

SPiCA



# テラヘルツ観測で探る 星形成領域の物質進化 -SPiCAから南極へ-

下西 隆 (新潟大学)  
+SPiCA 科学検討チーム

南極天文ワークショップ「南極から遠赤外線-テラヘルツ波で探る宇宙」

2022.3.14 国立極地研究所+オンライン

# 星·惑星形成 = 構造形成 + 物質進化 this talk

Fig.1 Galactic baryon cycle [SRON]

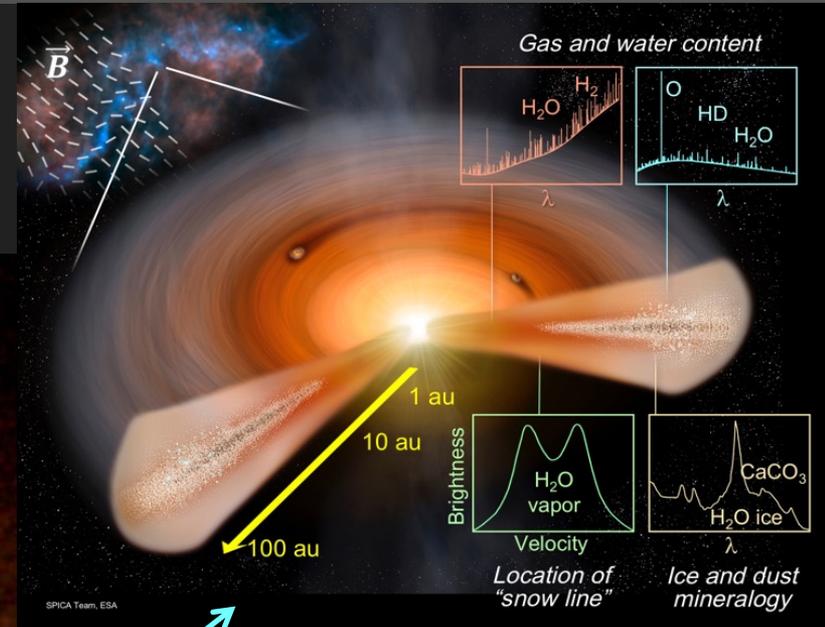
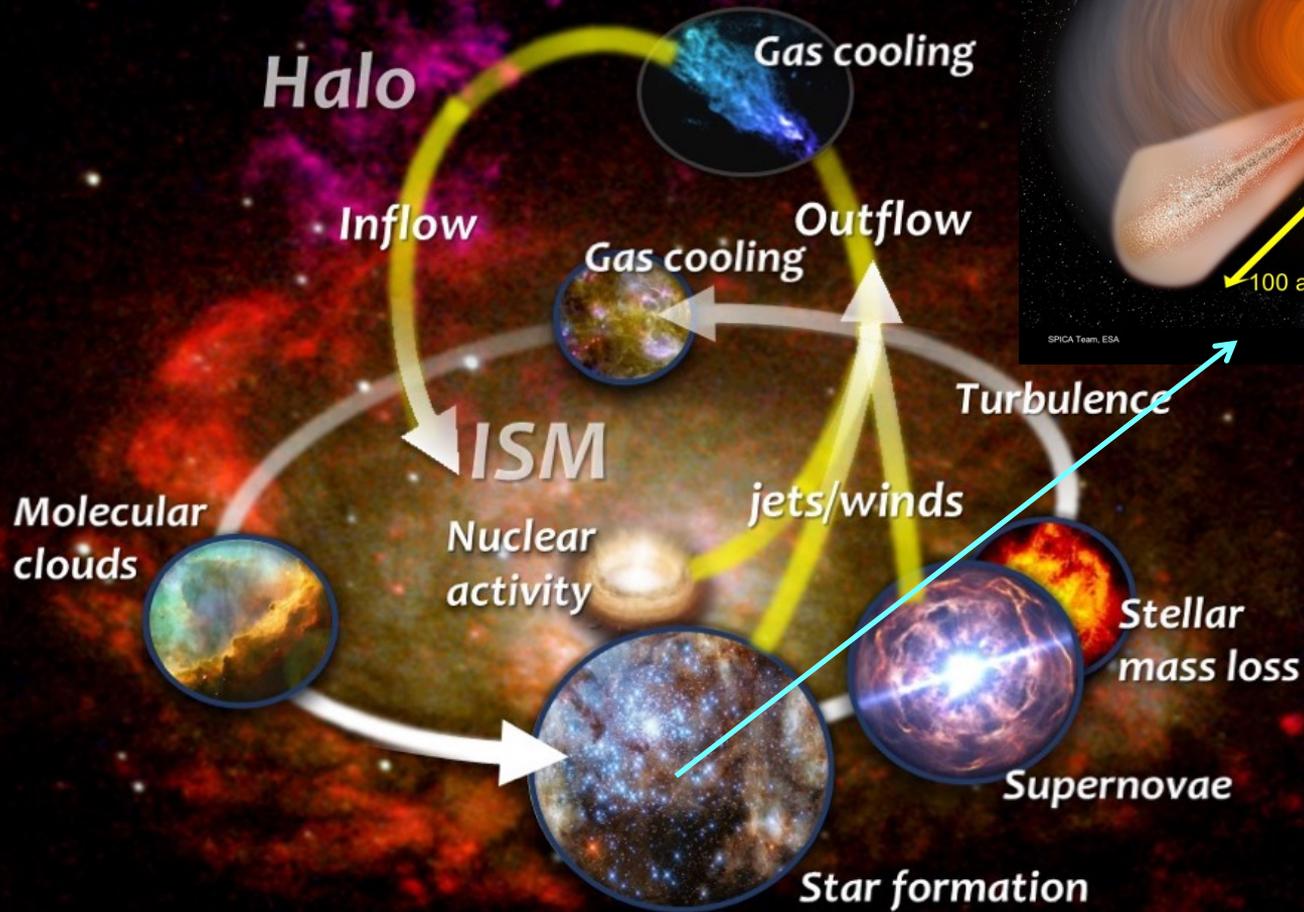
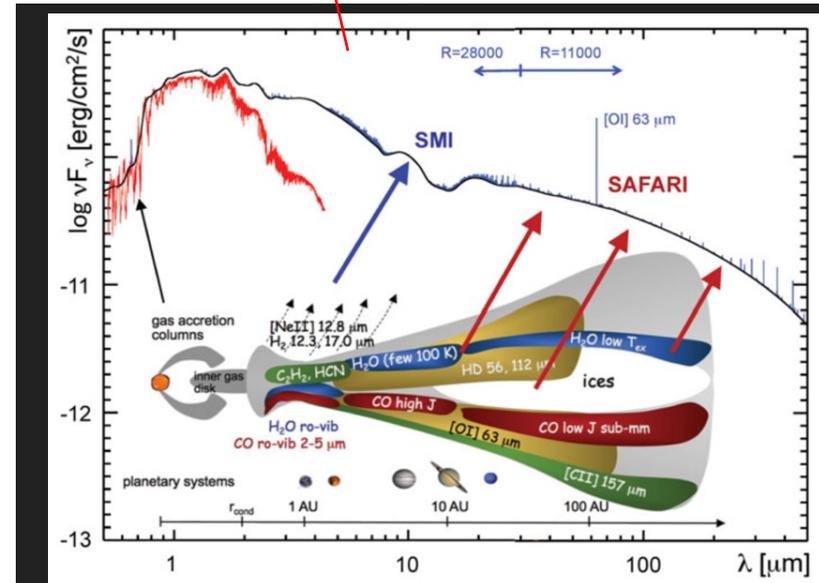
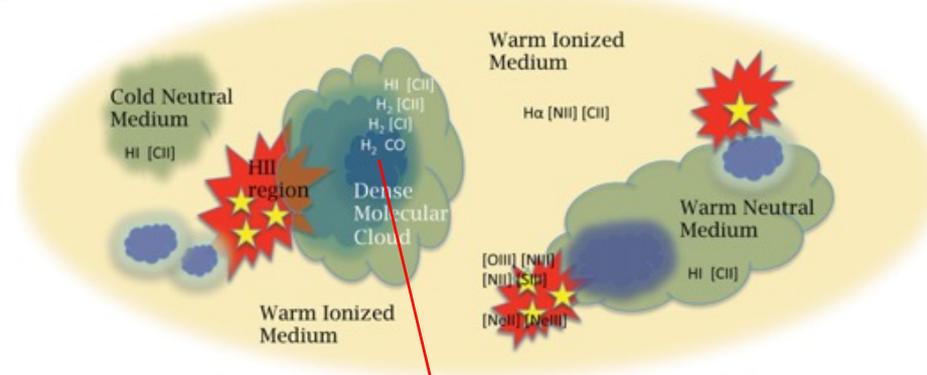


Fig.2 SPICA and star/planet-formation [JAXA / Nagoya Univ.]

# Atomic and molecular lines in mid- to far-infrared

Species	Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Goal
<b>Ionised gas tracers</b>		
O <sup>++</sup>	88, 52	Shocks, ionisation source
N <sup>+</sup>	122, 205	Diffuse ionised gas, star-formation rate
N <sup>++</sup>	57	Hardness of radiation field
S <sup>++</sup> , Fe <sup>+</sup>	18, 33, 18, 26, 35	Shocks
O <sup>3+</sup> , Ne <sup>4+</sup>	26, 14, 24	Active nucleus
Ne <sup>+</sup> , Ne <sup>++</sup>	12.8, 15.6, 36.0	Gas temperature
<b>Neutral atomic gas tracers</b>		
C <sup>+</sup>	158	Star-formation rate
O	63, 145	UV irradiation, shocks
Si <sup>+</sup>	35	UV irradiation, shocks
<b>Molecular gas tracers</b>		
HD	112, 56	Cool neutral gas
OH	53, 79, 84, 119, 163	Galactic winds
high- <i>J</i> CO	Various	Energetic irradiation
H <sub>2</sub> O	Various	Shocks
H <sub>2</sub> S(0)-S(2)	12.3, 17, 28	Warm neutral gas
HCN, HNC	14–15	Dense neutral gas
CO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O gas	14–15	Warm neutral gas
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	14.9	Organic chemistry
HC <sub>3</sub> N	15.6	Organic chemistry
C <sub>6</sub> H <sub>2</sub>	16.1	Organic chemistry
C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	15.9	Organic chemistry
<b>Dust and ice tracers</b>		
Forsterite Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	23, 33, 69	Dust temperature, Fe content, crystallinity
Enstatite MgSiO <sub>3</sub>	28, 37, 43	Grain shape, size, composition, crystallinity
Calcite CaCO <sub>3</sub>	92.6	Dust processing
H <sub>2</sub> O ice	44, 62	Dust processing
MgS, graphite	30	Dust composition
Fullerenes C <sub>60</sub>	17.4, 18.9	Organic chemistry
CO <sub>2</sub> ice	15.2	Thermal history of ice
PAH (C–C–C complex)	16–18	PAH size
SiO <sub>2</sub> , FeO	20	SN dust

Tab.1 & Fig.3 Key diagnostic features in mid-/far-IR and their origin [van der Tak+ 2018]



[Roelfsema+ 2018]

# High-J CO as a tracer of warm gas around protostar

Tab.2 CO transitions [CDMS]

Transition	Frequency [GHz]	Eu [K]
2-1	230.538	17
3-2	345.796	33
4-3	461.041	55
5-4	576.268	83
6-5	691.473	116
7-6	806.652	155
8-7	921.800	199
9-8	1036.912	249
10-9	1151.986	304
11-10	1267.015	365
12-11	1381.995	431
13-12	1496.923	503
14-13	1611.794	581
15-14	1726.603	663
16-15	1841.346	752
---	---	---
22-21	2528.172	1397
23-22	2642.330	1524

ATT

Herschel/  
HIFI

↑

↓

SPICA/  
SAFARI

- THz域のhigh-J CO輝線は、原始星エンベロップや円盤表層などの暖かい領域のガス密度・温度を探る上で有用<sup>e.g., 1,2,3</sup>
- ダスト連続波やlow-J COでは視線方向上での冷たい成分の寄与がどうしても大きくなる
- しかし、十分に空間分解していない観測の場合、Eu ~250K程度のラインであっても、高温領域 (>100 K) を正しくトレースしていない可能性が指摘されている<sup>4</sup>

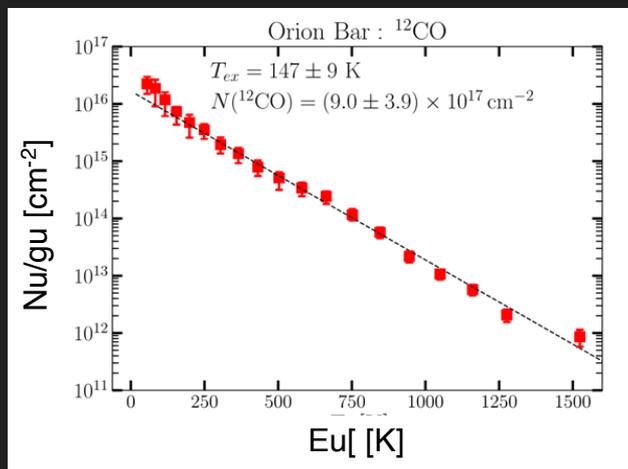


Fig.3 Rotation diagram of CO for Orion Bar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>San José-García + 2013

<sup>2</sup>Joblin+ 2018

<sup>2</sup>Plume+ 2012

<sup>4</sup>Yildiz+ 2013

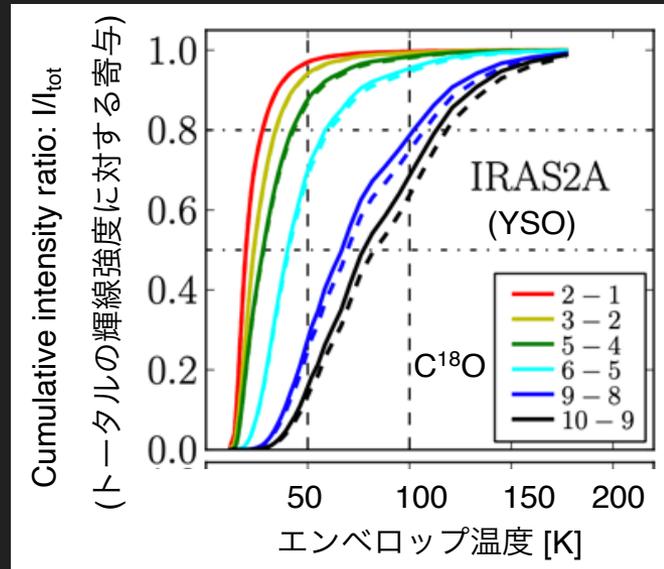


Fig.4 Cumulative intensity ratio  $I/I_{tot}$  of  $C^{18}O$  vs. envelope temperature where emission arise<sup>4</sup>

# HD & H<sub>2</sub> lines

Tab.3 HD & H<sub>2</sub> transitions

Transition	Wavelength [μm]	Eu [K]
HD		
1-0	112.07	129
2-1	56.23	385
---	---	---
H <sub>2</sub>		
0-0 S(0)	28.22	510
0-0 S(1)	17.03	1015
0-0 S(2)	12.28	1682
---	---	---

SPICA/  
SAFARI

SPICA/  
SMI

- HD lines in FIR: 原始星近傍や円盤など、数十Kから数百K程度の領域のガス密度を探るのに有効 [e.g., Bergin+ 2013, McClure+ 2016, Kama+ 2020]
- H<sub>2</sub> lines in MIR: ショック領域やPDRなどに見られる高温ガス(>500 K)を探るのに有効

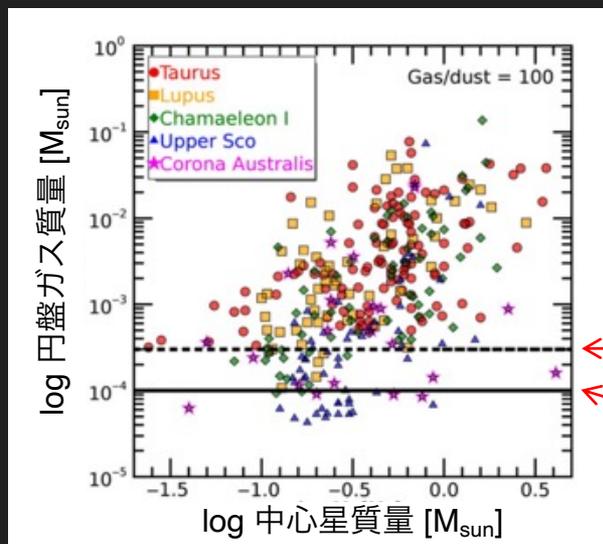


Fig.6 Disk gas mass vs. stellar mas for nearby SFR based on mm continuum [Kamp+ 2021 and references therein]

SAFARI 1hr on-source observations of HD(1-0)

SAFARI 10hr on-source

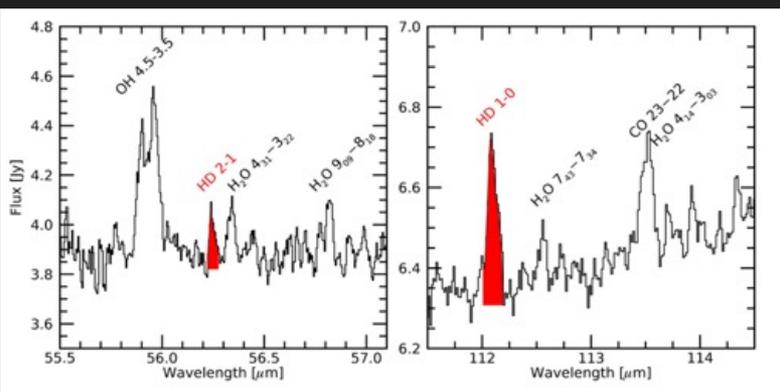
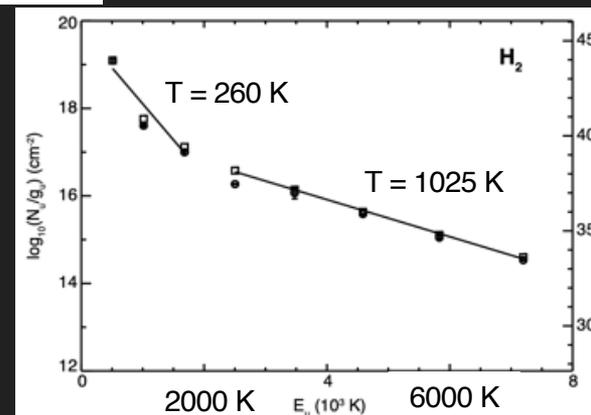


Fig.5 Herschel/PACS spectra of HD lines detected in TW Hya [Kamp+ 2021]

Fig.7 Excitation analysis of H<sub>2</sub> lines in shocked gas [Dianatos+ 2013]



# H<sub>2</sub>O gas

Tab.3 Example of strong H<sub>2</sub>O transitions [JPL]

Transition	Frequency [GHz]	Eu [K]
H <sub>2</sub> O		
1 <sub>1,0</sub> -1 <sub>0,1</sub>	556.936	61
2 <sub>1,1</sub> -2 <sub>0,2</sub>	752.033	137
2 <sub>0,2</sub> -1 <sub>1,1</sub>	987.927	101
3 <sub>1,2</sub> -3 <sub>0,3</sub>	1097.365	249
1 <sub>1,1</sub> -0 <sub>0,0</sub>	1113.343	53
3 <sub>2,1</sub> -3 <sub>1,2</sub>	1162.912	305
2 <sub>2,1</sub> -2 <sub>1,2</sub>	1661.001	194
2 <sub>1,2</sub> -1 <sub>0,1</sub>	1669.905	114
---	---	---
H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O		
3 <sub>1,3</sub> -2 <sub>2,0</sub>	203.408	204
1 <sub>1,0</sub> -1 <sub>0,1</sub>	547.676	61
2 <sub>1,1</sub> -2 <sub>0,2</sub>	745.320	137
3 <sub>1,2</sub> -3 <sub>0,3</sub>	1095.627	249
3 <sub>2,1</sub> -3 <sub>1,2</sub>	1136.704	303
---	---	---

- H<sub>2</sub>O: 高密度分子雲で最もアバンドランスの高い分子の一つ
- 星間氷や太陽系内の天体と化学組成を比較する上でH<sub>2</sub>Oは重要
- THz域には多くのH<sub>2</sub>Oの輝線が見られる
- Herschelで観測された原始星方向のH<sub>2</sub>O輝線は複雑な速度プロファイルを示しており、中心星近傍の高温領域に加えて、outflow cavityやshockなど複数の領域からの寄与が考えられる
- 高空間分解能のH<sub>2</sub>O観測は、中心星近傍の暖かいガスを選択的に見られるかもしれない

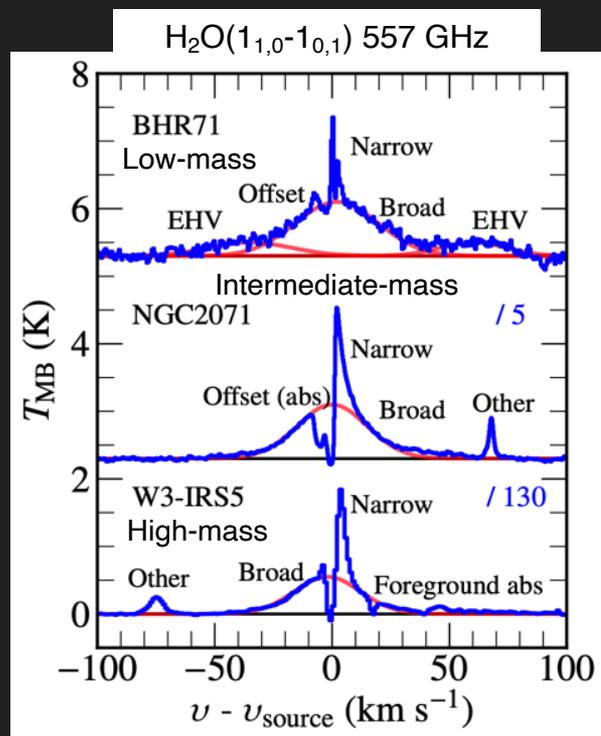
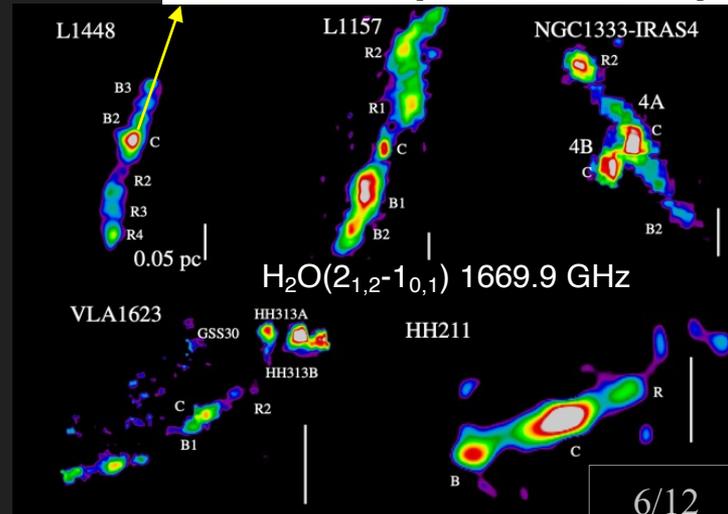
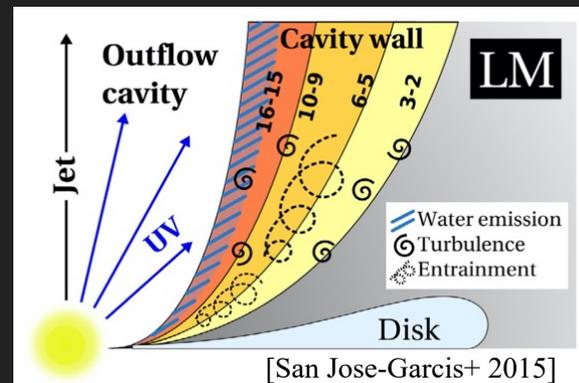


Fig.8 Water vapor in star-forming regions [van Dishoeck+ 2021 and references therein]



# Constraining Snow Line via H<sub>2</sub>O gas lines

- H<sub>2</sub>O Snow line : これより内側では水はガス、外側では氷. その位置の決定は円盤進化や惑星形成を理解する上で重要
- 中心星近傍でケプラー回転するH<sub>2</sub>O gas輝線の速度プロファイルからSnow Lineの位置を探る (Notsu+ 2017, 2018)
- Snow lineの観測に適したH<sub>2</sub>O輝線 (アインシュタインA係数が小さめ、励起温度高め) の多くが中間赤外~遠赤外にあり、検討が進められていた

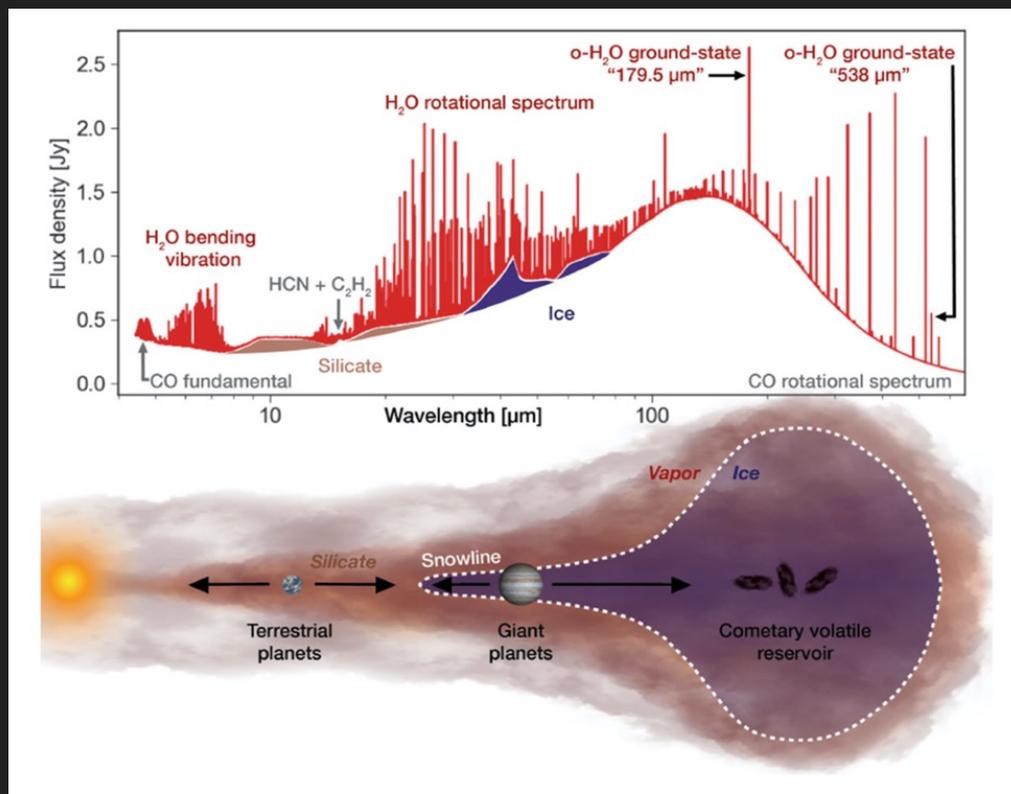


Fig.10 Schematics of a protoplanetary disk. [Pontoppidan+ 2019]

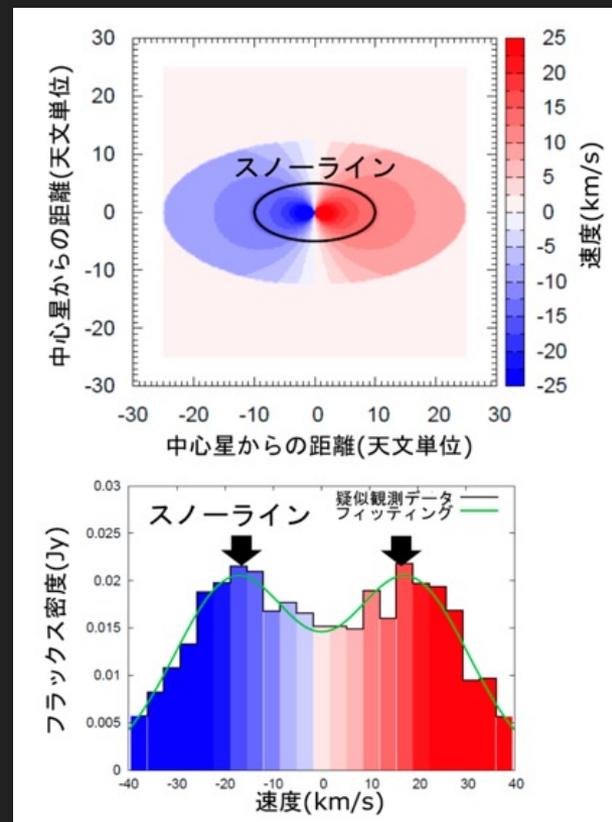


図11. 天文月報 2020/12 本田, 野村, 野津より

# Thermal History of Ices & Dust

- 遠赤外線域にはダストおよび氷の格子振動モードがあり、これらは物質の熱史の良いプローブ
- 分子雲中のダストはほぼ非晶質なのに対し、彗星中のダストには結晶質シリケートが豊富に存在することが知られている e.g., 1, 2
- 結晶化のメカニズムは未だ不明 (結晶化には1000K程度の加熱を経験する必要がある)
- 原始惑星系円盤内側の高温領域には結晶質シリケートが存在することが知られている e.g., 3
- 一方、円盤外側の彗星形成領域の物質の性質は未知で、これを探るには遠赤外線観測が最適

<sup>1</sup>Campins & Ryan 1989, <sup>2</sup>Matzel+ 2010, <sup>3</sup>Honda+ 2003

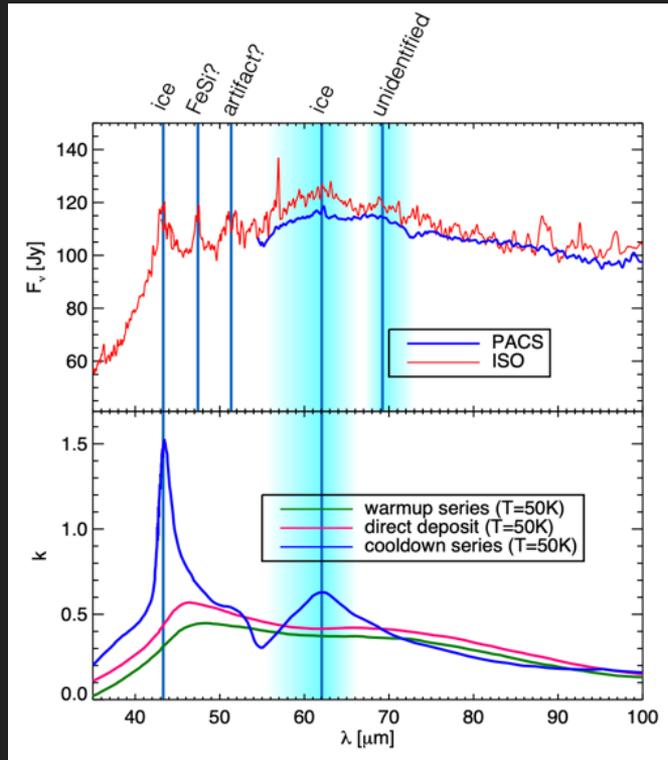


Fig.12 Herschel and ISO observations of a Herbig Ae/Be star, HD142527 [Min+ 2016]

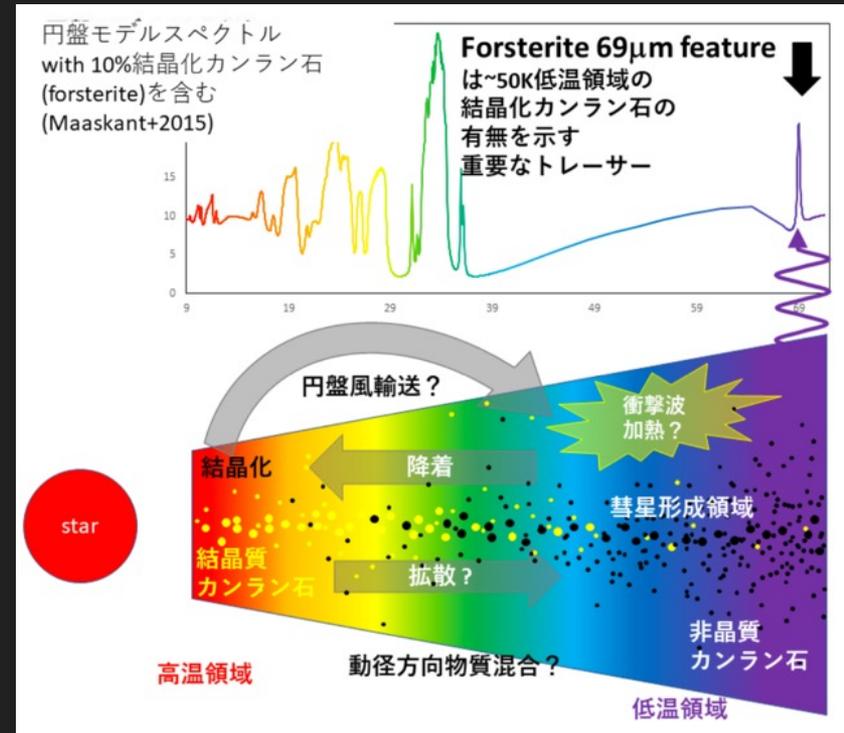


図13. 天文月報 2020/12 本田, 野村, 野津より

# Molecular Ion in Diffuse Clouds

- THz域には分子イオンの遷移が多く存在する ( $\text{OH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{CH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{D}^+$ , etc.)
- 大質量原始星を背景光源として使った分子イオンの星間吸収線の研究 (Indrilo+ 2015, Herschel/HIFI)
- $N(\text{OH}^+)$ ,  $N(\text{H}_2\text{O}^+)$ ,  $N(\text{H})$  から銀河系内の様々な領域での Cosmic-ray ionization を推定
- より大規模なサーベイに発展可能? (銀河面、外縁部方向、マゼラン雲、その他の近傍銀河、etc.)

See also Watanabe-san's talk!

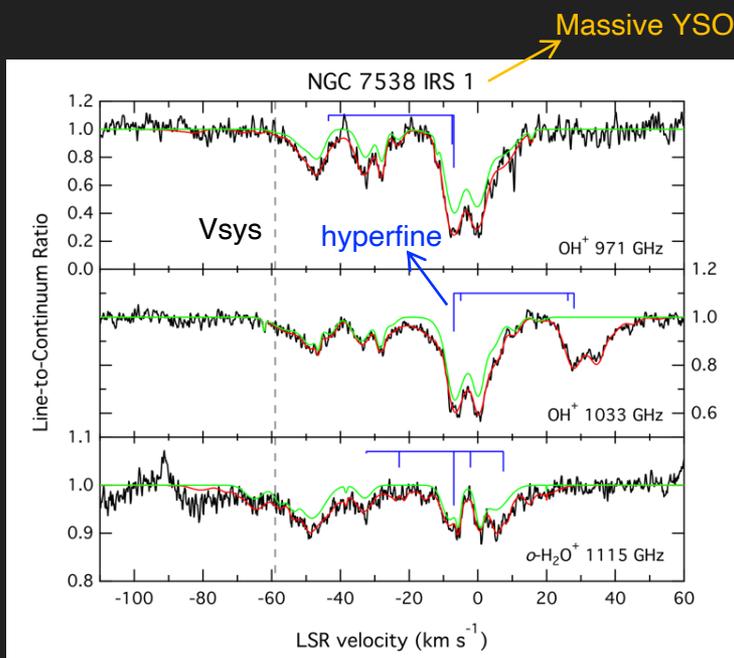
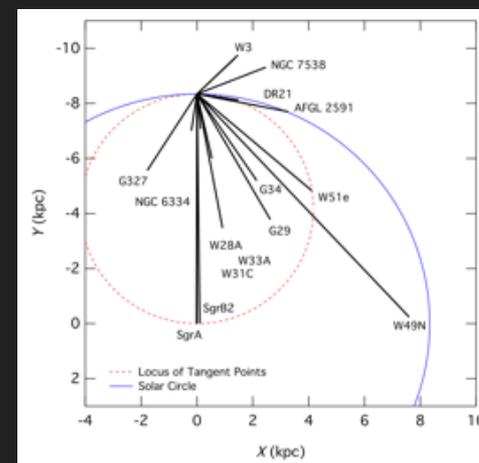
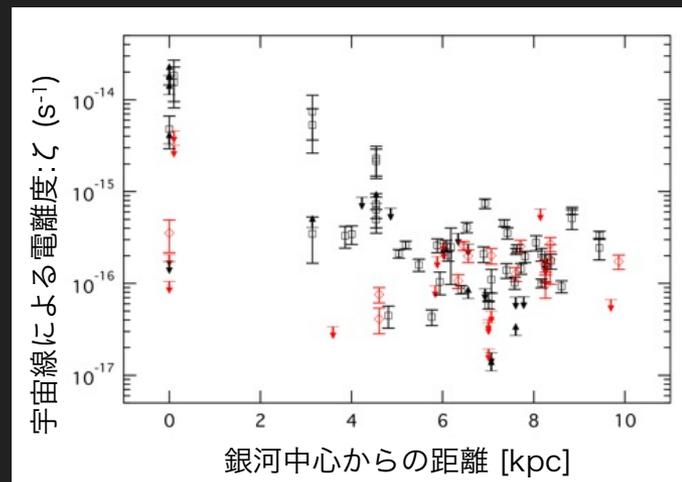


Fig.14 THz absorption lines of molecular ion, and derived CR ionization rate in various sight lines [Indrilo+ 2015]



# ATT's Spatial Resolution

- 空間分解能 (10m) : 16.5" (460 GHz), 8.7" (850 GHz), 5.1" (1.5 THz)
- 空間分解能 (30m) : 5.5" (460 GHz), 2.9" (850 GHz), 1.7" (1.5 THz)
- マルチビーム分光の視野 (30m) : 15x15なら、~44"x44" (850 GHz)

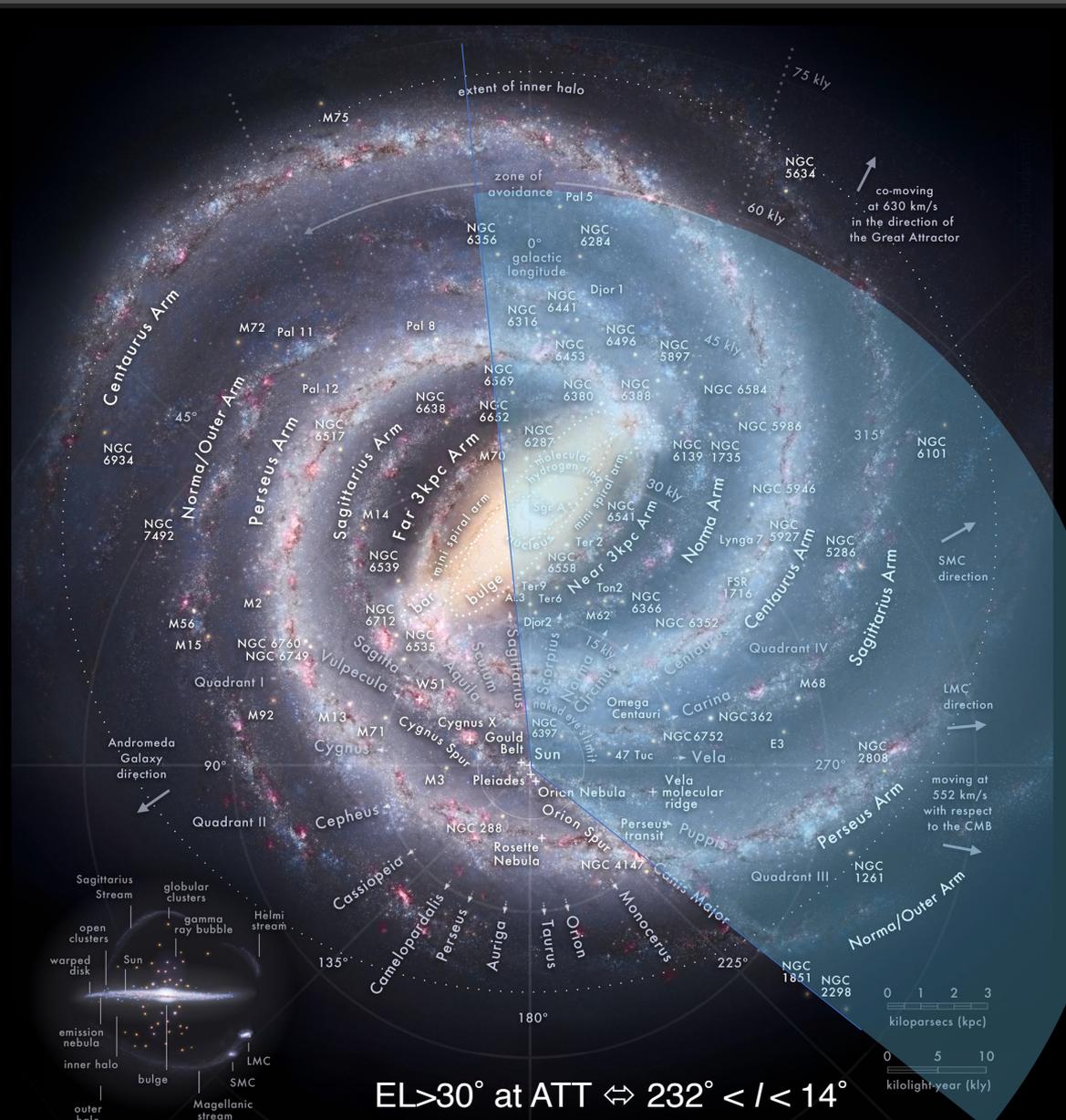
cf.  
Herschel/HIFI:  
25" at 850 GHz

	Disk* (20-200au)	Hot Corino (0.02 pc)	Hot Core (0.1 pc)	Clump (1 pc)	GMC (10 pc)	Whole galaxy
Nearby SFR (200 pc)	0.1" (low-mass)	20"	---	1000"	---	---
High-mass SFR (2 kpc)	0.1" (high-mass)	2"	10"	100"	1000"	---
Galactic Center (8 kpc)	25 mas (high-mass)	0.5"	2.5"	25"	250"	---
Outer Galaxy (10 kpc)	20 mas (high-mass)	0.4"	2"	20"	200"	---
LMC/SMC (50-60 kpc)	3-4 mas (high-mass)	70-80 mas	0.3-0.4"	3-4"	30-40"	~6x6 deg <sup>2</sup>
IC10 (950 kpc)	0.2 mas (high-mass)	4 mas	20 mas	0.2"	2.2"	~6'x6'

\*Assuming 20 au for low-mass disk, 200 au for high-mass disk

- : 10m鏡で(ほぼ)空間分解可
- : 強めのラインの検出なら
- : 30m鏡で(ほぼ)空間分解可
- : 干渉計を使おう

# ATT's Observable Sky



- オリオンやタウロスといった一部の人気天体は見えない
- マゼラン雲は大変よく見える => 高励起のCOラインやダスト連続波での全面サーベイなどは面白い
- 銀河系外縁部など、探査があまり進んでいない領域のサーベイも面白い
- THz => 高励起 => 原始星に付随する暖かいガスの探査に有効
- THz => 埋もれた原始星のSEDの観測にも有用

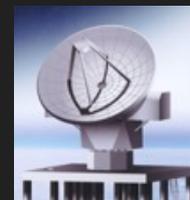
EL>30° at ATT ⇔ 232° < l < 14°  
(based on Umemoto-san's talk)

# Summary



- SPICAで検討された星・惑星形成領域の物質進化に関連する研究 (の一部)
  - High-J CO (THz) or H<sub>2</sub> (MIR) 輝線を用いた原始星近傍の暖かいガスの定量化
  - HD輝線(THz)を用いた円盤ガス質量の定量化
  - H<sub>2</sub>O輝線(THz)を用いた星・惑星形成領域の水の定量化
  - H<sub>2</sub>O輝線(MIR, FIR)を用いたSnow lineの推定
  - ダストおよび氷のバンド(FIR)を用いた彗星形成領域の固体の熱史の推定
  - 原子・分子イオン輝線(THz)を用いたdiffuse cloudの物理状態の推定

SPICAの科学検討に関わった全ての方に感謝いたします



- 南極テラヘルツ望遠鏡
  - THz域連続波でのサーベイ => High-J COでのフォローアップによる原始星探査、もしくはHigh-J COでの広域サーベイ(マゼラン雲、銀河系外縁部、銀河中心など)
  - 星形成領域の水のサーベイ? (観測できる?) (近傍星形成領域など)
  - THz域連続波でのサーベイ => 分子イオン吸収線のサーベイによる宇宙線電離度マッピング(銀河系内、マゼラン雲、近傍銀河など)
  - ホットコアなどのスペクトルラインサーベイ (THz域はまだ未知)