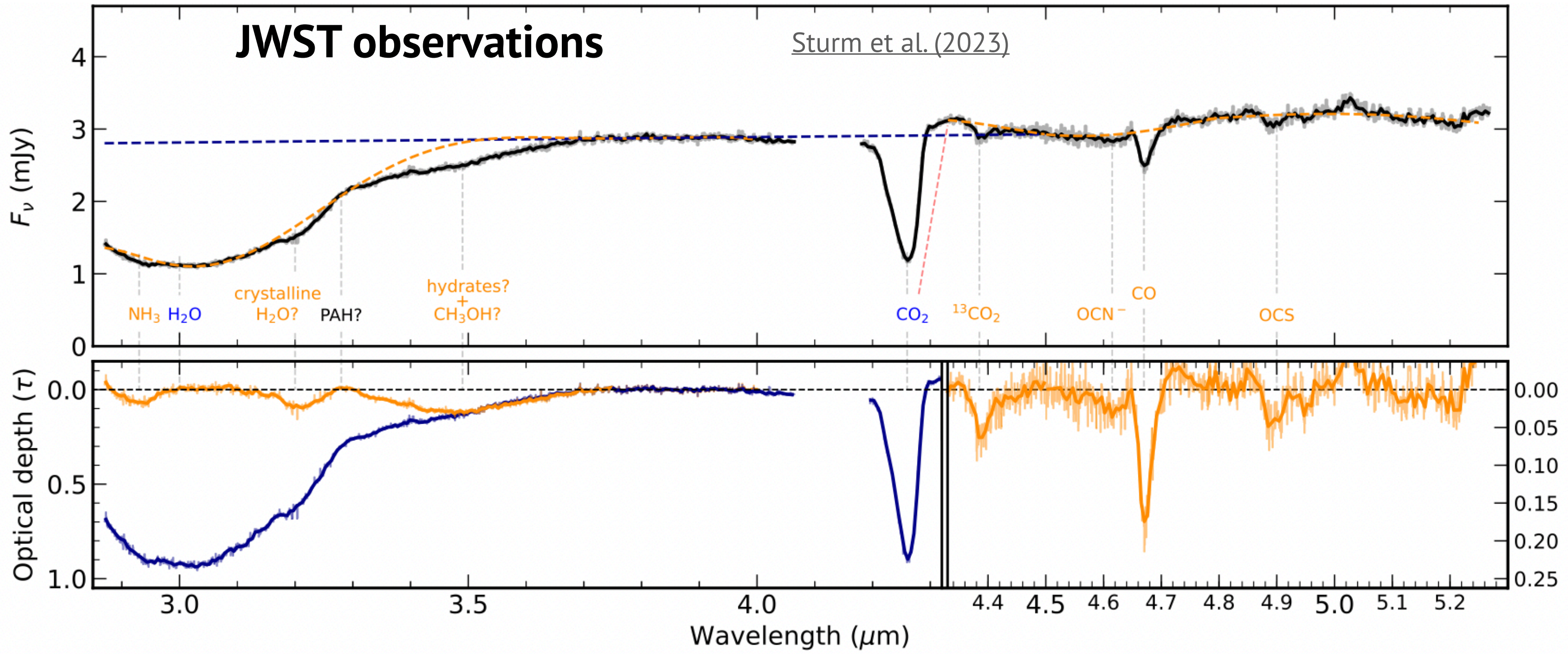
Zhang et al. (2021)



原始惑星系円盤

- Optically thick CO_2 ice (from $^{13}CO_2$)
- CO ice even higher up in the disk
- Large amounts of ice could explain the gas-phase depletion of CO

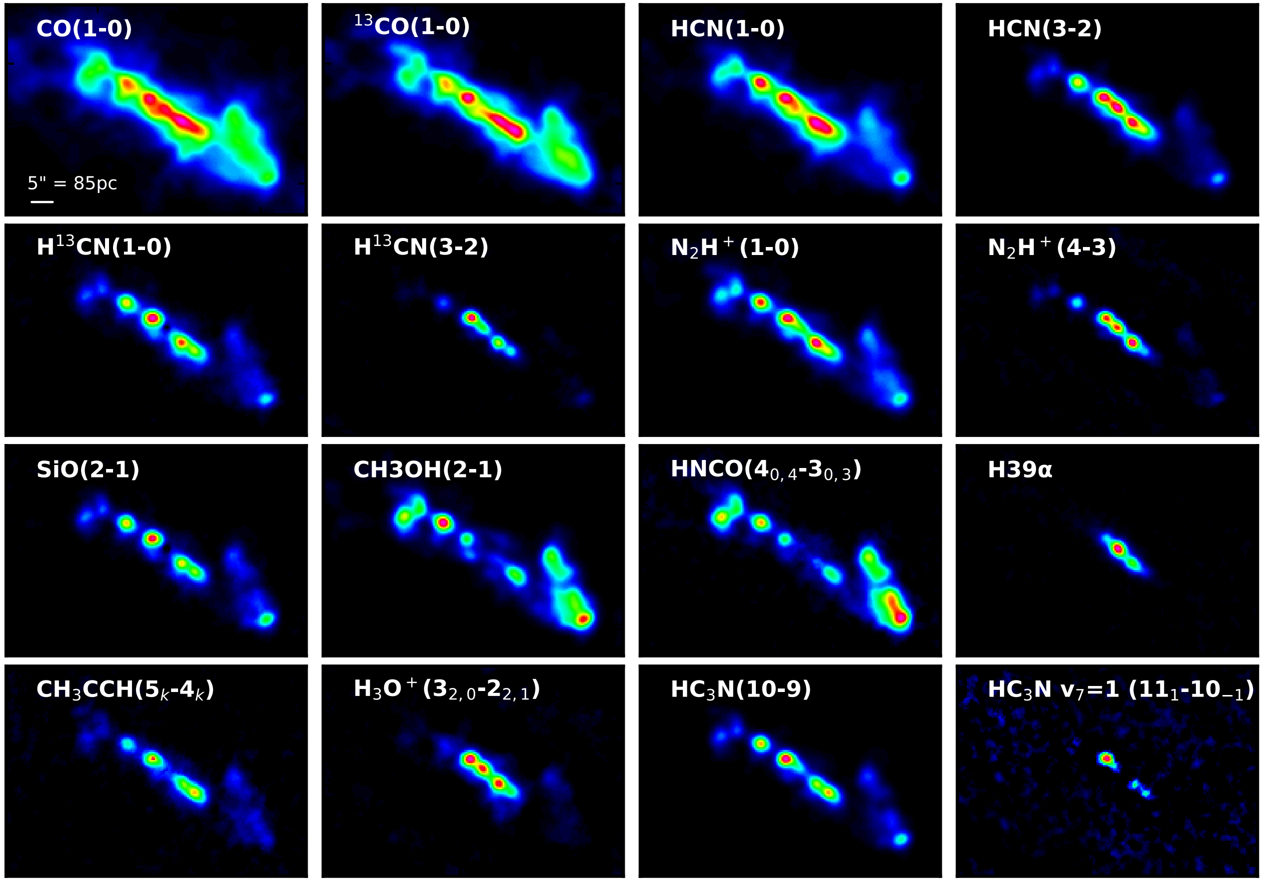


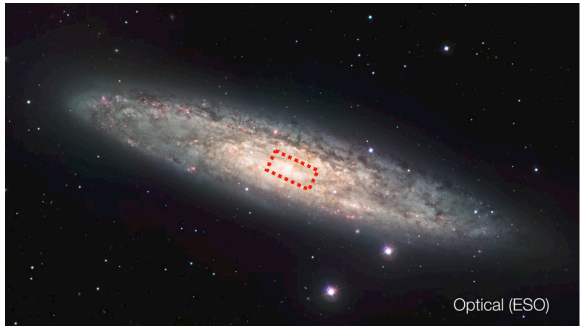


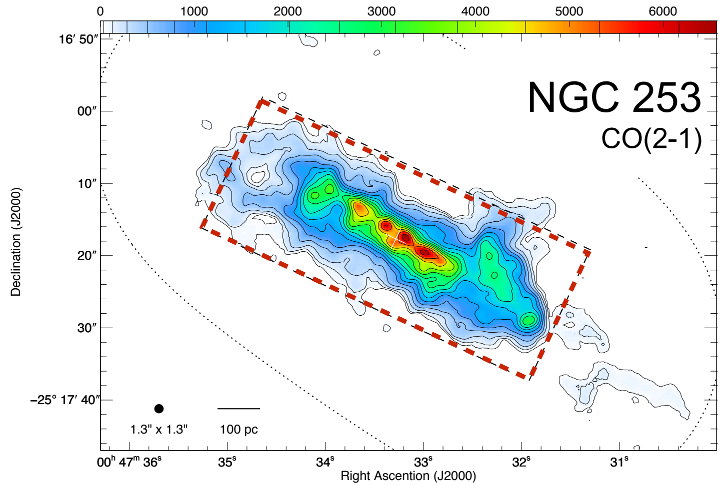
スターバースト銀河

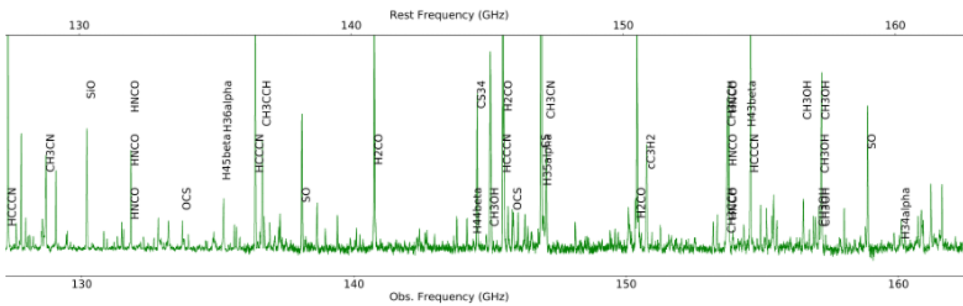
Astrochemistry

ALMA large program ALCHEMI shows rich chemistry







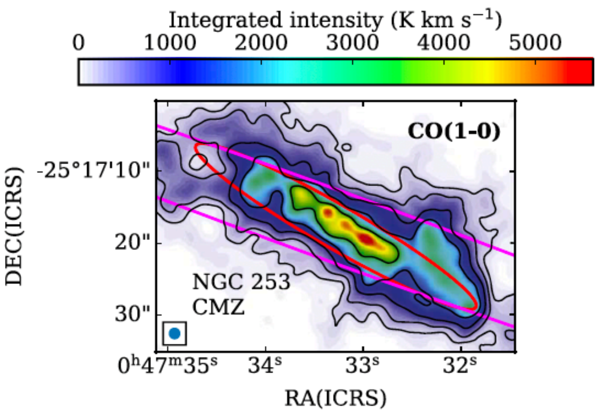


スターバースト銀河

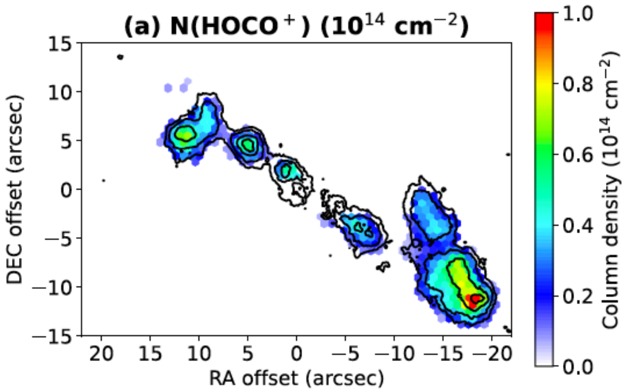
ガス&氷の存在量の比較

ALCHEMI Finds a "Shocking" Carbon Footprint in the Starburst Galaxy NGC 253

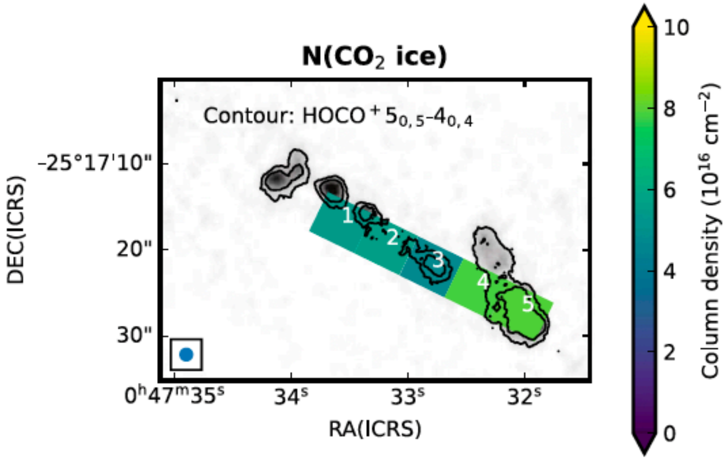
軌道の交差点
（ショック）



プロトン化した
CO2
(HOCO+)



AKARIで観測された
CO2氷

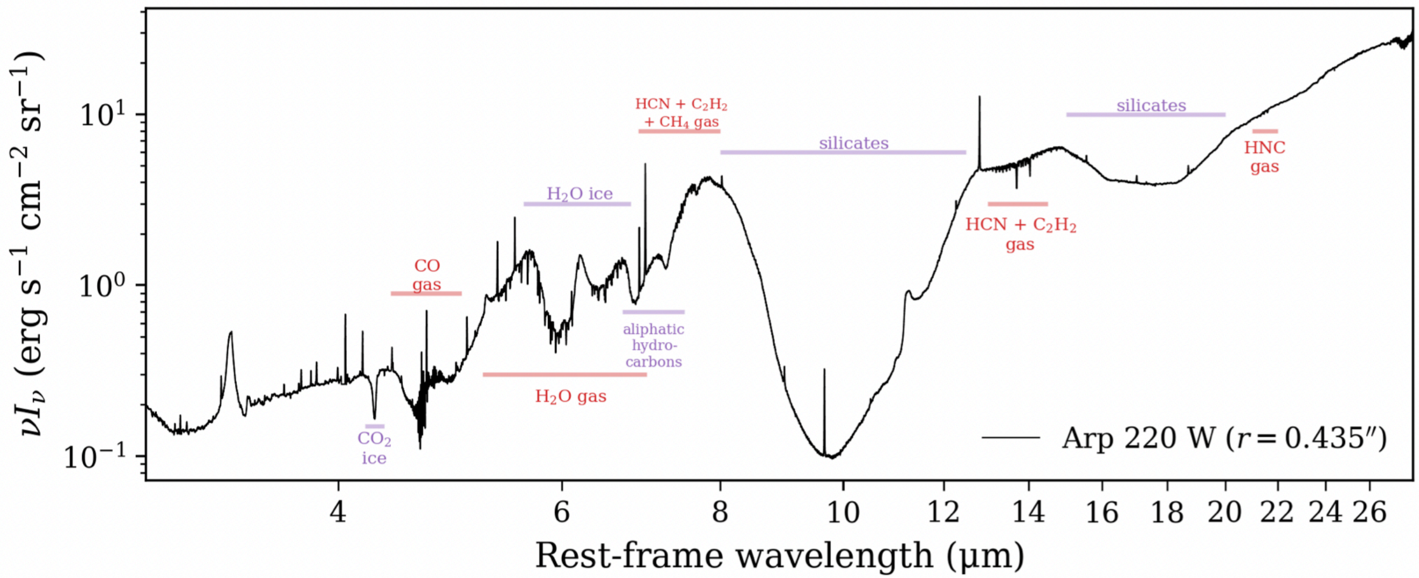


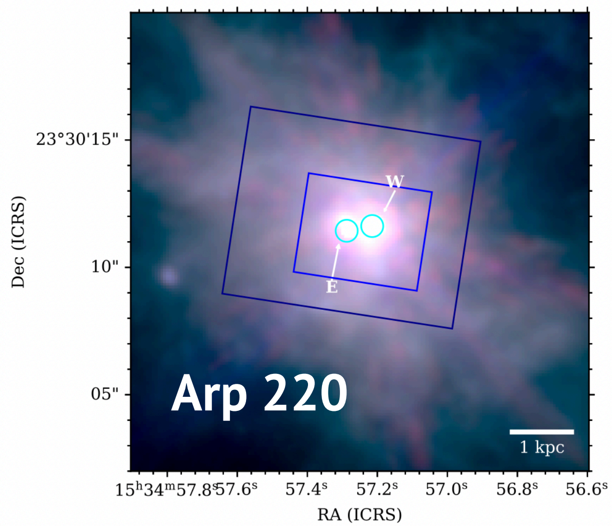
- 10-100%の氷が軌道の交差点で昇華している

Harada et al. (2022)

超赤外線銀河

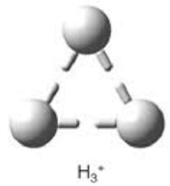
Buiten et al. (2025)

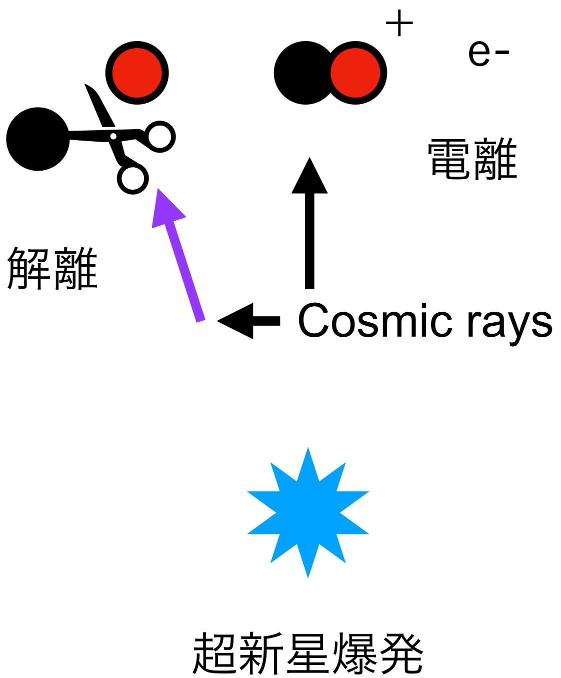




- Some ULIRGs (L_{IR}>10^{12} $L_\odot$) are too embedded to reveal their energy sources
- JWST observations of hot gas and ice
- HCN & C2H2 column densities updated to be 1 dex higher than previous studies

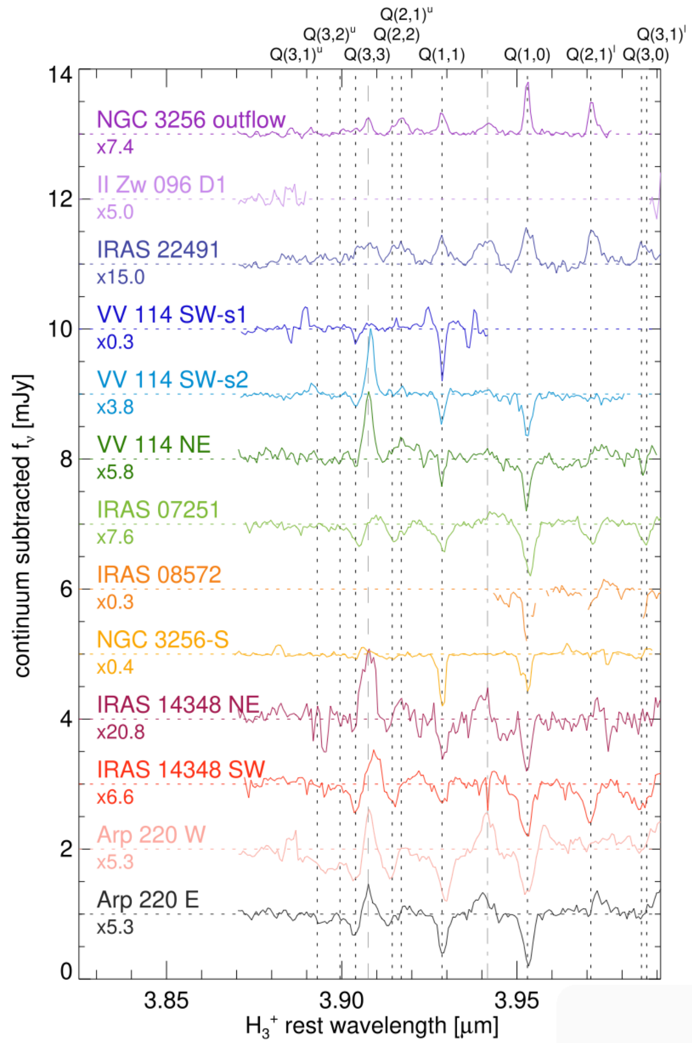
超赤外線銀河
宇宙線の電離率





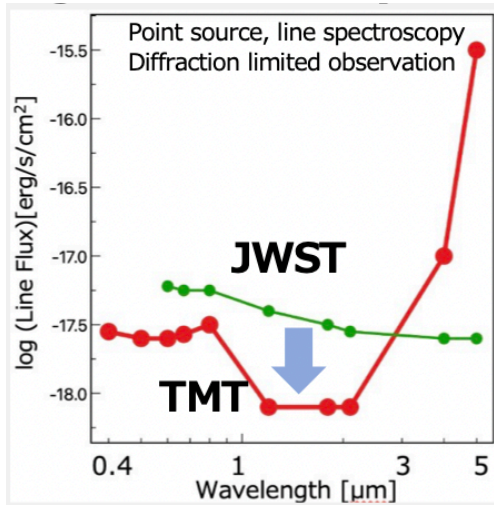
- H_3^+: A well-known tracer of cosmic-ray ionization rate
- Transitions at 3.4 - 4.4 μm
- Usually seen in absorption, emission observed in (U)LIRGs with JWST

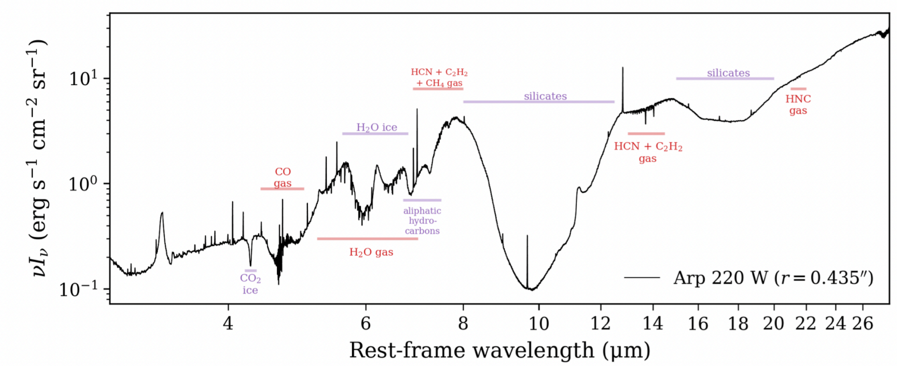
Pereira-Santaella et al. (2024)

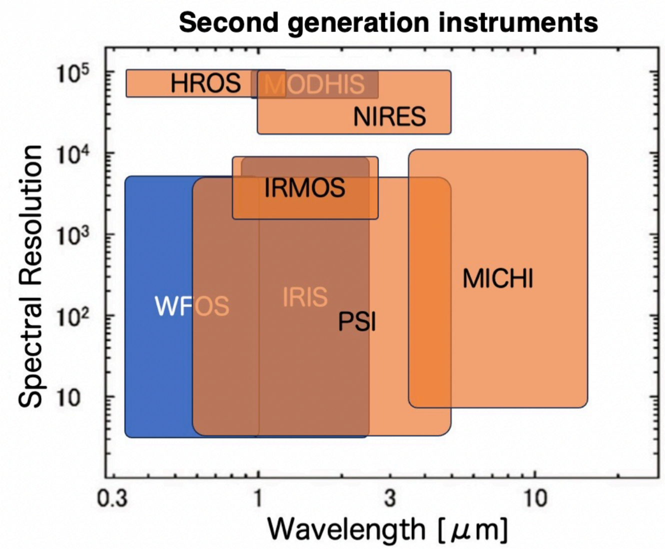


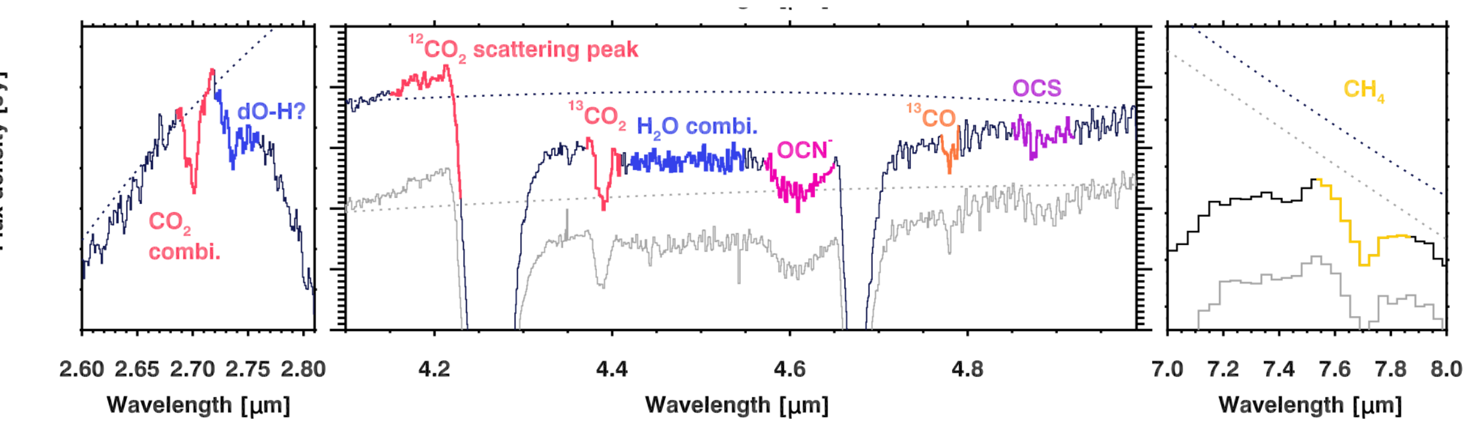
TMTへの期待

- 主に第２世代装置に輝線が多い (>3μm)
- 感度はJWSTに劣る(>3μm)

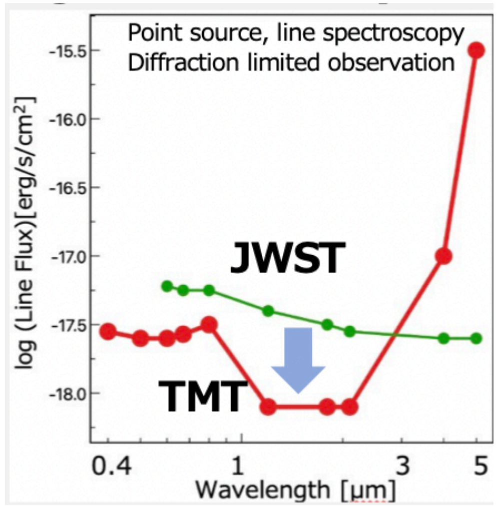








TMTへの期待



- TMTが勝る面は？
  - 明るい天体の高速度分解能観測
    - 各速度成分の分解(a few km/s)
  - JWSTと同様サイエンスの長時間観測サーベイ
    - 暖かいガス、氷の観測
    - 宇宙線イオン化率