

南極 30cmサブミリ波望遠鏡による 銀河系内暗黒ガスの観測

久野成夫

(南極天文学研究部門)

1. 暗黒ガスとは？
2. 南極30cmサブミリ波望遠鏡
3. 南極での観測計画



共同研究者

- 筑波大学

- 橋本拓也、本多俊介、瀧口風太、青木美和、茅野太一、岩田将輝、
(新田冬夢、齊藤弘雄、小山徹、加藤良寛、石川みなみ)

- 関西学院大学

- 瀬田益道、中井直正

- 北海道大学

- 徂徠和夫、Dragan SALAK、半田宙也、(八嶋 裕、清水一揮)

- 国立天文台

- 永井誠、梅本智文、松尾宏、小嶋崇文、伊王野大介、鵜澤佳徳、石井峻

- JAXA

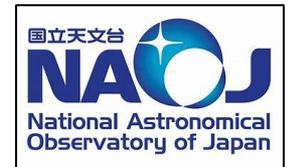
- 西堀俊幸

- KEK

- 長崎岳人

- INAF (伊)

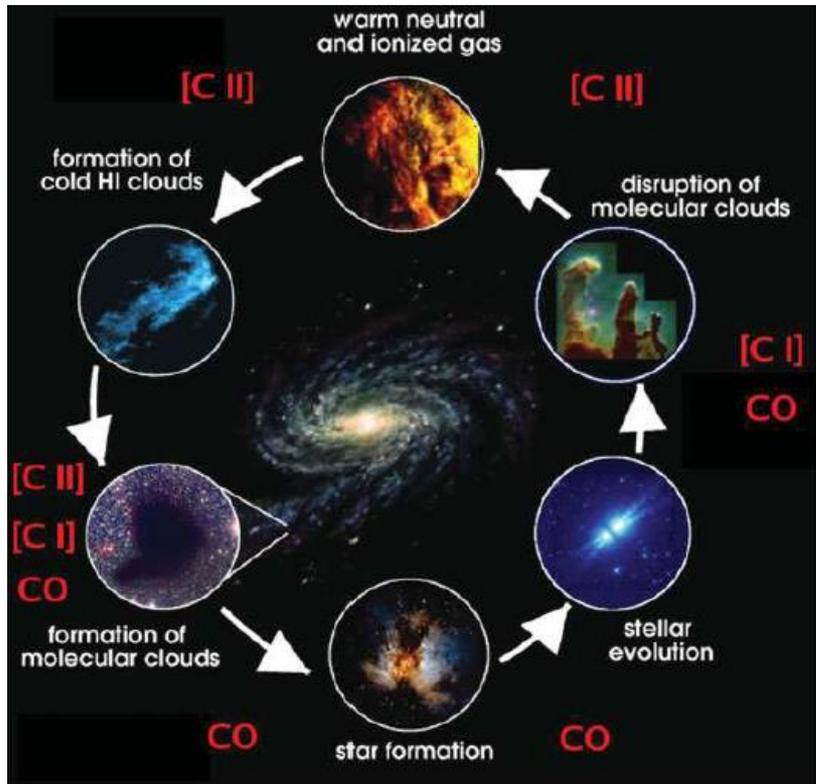
- Luca Olmi



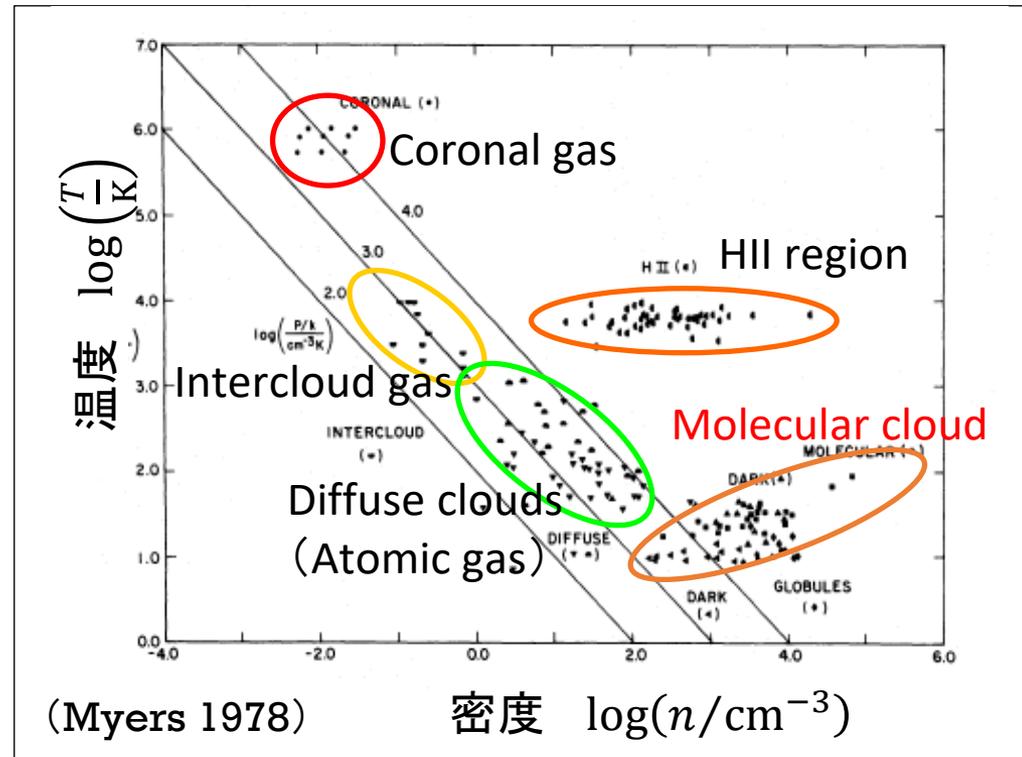
1. 暗黒ガスとは？

星形成

- 希薄なガス(水素原子HI)⇒分子雲(水素分子H₂)⇒分子雲コア⇒星
- 分子ガスの観測(存在量、密度、温度、運動)
⇒ H₂ (星間ガスの質量の~70%)



Kulesa et al. (2012)



水素分子 (H_2)

- 電気双極子モーメントを持たない
- 回転遷移 \Rightarrow 電気四重極子放射 ($\Delta J=2$)
 - 高温 (>数100 K) のガスだけ
 - 強度が弱い
- 分子雲に存在する低温 (数10 K) の H_2 は直接観測できない
- 存在量を測定するのが難しい

H_2 の電気四重極子放射

ortho- H_2 ↑↑				para- H_2 ↑↓		
Transition	Wavelength (μm)	$A_{ul}(\text{s}^{-1})$	E_U/k (K)	Transition	Wavelength (μm)	$A_{ul}(\text{s}^{-1})$
$\nu = 0-0, S(0)$	28.21883	2.95×10^{-11}	510 K	$\nu = 0-0, S(1)$	17.03483	4.77×10^{-10}
$\nu = 0-0, S(2)$	12.27861	2.76×10^{-9}		$\nu = 0-0, S(3)$	9.66491	9.86×10^{-9}
$\nu = 0-0, S(4)$	8.02502	2.65×10^{-8}		$\nu = 0-0, S(5)$	6.90952	5.89×10^{-8}
$\nu = 0-0, S(6)$	6.10856	1.14×10^{-7}		$\nu = 0-0, S(7)$	5.51116	2.01×10^{-7}

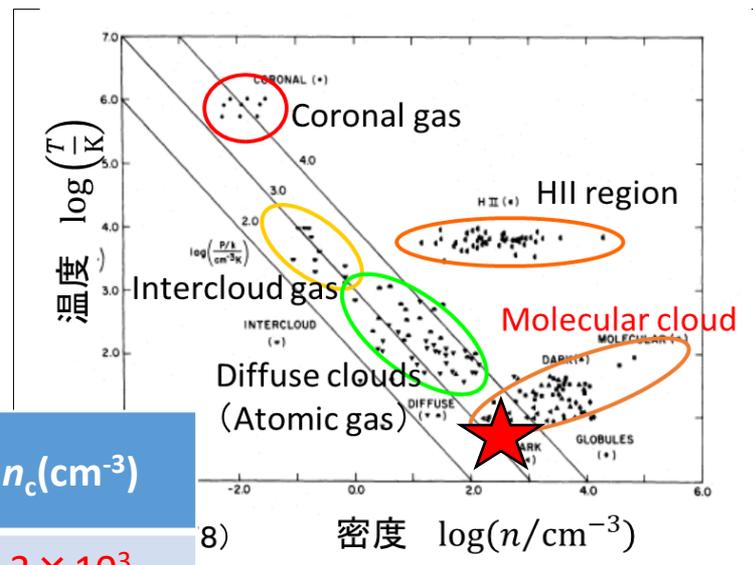
CO($J=1-0$)輝線 @115 GHz

- 豊富に存在 (CO/H₂存在比 $\sim 10^{-4}$)
- 比較的低温低密度でも励起可能

⇒ 分子ガスのトレーサー

COの電気双極子放射

Transition	Frequency (GHz)	E_U/k (K)	$A_{ul}(s^{-1})$	$n_c(cm^{-3})$
CO($J=1-0$)	115.271204	5.5	7.4×10^{-8}	3×10^3
CO($J=2-1$)	230.538001	16.6	7.1×10^{-7}	1×10^4
CO($J=3-2$)	345.795989	33.2	2.6×10^{-6}	5×10^4
CO($J=4-3$)	461.04081	55.6	6.3×10^{-6}	1×10^5



8) 密度 $\log(n/cm^{-3})$

CO($J=1-0$) 積分強度(I_{CO}) \Rightarrow H₂柱密度($N(H_2)$)

• 光学的に厚い(分子雲の内部を見通せない)

• 変換係数(X_{CO}): 観測的に決定

• 光学的に薄い輝線 (例: $I(^{13}CO) \propto N(^{13}CO) \Rightarrow N(H_2)$)

• ガンマ線(宇宙線+星間ガス \Rightarrow 中性 π 中間子 \Rightarrow ガンマ線)

$$(I_\gamma = \alpha (N(HI) + 2N(H_2)) + \beta)$$

• 分子雲のビリアル平衡を仮定 ($M(H_2+He) = M_{vir} \propto R \cdot \Delta V^2$)

$$\Rightarrow X_{CO} \approx 2 \times 10^{20} cm^{-2} (K km s^{-1})^{-1}$$

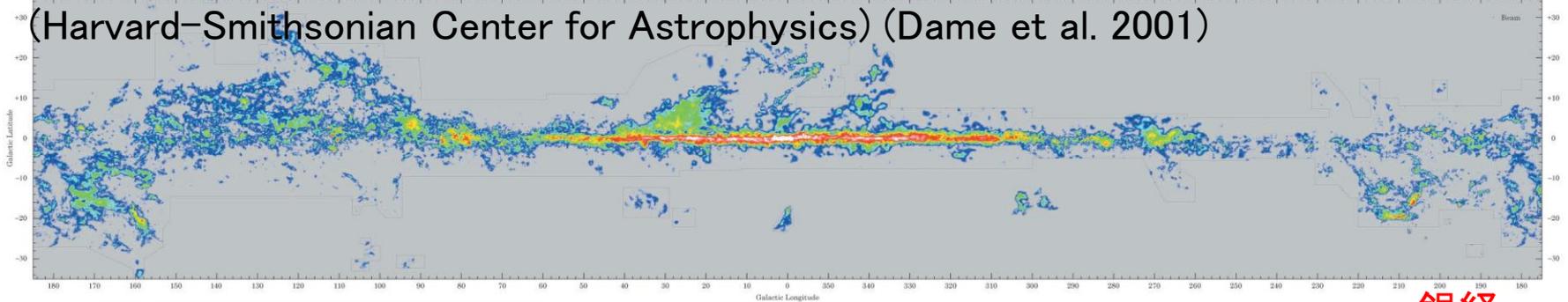
($\pm 30\%$ uncertainty in the Milky way) (Bolatto et al. 2013)

CfA CO(J=1-0) 銀河面サーベイ



1.2m望遠鏡(CfA) ビームサイズ: $\sim 9'$ (22 pc @銀河系中心8.5 kpc, 2.6 pc @1 kpc)
(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) (Dame et al. 2001)

銀緯

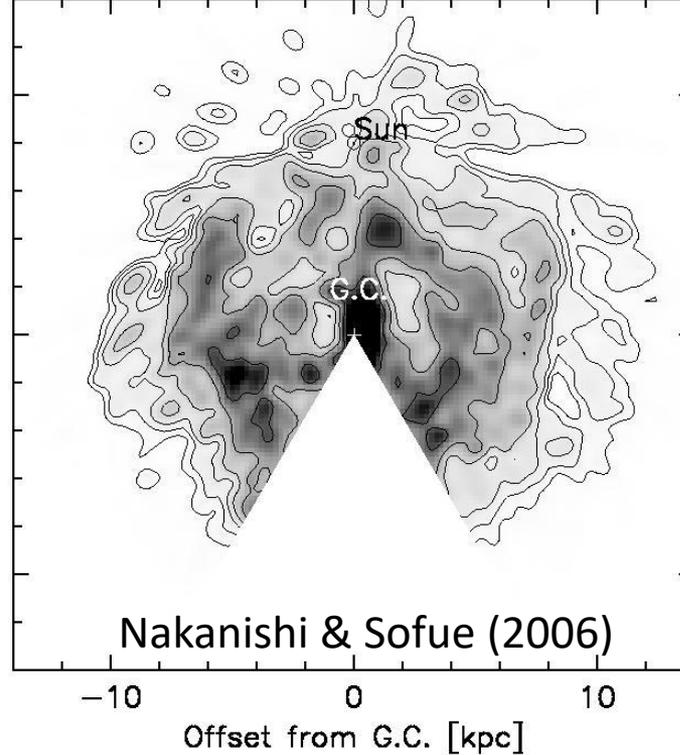


銀経

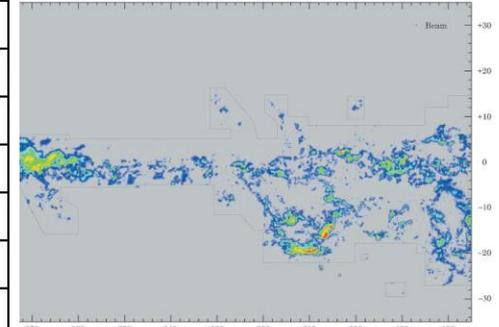
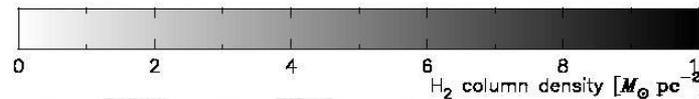
Fig. 2. Velocity-integrated CO map of the Milky Way. The angular resolution is $9'$ over most of the map, including the entire Galactic plane, but is lower ($15'$ or $20'$) in some regions out of the plane (see Fig. 1 & Table 1). The sensitivity varies somewhat from region to region; since each component survey was integrated individually using moment stacking or clipping in order to display all statistically significant emission but little noise (see §2.2). A dotted line marks the sampling boundaries, given in more detail in Fig. 1.

CO(J=1-0) 銀

Offset from G.C. [kpc]

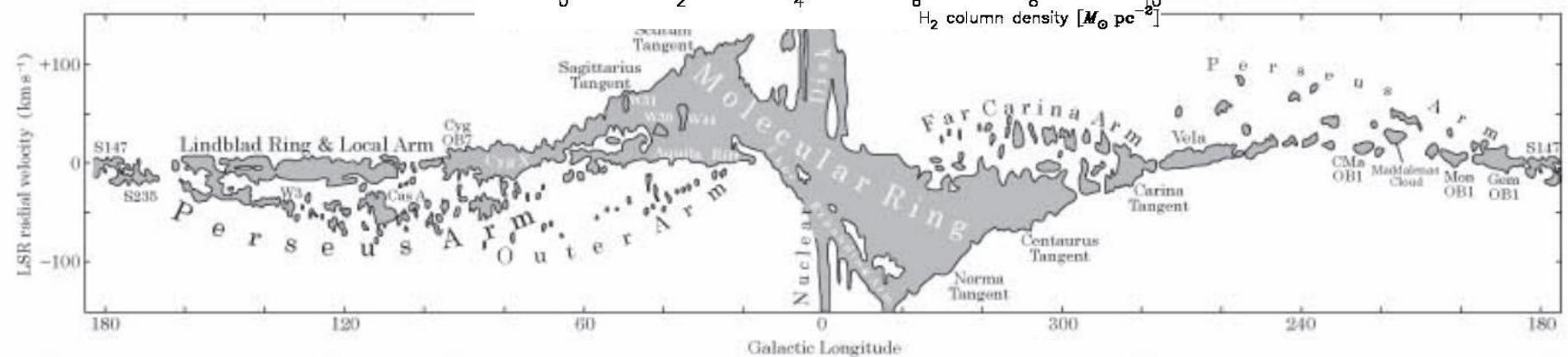
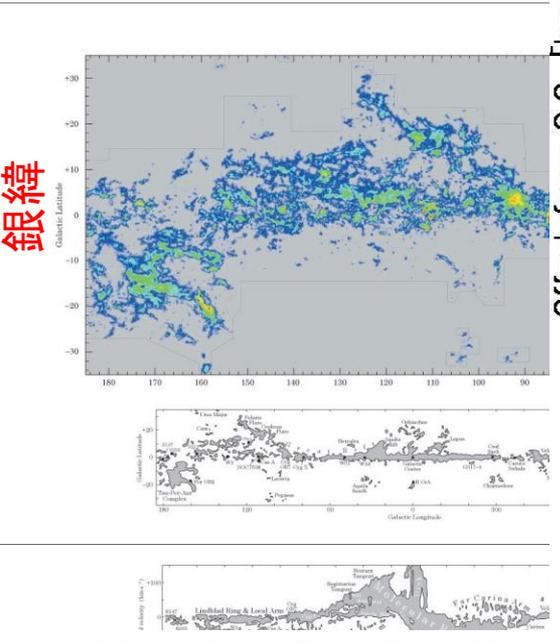


Nakanishi & Sofue (2006)



銀経

Fig. 2. Velocity-integrated CO map of the Milky Way. The angular resolution is 9' over most of the map, including the entire Galactic plane, but is lower (15' or 30') in some regions out of the plane (see Fig. 1 & Table 1). The sensitivity varies somewhat from region to region, since each component survey was integrated individually using moment stacking or clipping in order to display all statistically significant emission but little noise (see §2.3). A dashed line marks the sampling boundaries given in more detail in Fig. 1.



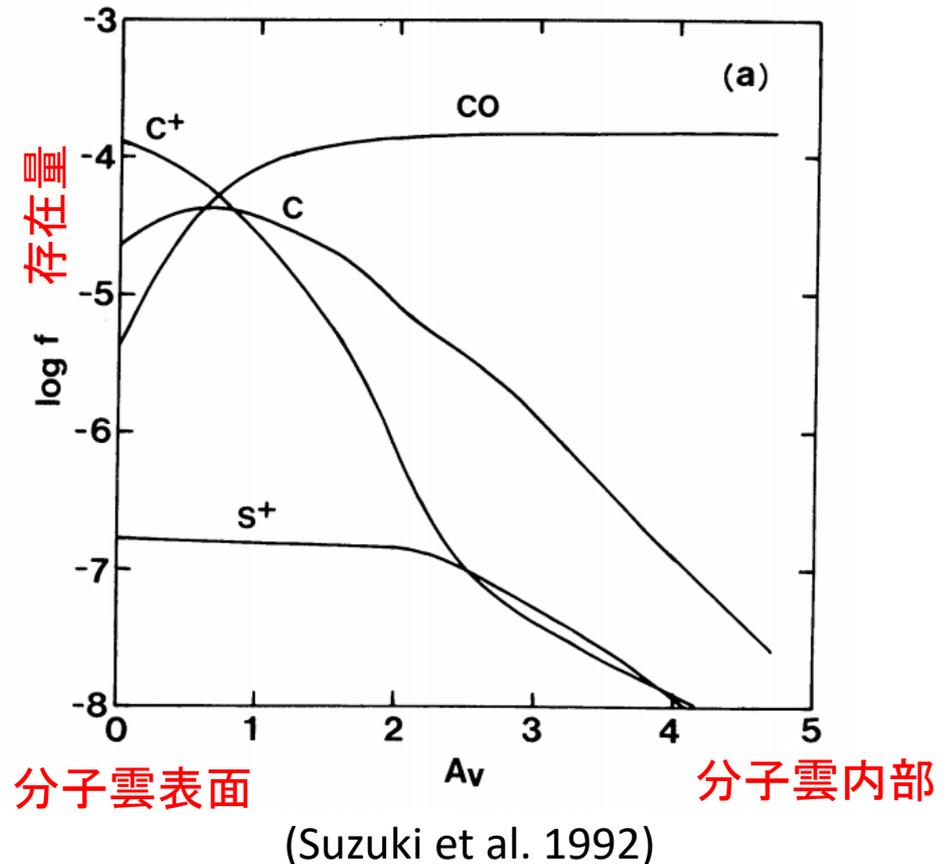
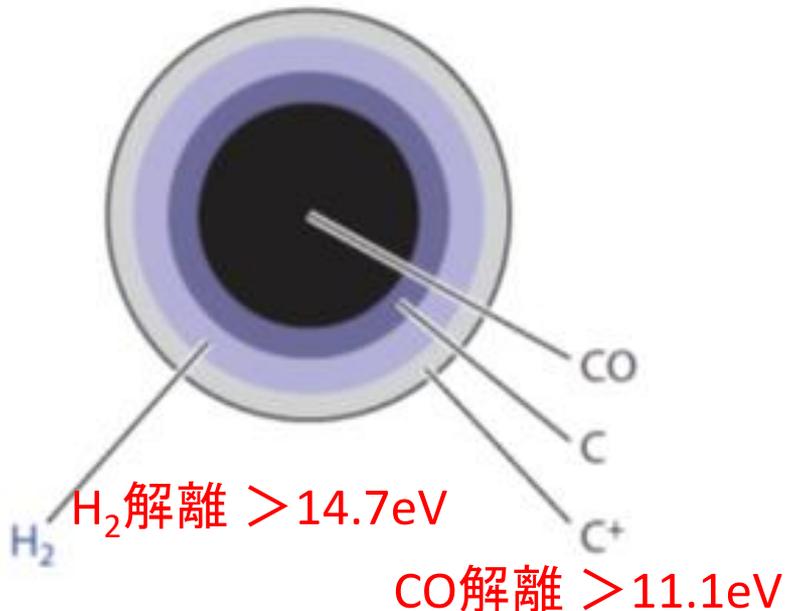
ビームサイズ : $\sim 9'$ (2.6 pc @ 1 kpc, 22 pc @ 銀河系中心)

- ・銀河系の構造
- ・分子雲の性質

PDR (Photo Dissociation Region)領域

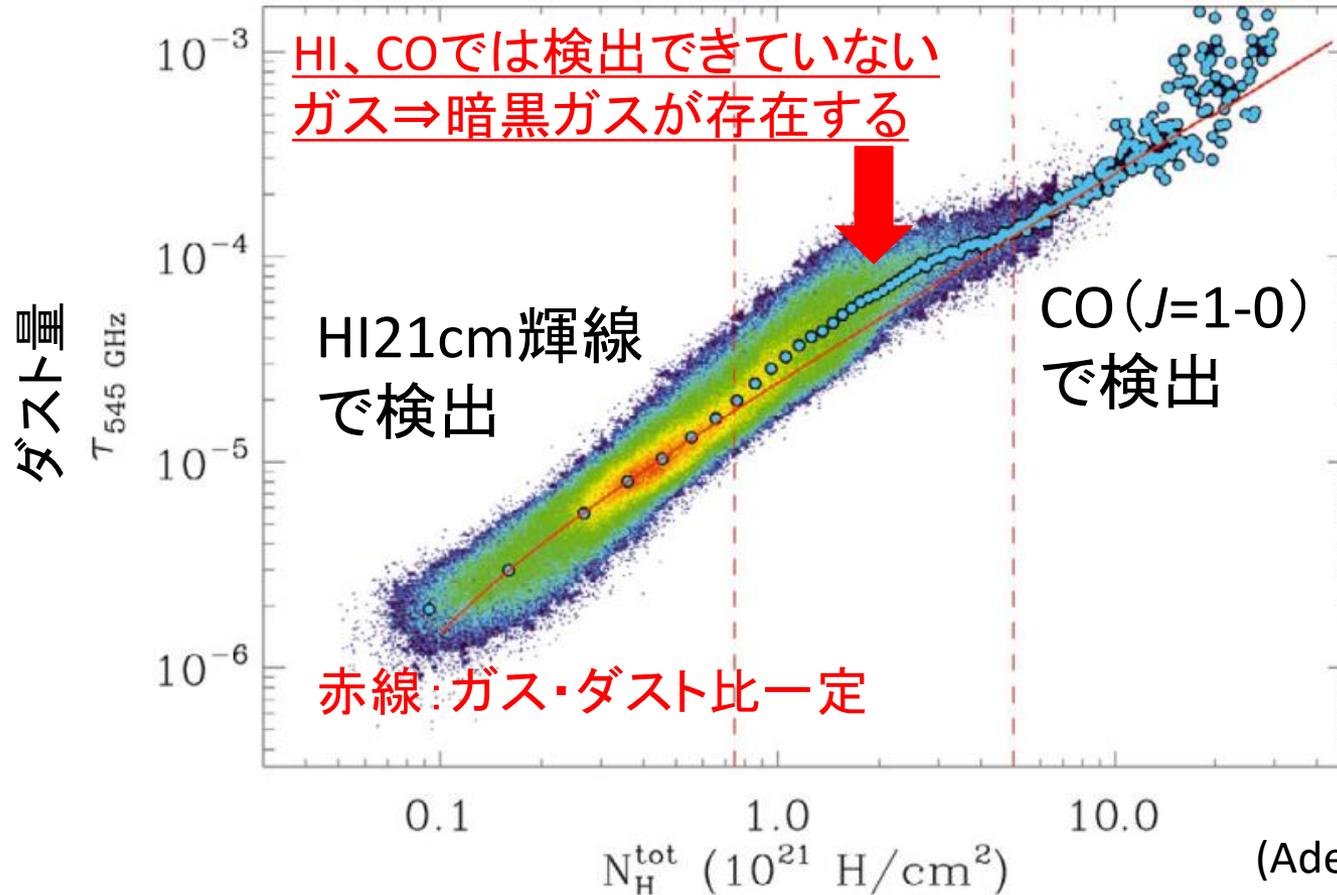
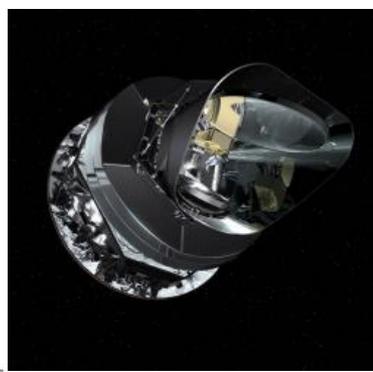
- 分子雲の表面: 紫外線によってCOが解離、電離 \Rightarrow C I、C II
 \Rightarrow COでは観測できない分子ガスが存在

(e.g., Wolfire et al. 1990; Bolatto et al. 1999)



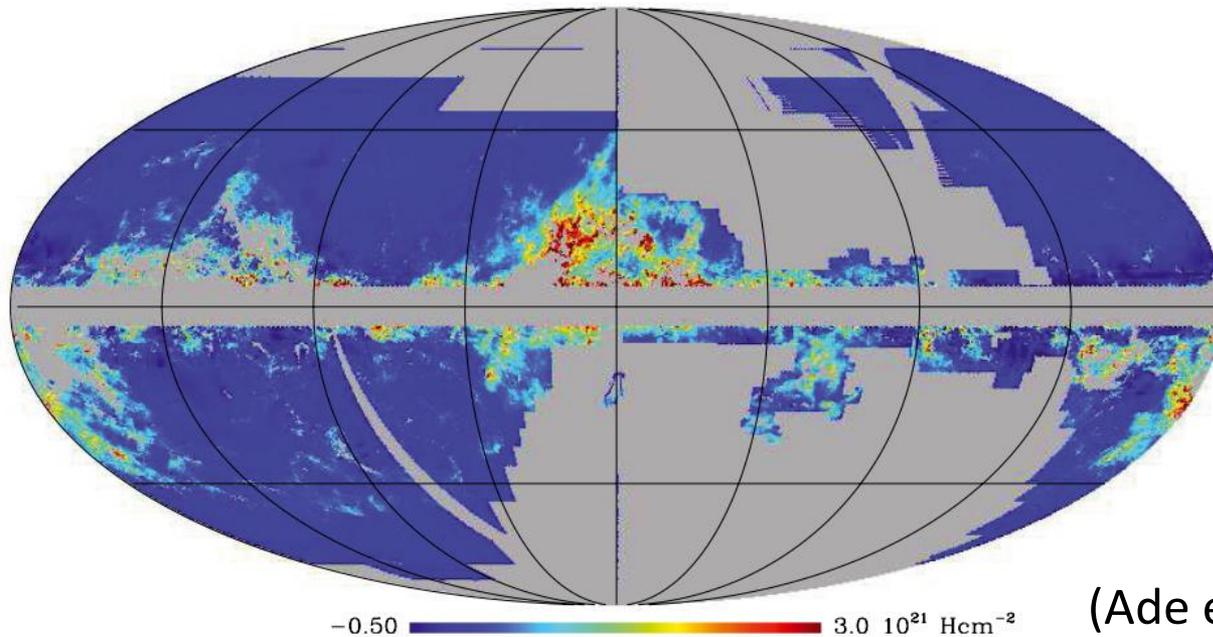
暗黒ガス (Dark gas)

- Plank衛星: 星間ダスト熱放射 (サブミリ波)
 - 星間ダスト (個体微粒子): Si, C, (Fe, Mgなど)
 - 質量: 星間ガスの~1%



$N(\text{HI}) + 2X_{\text{CO}} I_{\text{CO}}$ ($X_{\text{CO}} = 2.3 \times 10^{20} \text{ H}_2 \text{ cm}^{-2} / (\text{K km s}^{-1})$)
観測されている水素原子柱密度

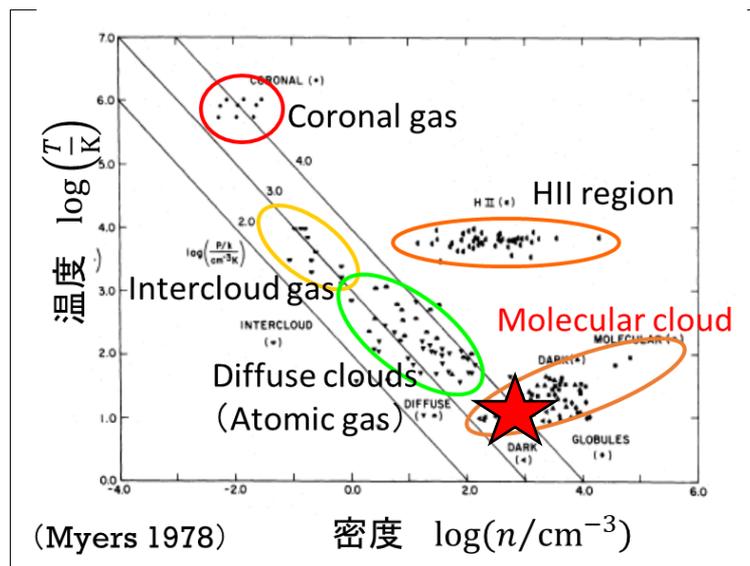
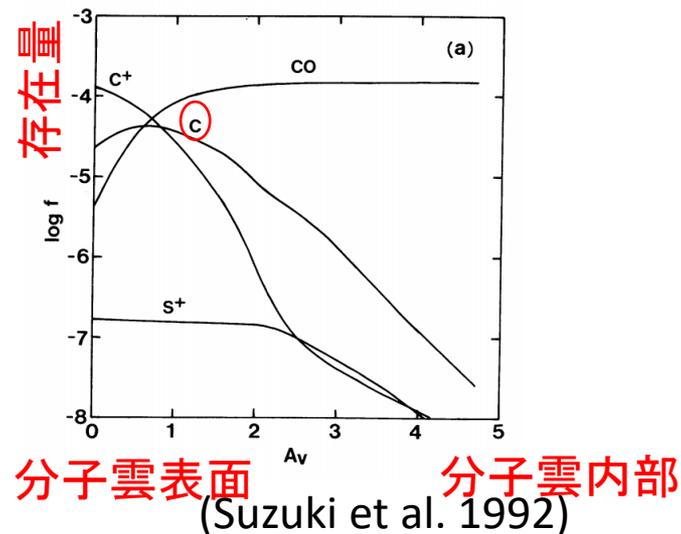
銀河系における暗黒ガスの分布



- 連続波観測なので、速度の情報なし
 - ⇒ 視線方向の重なりが少ない高銀緯雲
 - ⇒ 太陽系近傍のみ
- 暗黒ガスの割合
 - 質量: HIの28%、COで検出されているH₂の118%
 - 銀河系円盤部については不明

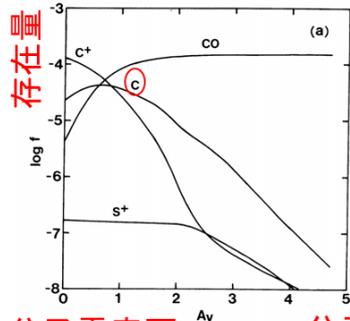
中性炭素原子(CI)の観測

- [CI]($^3P_1-^3P_0$) 微細構造線 @492 GHz
- $E_U/k = 23.4$ K、 $n_c \sim 500$ cm $^{-3}$
- 近傍分子雲
 - 例えば、オリオン分子雲 (Shimajiri et al. 2013)
- 近傍銀河
 - 例えば、M83 (Miyamoto et al. 2021)
- CO($J=1-0$)の観測が困難な遠方銀河の分子ガス観測
 - 例えば、submm galaxies @ $z \sim 2.5$ (Alaghband-Zadeh et al. 2013)

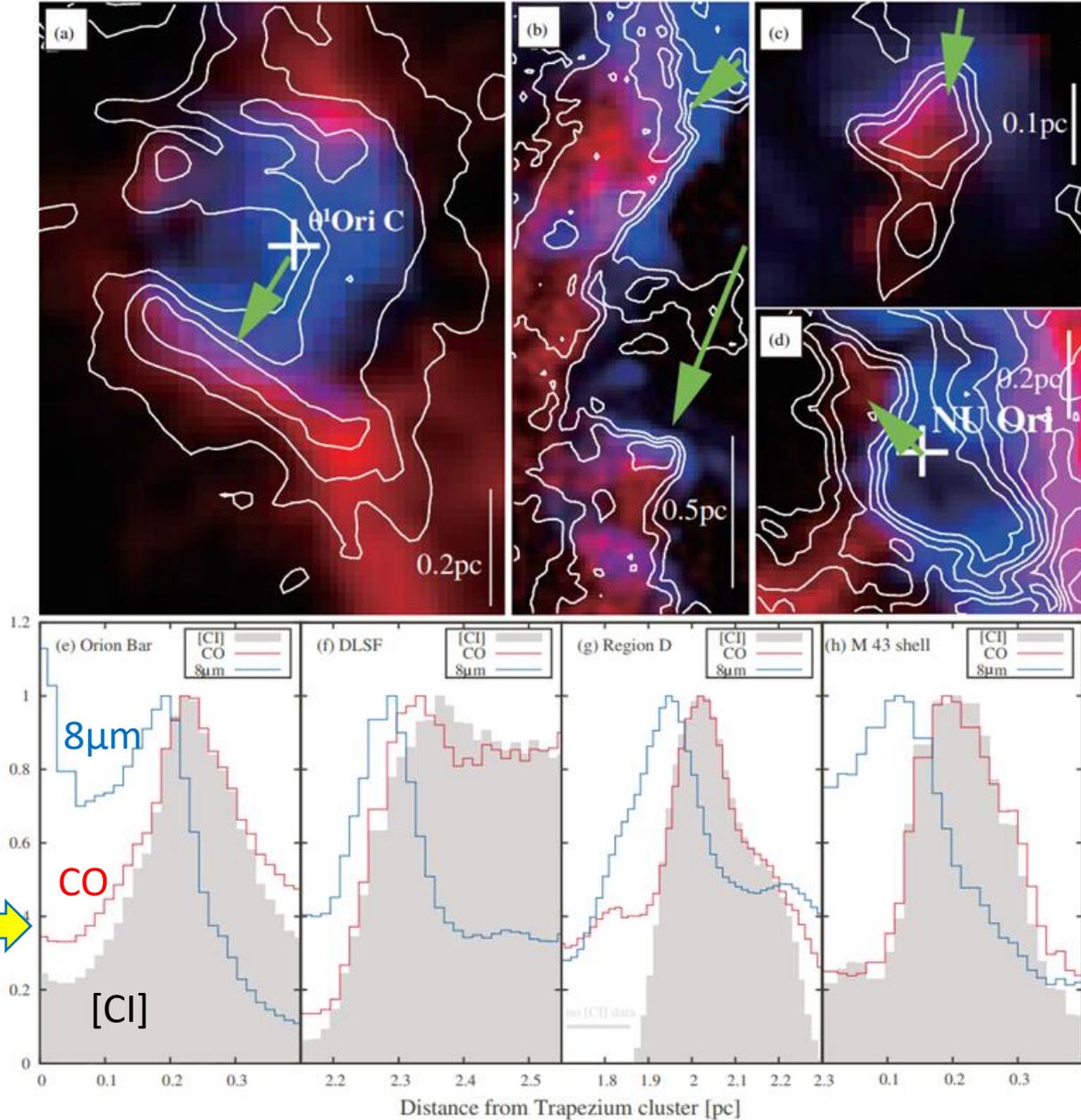


オリオン分子雲

- COとCIの分布が一致
- 単純なPDRモデルでは説明できない

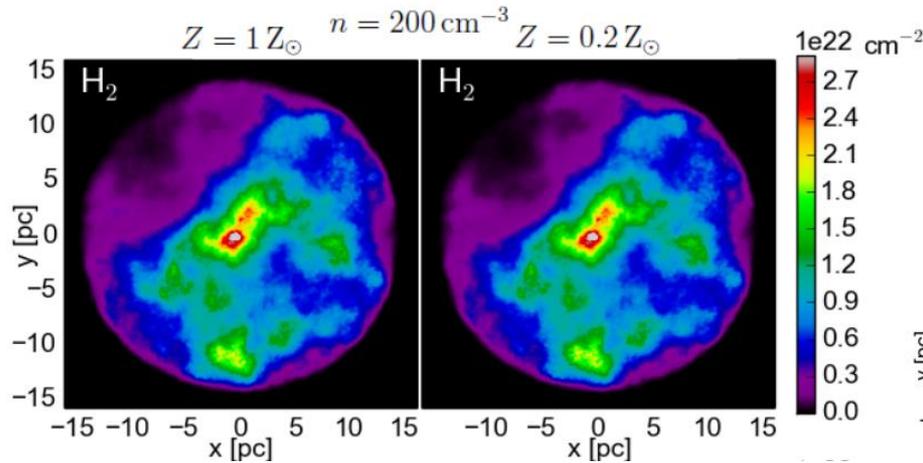


分子雲表面 (Suzuki et al. 1992) 分子雲内部



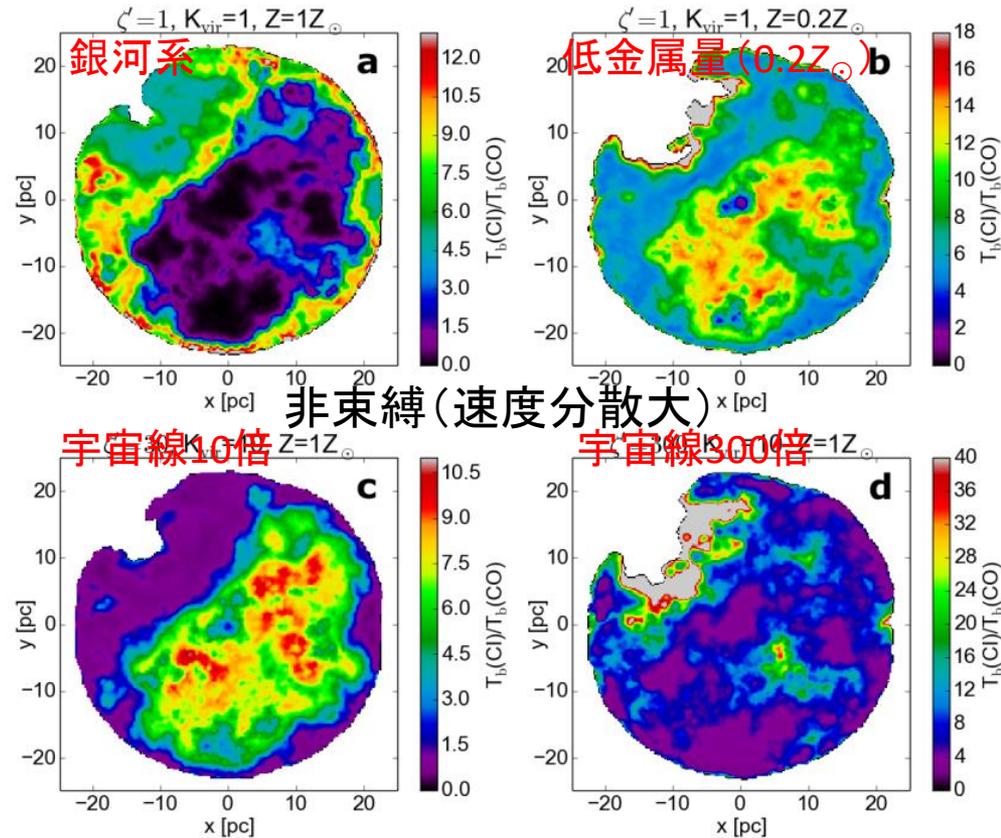
Shimajiri et al. (2013)

中性炭素原子(CI)の分布



$$T_b(\text{CI})/T_b(\text{CO})$$

重力的に束縛

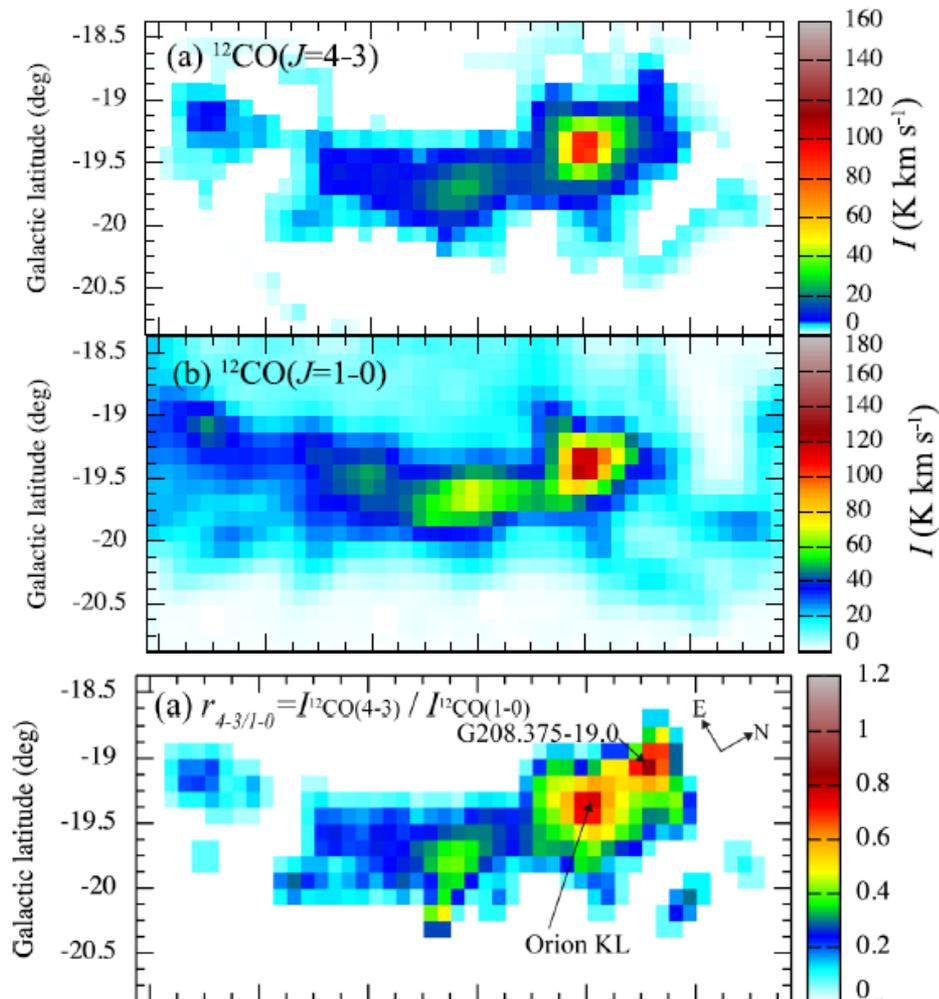
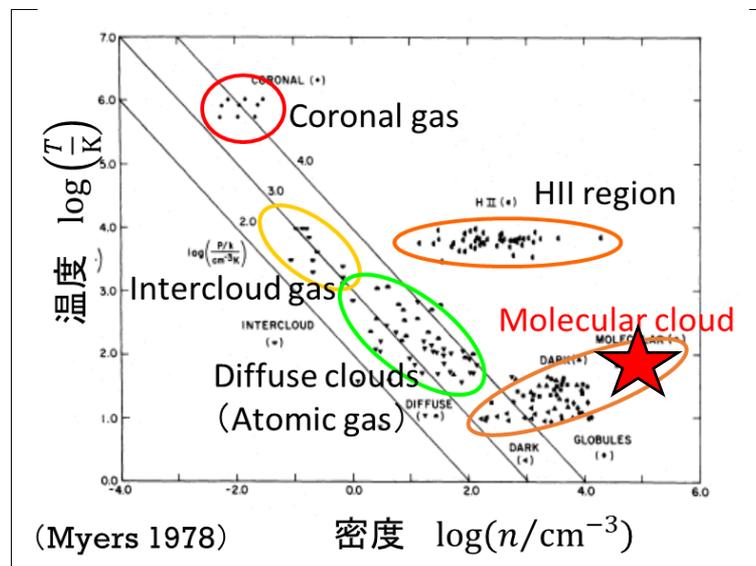


- 密度
- 金属量
- 紫外線
- 宇宙線強度 (GMCの内部までCIに) に依存して大きく変わる
- ⇒ 観測データが不十分
- ⇒ 銀河系の広域観測
 - 暗黒ガスの分布
 - 各パラメータへの依存性

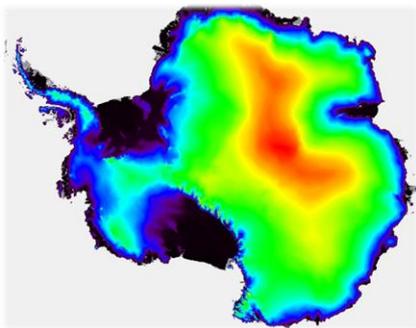
分子雲のシミュレーション
Papadopoulos et al. (2018)

CO($J=4-3$) @461 GHzも同時観測可能

- $E_U/k = 55.6 \text{ K}$ 、 $n_c \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$
- 高温高密度ガス⇒星形成領域
- CO($J=1-0$)の $\sim 1/5$ の強度
(他の高密度トレーサー(HCN, CS)
CO($J=1-0$)の $\sim 1/25$ の強度)
- COの他の輝線との強度比
⇒ 非局所熱力学的平衡計算
⇒ 温度、密度



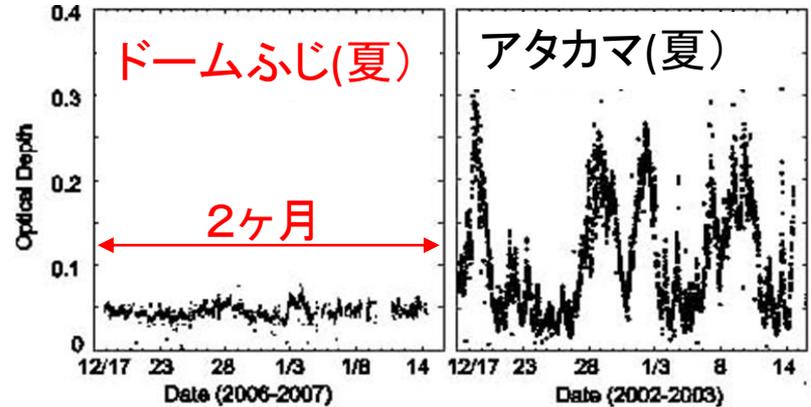
オリオン分子雲
Ishii et al. (2016)



南極からの[CI]($^3P_1-^3P_0$) & CO($J=4-3$)観測

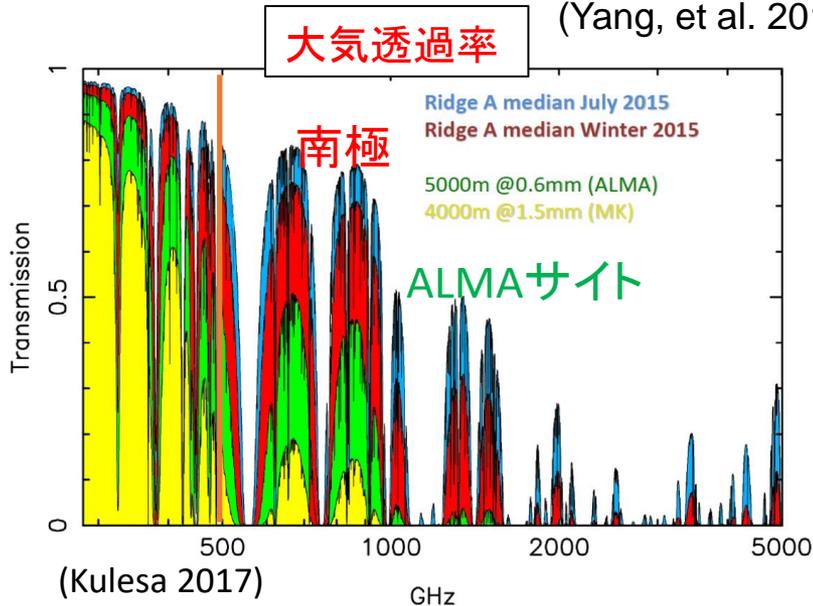
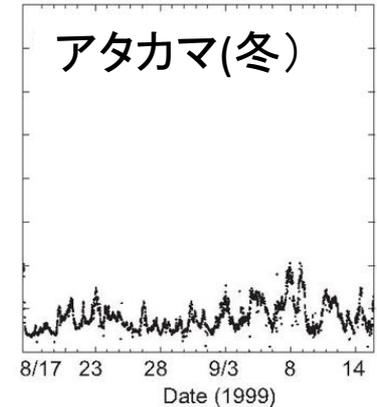
基地	冬季6か月 可降水量(PWV)	
	冬期25%	冬期50%
新ドームふじ (~ドームA)	0.10 mm	0.14 mm
チャナントール (チリ)	0.35	0.60
マウナケア	1.0	1.5

(Yang, et al. 2010)



大気光学的厚さ
@220GHz

(Ishii et al. 2010)



(Kulesa 2017)

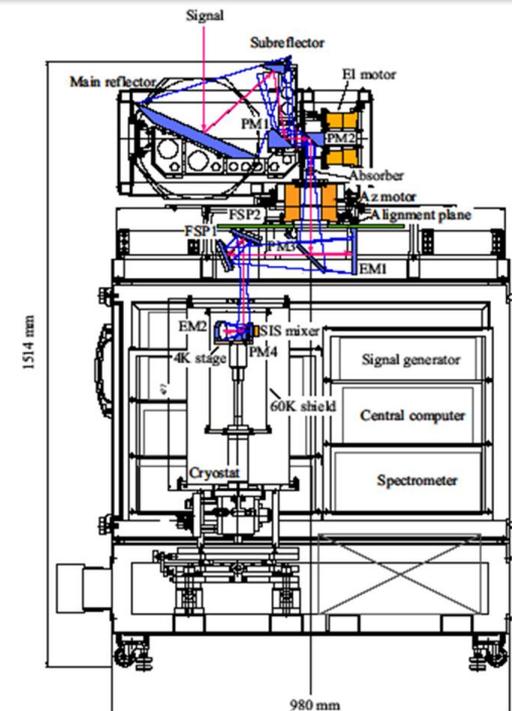
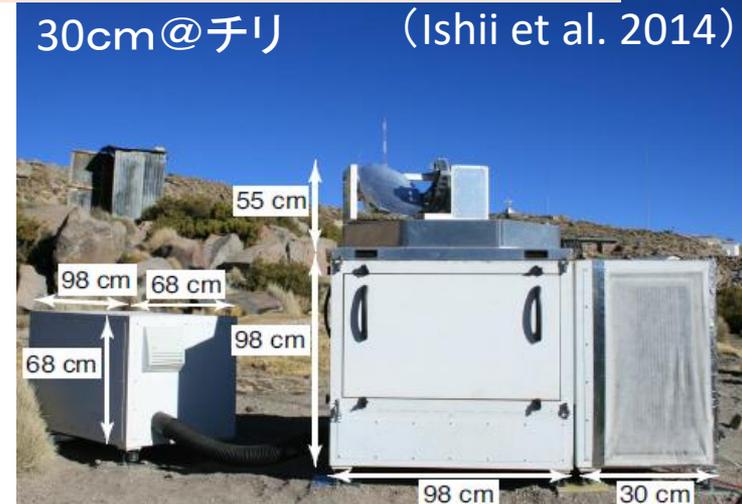
南極のサブミリ-テラヘルツの窓

- 高い透過率
- 極めて安定
 - ⇒ 均一な質のデータ
 - ⇒ 観測時間の確保

⇒ 銀河系広域サーベイ観測を可能に

2. 南極30cmサブミリ波望遠鏡

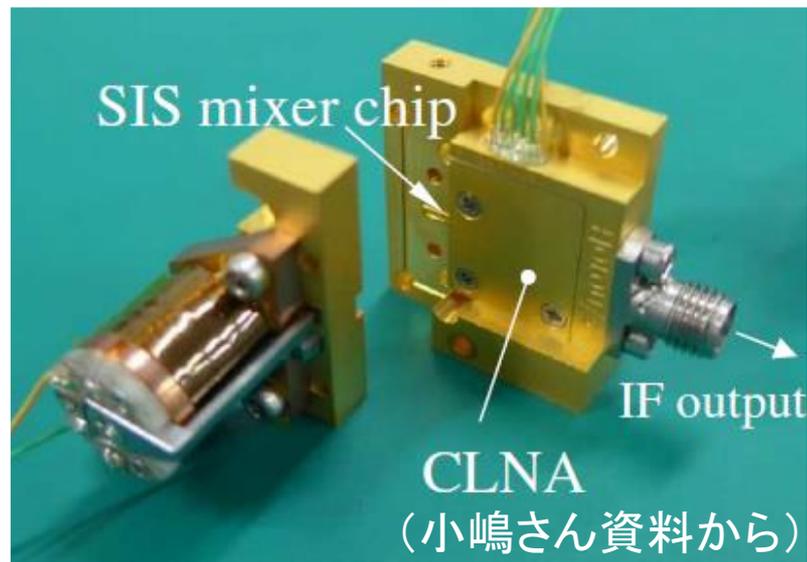
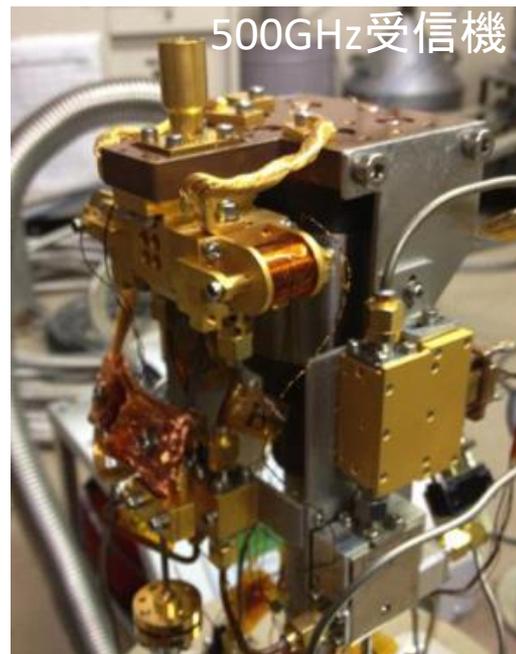
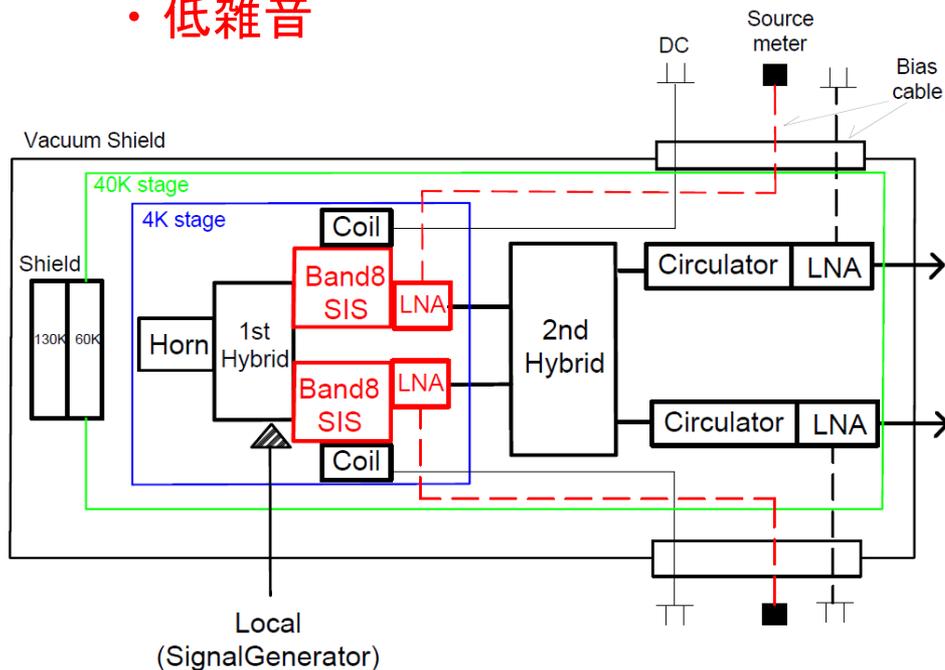
- 口径 : 30 cm
 - CfA CO($J=1-0$)サーベイと同じビームサイズ
- 500 GHz帯 2SB受信機
 - CO($J=4-3$)@461 GHz
 - [CI]($^3P_1-^3P_0$)@492 GHz
- 分光計
 - 帯域幅 : 2.5 GHz (1500 km/s @500 GHz)
 - 分解能 : 88.5 kHz (0.053 km/s @500 GHz)
- 全消費電力 < 2.4 kW
- 低温対策
 - モーター用ヒーター、低温ケーブル
- 人力による分解・組み立て可能
 - 総重量 : 800 kg (輸送用木箱込み)
 - 最も重い部分 : 60 kg
 - 4人で組み立て可能



30cm望遠鏡アップデート(1)

2SB受信機の広帯域・低雑音化

- 国立天文台共同開発研究
- ALMA用に開発された広帯域ミキサー
 - IF帯域: 4-8 GHz \Rightarrow 8-18 GHz
 - [CI](${}^3P_1 - {}^3P_0$): 492 GHz
 - CO($J=4-3$): 461 GHz
 - 2SBによって2輝線同時観測
 - 低雑音



30cm望遠鏡アップデート(2)

光学ポインティング装置

- ・ 南極夏季: 昼
⇒ 日中の光学ポインティングが必要: 広視野($\sim 1^\circ$) (~ 3 等星まで)
- ・ 光学軸と電波軸の調整

分光計&リダクションソフト

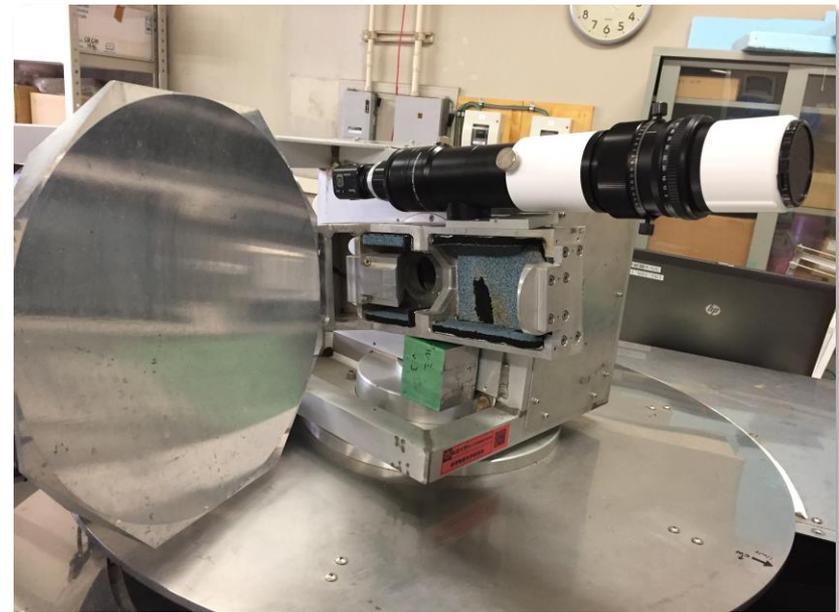
- ・ 広帯域化(1 GHz \Rightarrow 2.5 GHz)
- ・ 2輝線同時観測 \Rightarrow 2チャンネル化
- ・ OTF対応

望遠鏡筐体改修

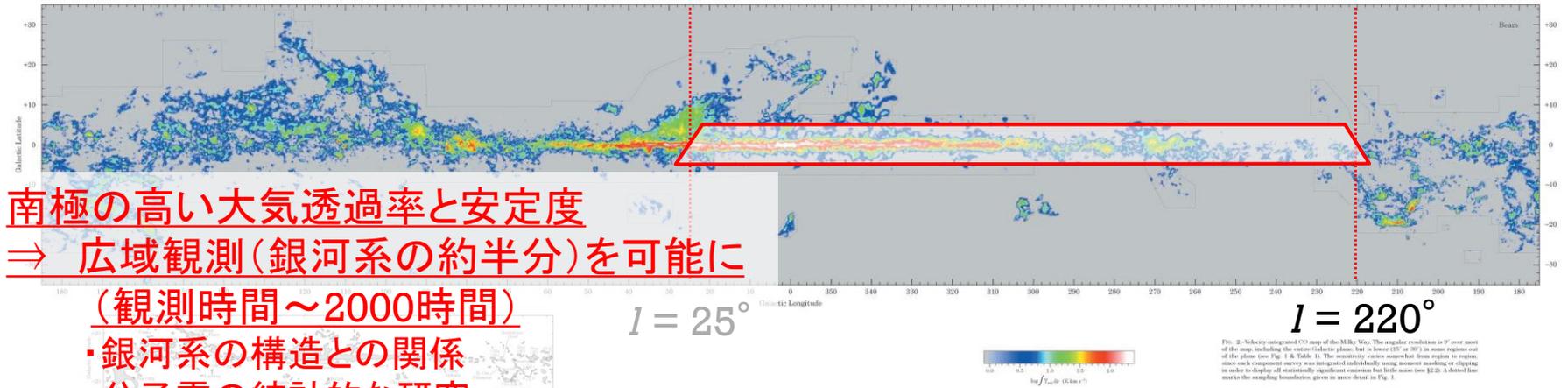
- ・ 受信器設置方法を簡便化

将来

- ・ 冬季の観測
⇒ THzの観測([CI]809 μ m, [NII]など)
- ・ テラヘルツ光子計数型干渉計(国立天文台 松尾他)
- ・ 南極10mテラヘルツ望遠鏡へ



観測可能領域 (ELのピーク > 20°)



南極の高い大気透過率と安定度
⇒ 広域観測(銀河系の約半分)を可能に

(観測時間 ~ 2000時間)

- ・銀河系の構造との関係
- ・分子雲の統計的な研究

$l = 25^\circ$

$l = 220^\circ$

Fig. 2. Velocity-integrated CO map of the Milky Way. The original resolution is 3" over most of the map, including the entire Galactic plane, but is lower (35" or 30") in some regions out of the plane (see Fig. 1 & Table 1). The sensitivity varies somewhat from region to region, since each component survey was integrated individually using moment masking or clipping in order to display all statistically significant emission, but false noise level (2.2). A dotted line marks the observing boundaries, given in more detail in Fig. 1.

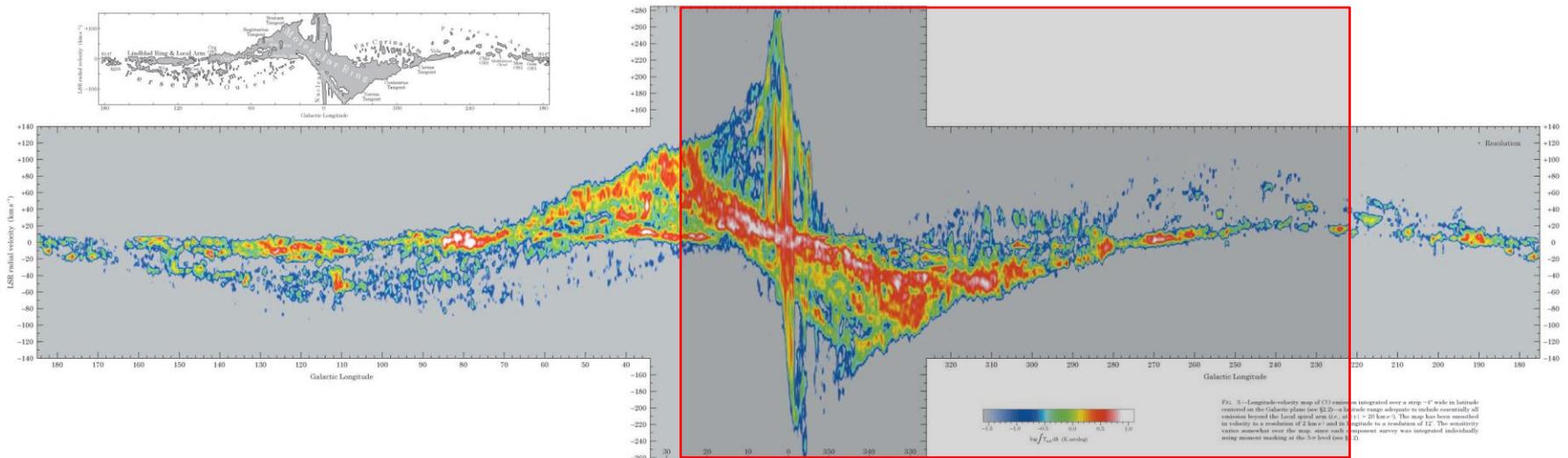
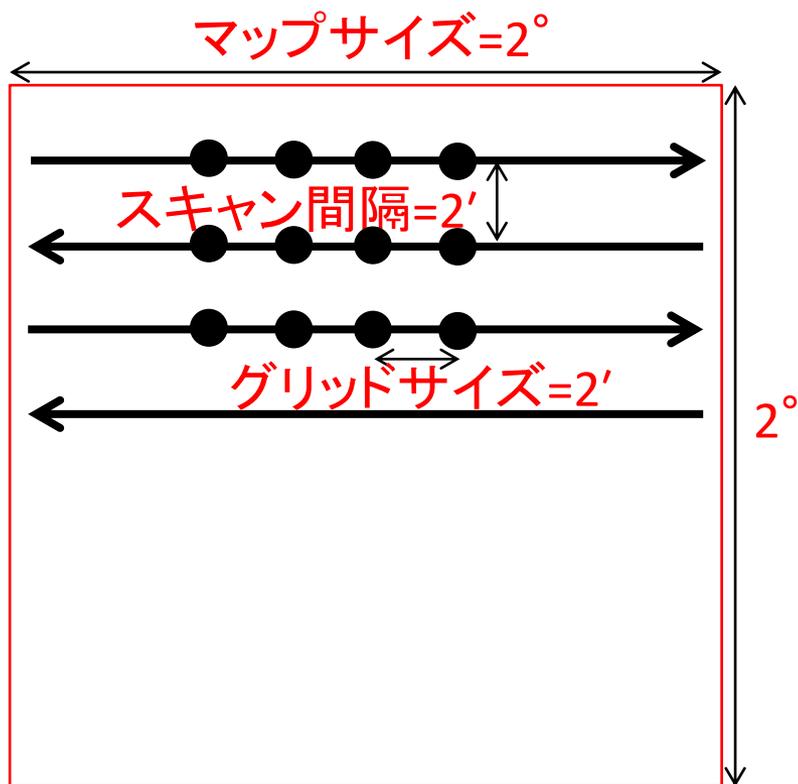


Fig. 3. Longitudinal velocity map of CO emission on the Galactic plane from 80.2 to 120 km s⁻¹ in velocity. The map has been smoothed in velocity to a resolution of 2 km s⁻¹ and the survey was integrated individually using moment masking at the 5σ level (see Fig. 2).

CO(J=1-0) (Dame et al. 2001)

OTF観測



項目	値
実効的ビームサイズ (Bessel*Gauss)	9.2'
観測時間 (2° × 2°) (X+Yマップ)	3.0時間
観測時間(165° × 6°) (X+Yマップ) × 2	~2000時間 (~2か月)
$T_{rms}(T_{mb})$	0.044 K CfAサーベイの 1/4-1/10

✓ $T_{sys} = 250 \text{ K}$ @EL=40°

- $\tau = 0.2$ (天頂)

- $T_{rx} = 100 \text{ K}$

参考: 600-1000 K (DSB)

@Pampa la Bola (Chile)(Oka et al. 2005)

$CO(J=4-3)/CO(J=1-0) \sim 0.2-1.1$

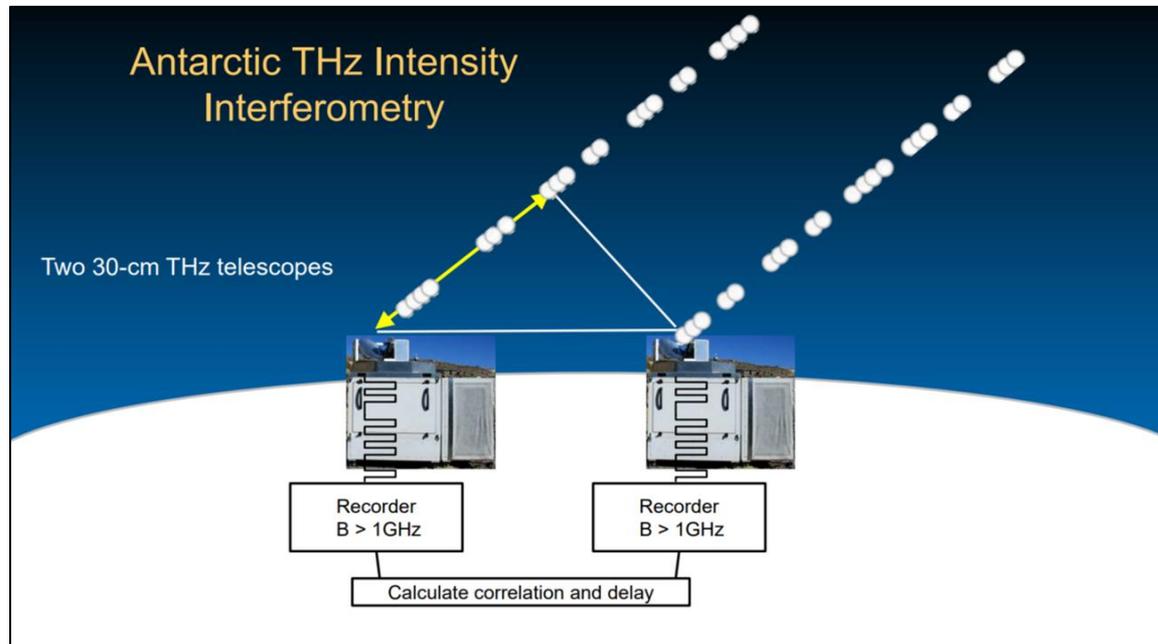
@Orion A GMC (Ishii et al. 2016)

$[C I](^3P_1-^3P_0)/CO(J=1-0) \sim 0.12$

@Milky Way (Oka et al. 2005)

➤ テラヘルツ強度干渉計

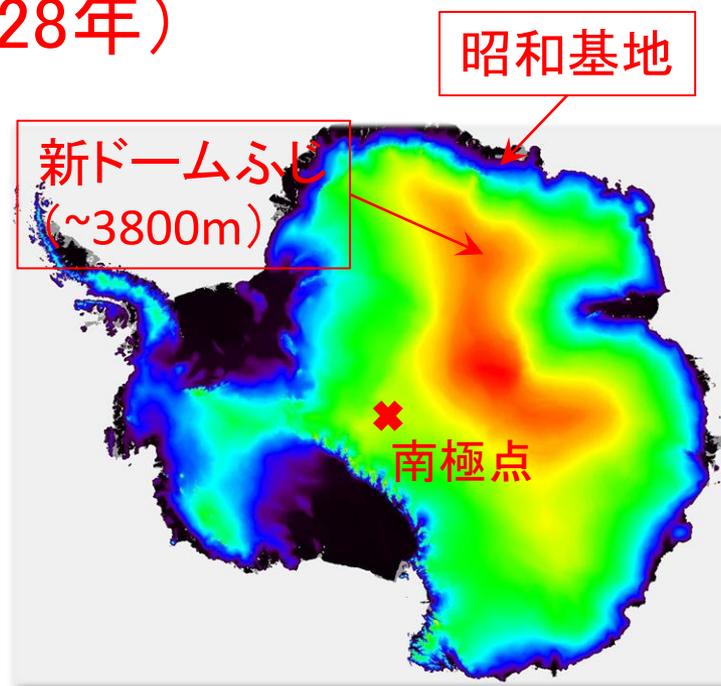
- 30cm望遠鏡2号機を追加（1号機のコピー）
- 2台の離れた（～10 m）アンテナによる強度相関データの取得
- サブミリ波（500 GHz）での初めての強度干渉計実験の成功
- テラヘルツ干渉計実現に向けての課題確認



3. 南極での観測計画

・国立極地研：南極計画X期一般研究観測(PI久野)で
採択(2023年-2028年)

- ・新ドームふじ基地(～3800 m)
 - ・南緯77° 19' 1"
 - ・昭和基地から～1000 km
 - ・雪上車で～2週間



ドームふじ基地(極地研ホームページより)

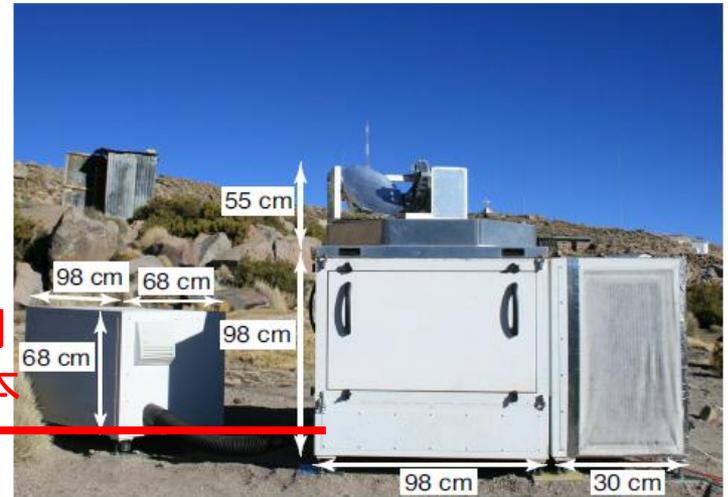
観測棟

- 20フィートコンテナをそりに搭載
 - 室温は $+0^{\circ}\text{C}$ 以上
 - 簡易トイレ設置(間仕切り付き)
 - 電力線・同軸ケーブル・LANケーブルの引き込み用口(穴)
可能であれば
 - 入口に前室(出入りの際に外気が直接入らないように)
 - 望遠鏡が見える窓
- 望遠鏡の南側に設置($\sim 15\text{m}$) (北側をできるだけ低高度まで観測)
- 気象タワー: 高さ 10 m、気温、気圧、水蒸気分圧

観測棟

- 分光計
- パソコン関係
- 蓄電池

制御用・信号用
ケーブル×数本



- 受信機
- アンテナ制御ボックス

望遠鏡の南側
($\sim 15\text{m}$)



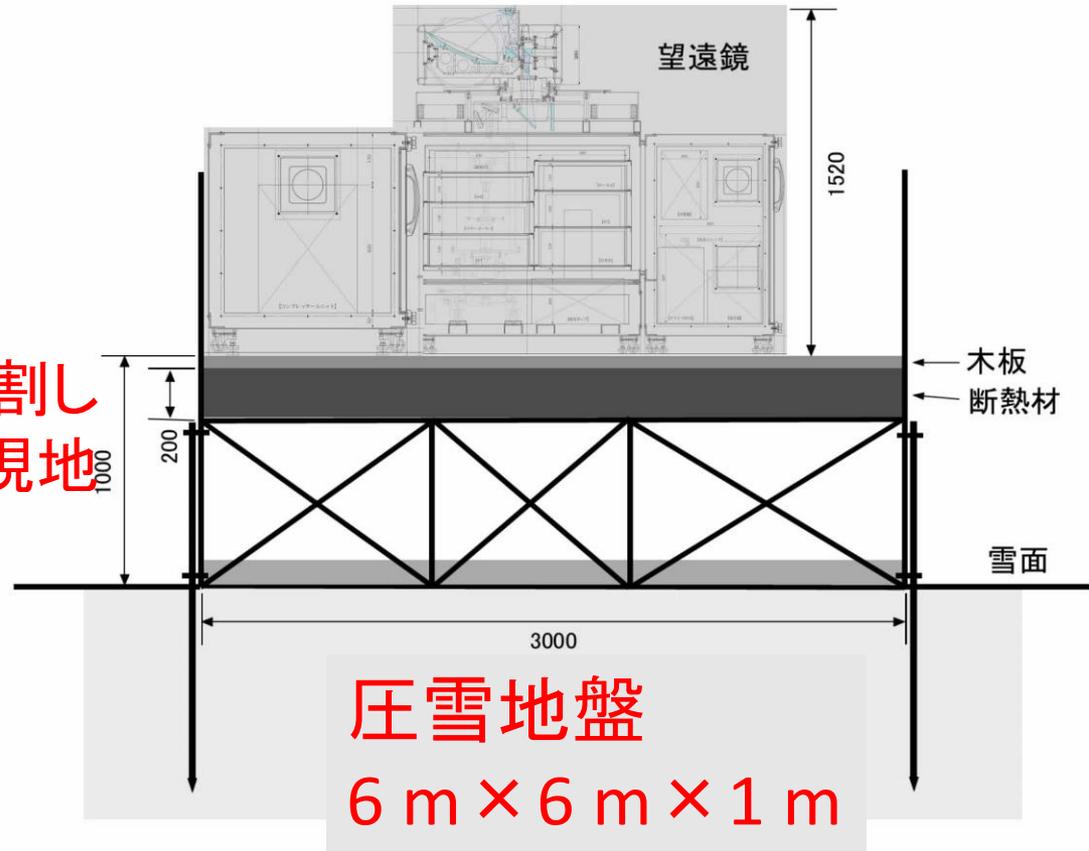
ケーブルラック
(参考:ドームC)

望遠鏡設置

望遠鏡台(観測時側面図) (2021.7.28)

高床式台

- 国内で組立て、2分割してコンテナで運び、現地で結合



- 雪上車を利用して整備

- 2号機は、できれば橇に搭載

輸送

- 30cmサブミリ波望遠鏡

- 総重量: 800 kg
- 分割後は60 kg以下



- 防振パレットの開発（松田技術研究所）

- 過去の振動データを参考

- 極地研にて木箱に梱包

- 内陸へは木箱単位で輸送

- コンテナは使用しない



金属製防振サス
低温にも強い

- 低温に弱い機器は橇輸送の物資とは別に梱包し雪上車で輸送

- 昭和基地内に退避

電力供給

冬季無し

- ・ディーゼル発電機
- ・バックアップ: 太陽光発電 + 蓄電池
- ・冬季: 風力発電 + 蓄電池

システム構成図

200h毎に3h停止
3hの発電機停止時のバックアップ
2.5kWhx3h=7.5kWh



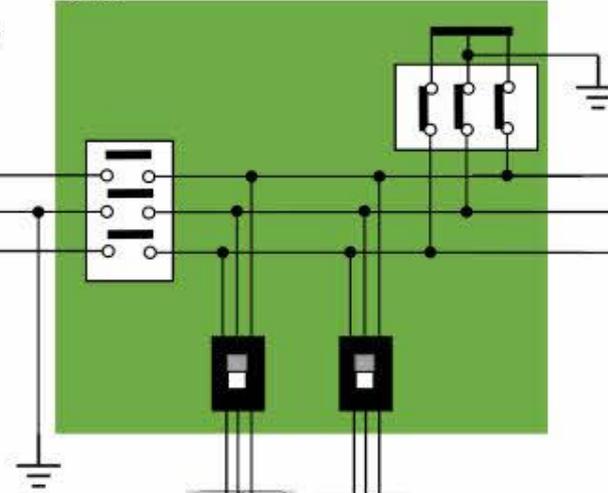
発電機の仕様
燃料: 軽油 (ディーゼル発電)
燃料容量: 3.31ℓ
(電気特性)
電気方式: 単相2線式
電圧: 110V
最大電流: 30A
周波数: 60Hz

ディーゼル発電機



単2/単3
変換トランス

切替盤



単2/単3
変換トランス

電力



- 望遠鏡運用(夏)
- ・2.4 kW(2025年度まで)
 - ・5 kW(2026年度以降)

- 望遠鏡保温(冬)
- ・20 W(2025年度まで)
 - ・40 W(2026年度以降)

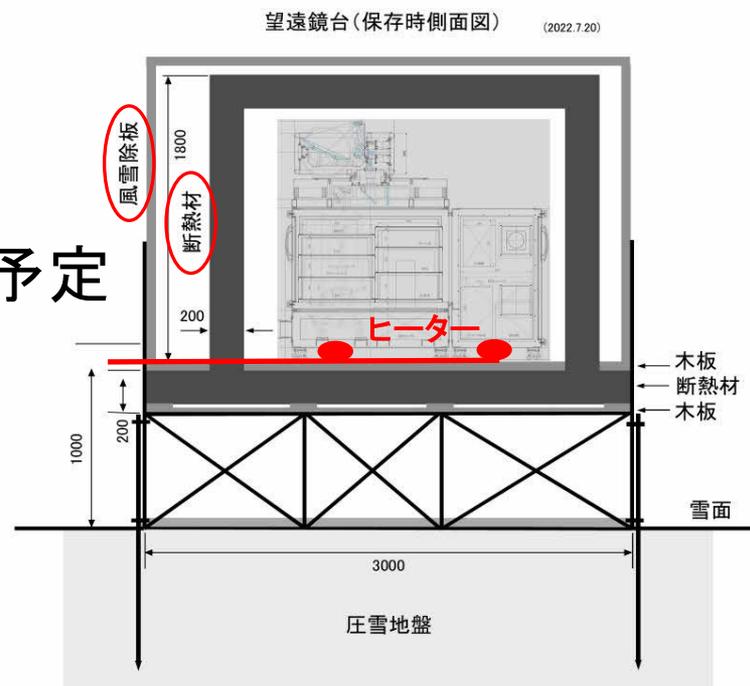
越冬対策

- 低温に弱い装置(アンテナ制御ボックス、分光計など)は、昭和基地に毎冬退避(雪上車にて輸送)
- アンテナ本体も低温対応(グリース、ケーブルなど)
- 風雪除板、断熱材で保護

⇒ 冬季でも問題ない

低温試験を気象研究所@つくばで実施予定

- 風力発電によるヒーターも用意
 - うまくいけば、将来的に冬季の観測へとつながる



スケジュール

	2023年		2024年		2025年		2026年		2027年		2028年		2029年
	3月	11月	3月	11月	3月	11月	3月	11月	3月	11月	3月	11月	3月
夏隊			66次 (4名)		67次 (2名)		68次 (2名)		69次 (3名)				
越冬隊									69次 (1名)				
30cm望遠鏡1号機		第1便 昭和基地へ		ドームふじ へ		立ち上げ・ 試験・観測		観測			観測		観測
30cm望遠鏡2号機						昭和基地へ		立ち上げ・ 試験					撤収

➤ 夏季のみ観測

➤ 現地滞在時間： 6週間(～7週間)/年 : 1日24時間観測可能

⇒ ～3000時間 + α (後半3年間 + α)

➤ 銀河面サーベイ観測時間： ～2000時間

- 残りの時間は干渉計実験、保守、ポインティング測定、撤収など

➤ 銀河面サーベイはスケジューラによる自動観測

まとめ

南極30cm望遠鏡計画

- [CI]($^3P_1 - ^3P_0$) & CO($J=4-3$)銀河面サーベイ
 - 希薄な分子ガス + 高温高密度分子ガス
- 極地研一般研究観測に採択
 - 2023年 - 2028年
 - のべ12人を南極内陸部ドームふじへ派遣
- 30cm望遠鏡アップデート
 - 制御ボックス改修
 - 500GHz受信機の広帯域・低雑音化
 - 新分光計
 - 日中測定可能な光学ポインティングシステム