

南極30cmサブミリ波望遠鏡計画

久野成夫(南極天文学研究部門)

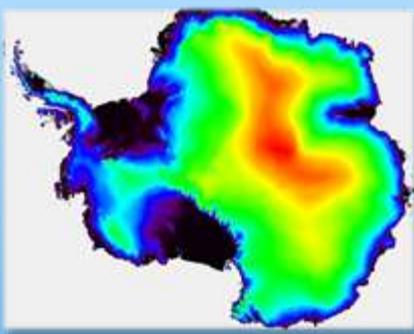
新田冬夢、橋本拓也、齋藤弘雄、Dragan SALAK、瀧口風太、

小山 徹、加藤良寛(筑波大学)、瀬田益道、中井直正(関西学院大学)、

徂徠和夫、八嶋 裕、清水一揮(北海道大学)、永井 誠、梅本智文、小嶋崇文、

鵜澤佳徳、伊王野大介(国立天文台)、長崎岳人(KEK)

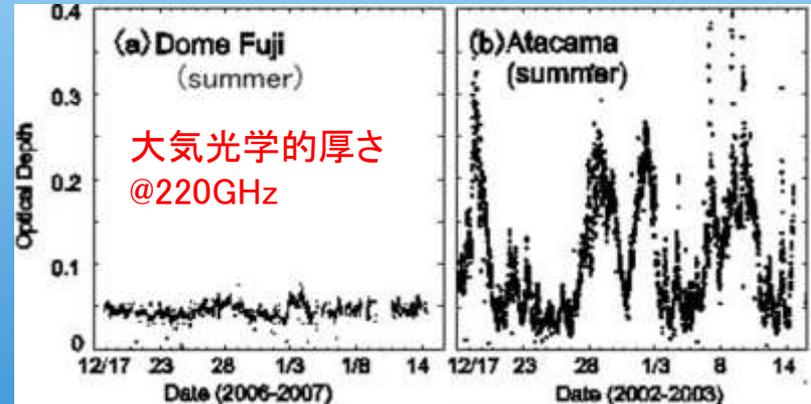
南極天文コンソーシアム



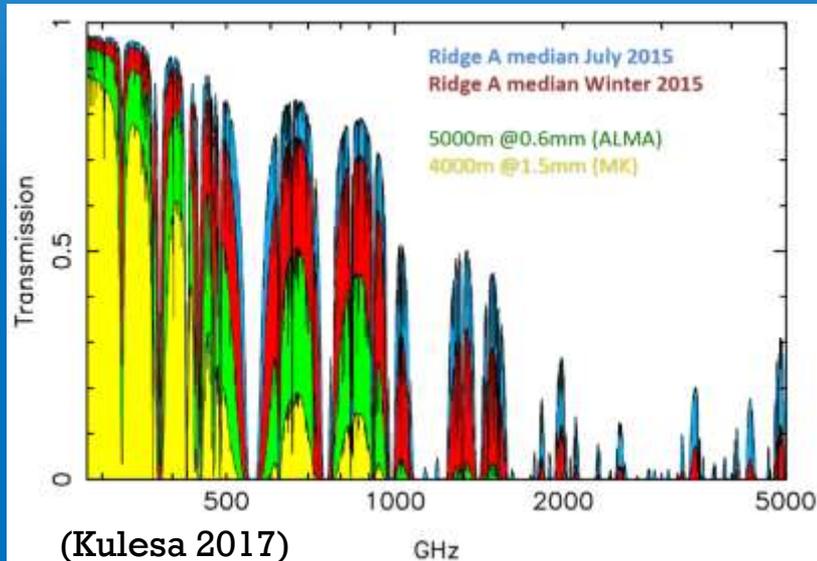
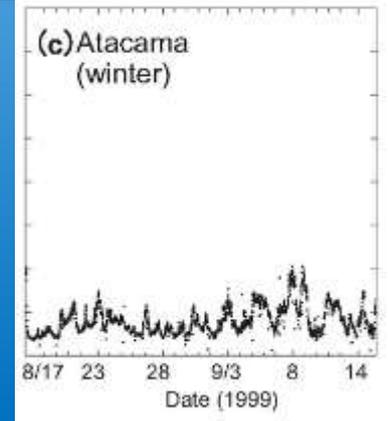
南極からの天文観測

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)



(Ishii et al. 2010)



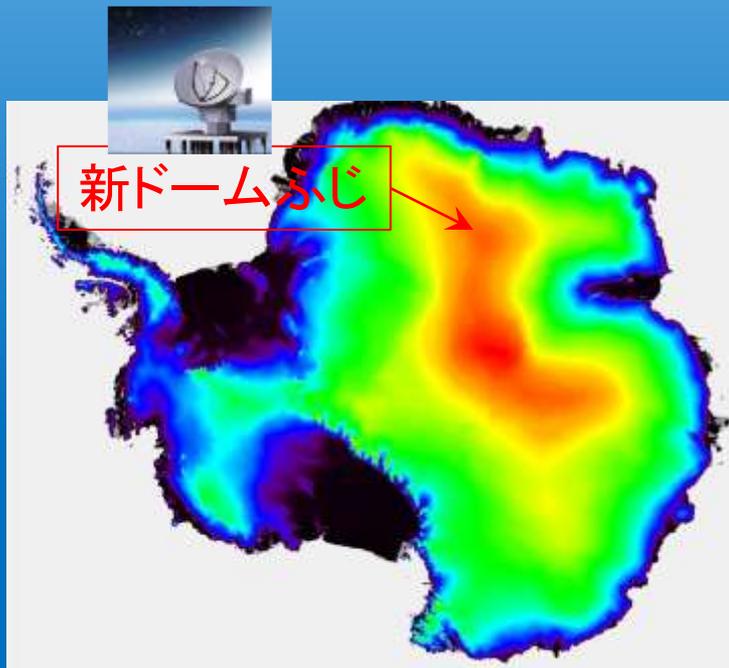
(Kulesa 2017)

サブミリ-テラヘルツの窓

- 遠方銀河の星間ダスト熱放射
- CO高励起輝線、[CI]、[NII]、CH、H₂D⁺など
⇒ 銀河やAGNの形成・進化
⇒ 星間物質の進化・星形成

10Mテラヘルツ望遠鏡

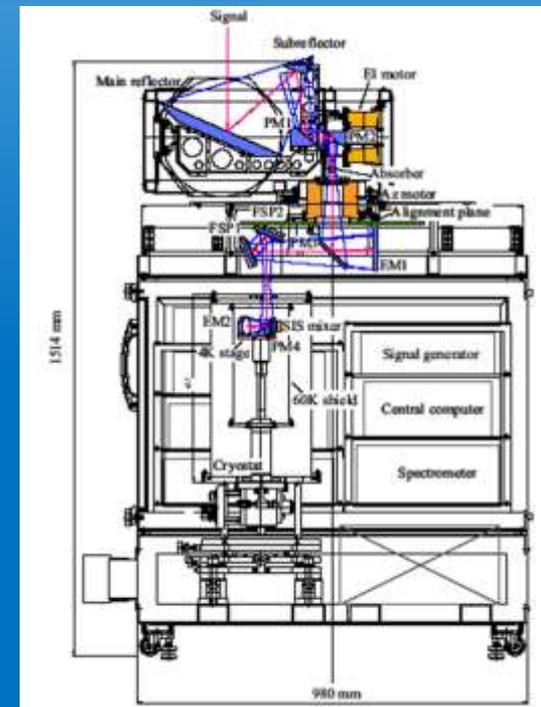
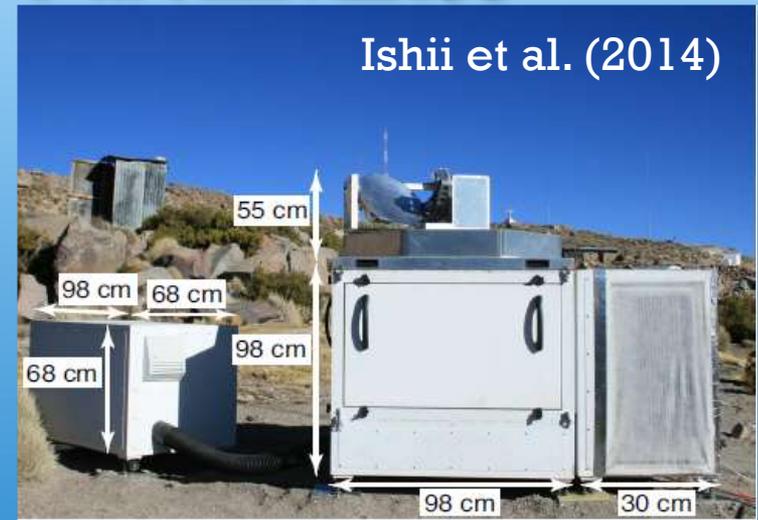
- 南極内陸部に10mテラヘルツ望遠鏡
 - 200 GHz - 1.5 THz
 - 連続波カメラ、ヘテロダイン受信機(分光観測)
 - 広視野 $\sim 1^\circ$
⇒ 30m望遠鏡
- 新ドームふじ基地 ⇐ 国立極地研将来構想とのリンクが重要



南極観測将来構想(南極未来ビジョン2034)(極地研)より

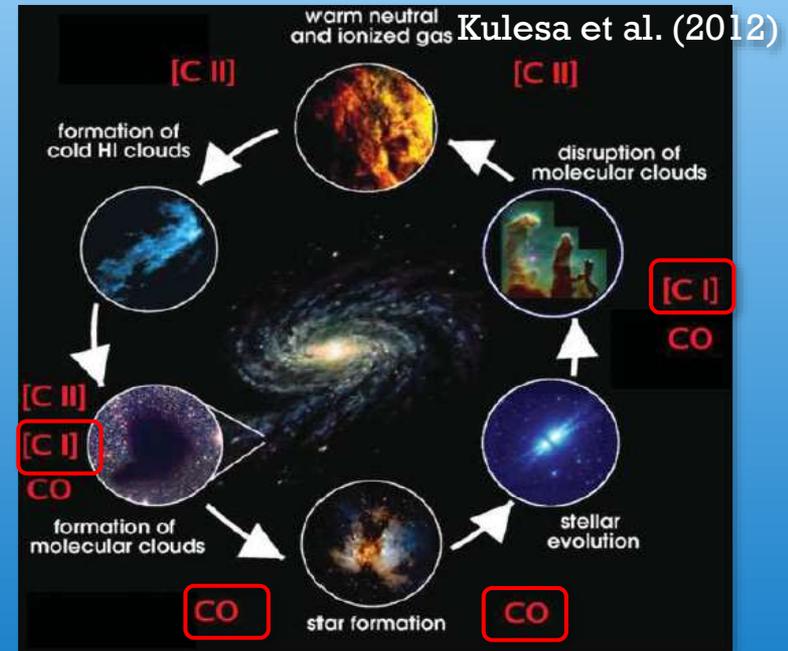
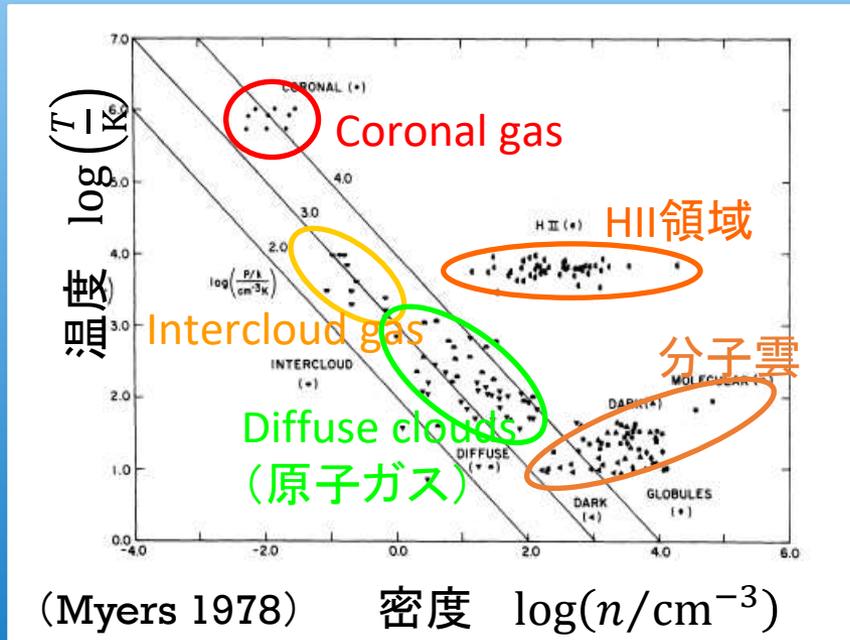
南極30cmサブミリ波望遠鏡

- 500GHz 2SB受信機
- 角分解能 $\sim 9'$
- 低消費電力 $< 2.4\text{kW}$
- 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



CO(J=4-3)&[CI](³P₁-³P₀)銀河面サーベイ

- 星間ガスの進化・星形成過程の理解 (星間ガスの質量、密度、温度、速度構造などの情報が不可欠)



- 低温の水素分子は直接観測できない(電気双極子モーメントを持たない)

参考: CO(J=1-0) @115GHz ($E_U/k = 5.5 \text{ K}$, $n_{crit} \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$)

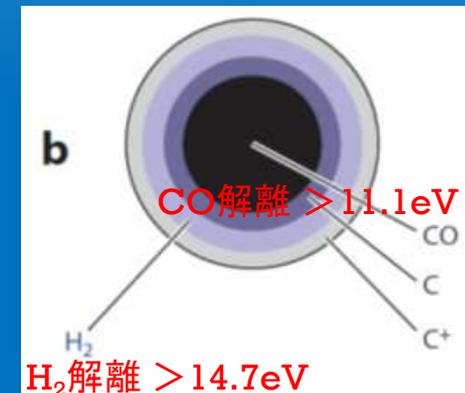
光学的に厚い \Rightarrow 分子雲の表面だけ

[C I](³P₁-³P₀) @492GHz ($E_U/k = 23.4 \text{ K}$, $n_{crit} \sim 500 \text{ cm}^{-3}$)

- 希薄な分子ガス、CO dark gas/暗黒ガス(COが解離された領域)、光学的に薄い \Rightarrow 分子ガスのよいトレーサー?
- 分子雲の形成・破壊 \Rightarrow まだよくわかっていない

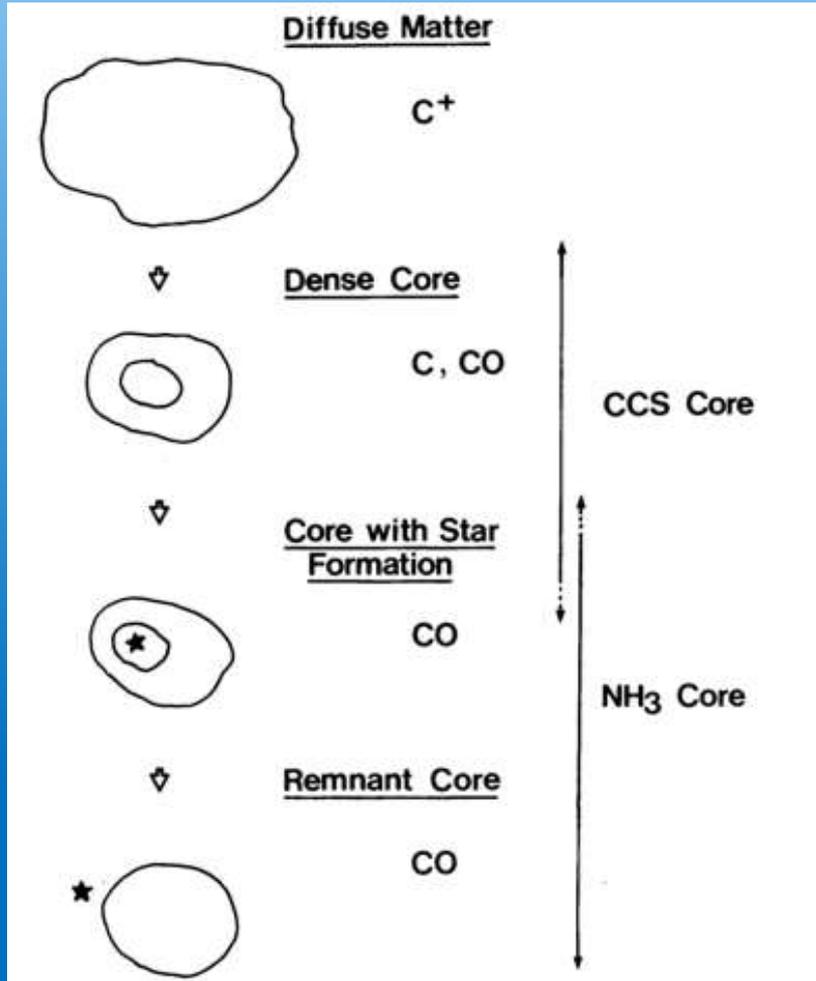
CO(J=4-3) @461GHz ($E_U/k = 55.6 \text{ K}$, $n_{crit} \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$)

- 星形成領域の高温高密度分子ガス

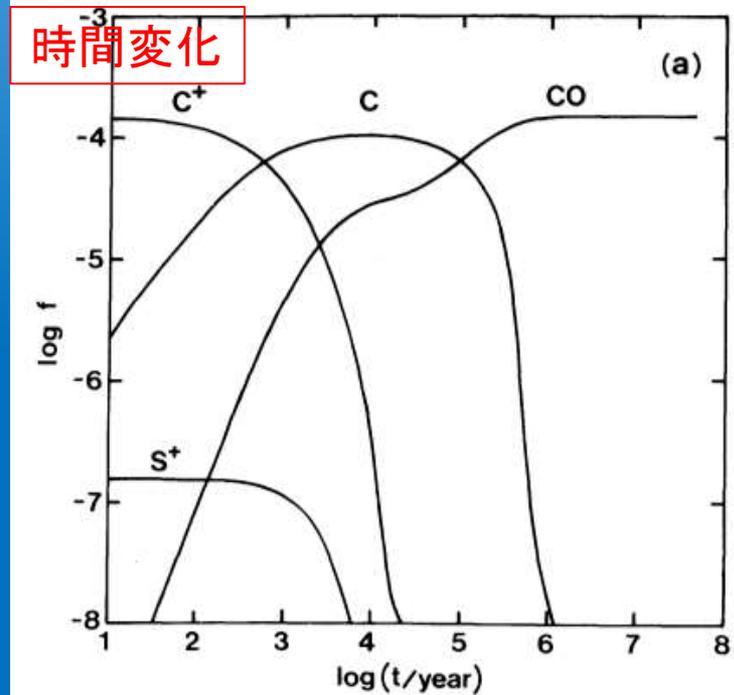
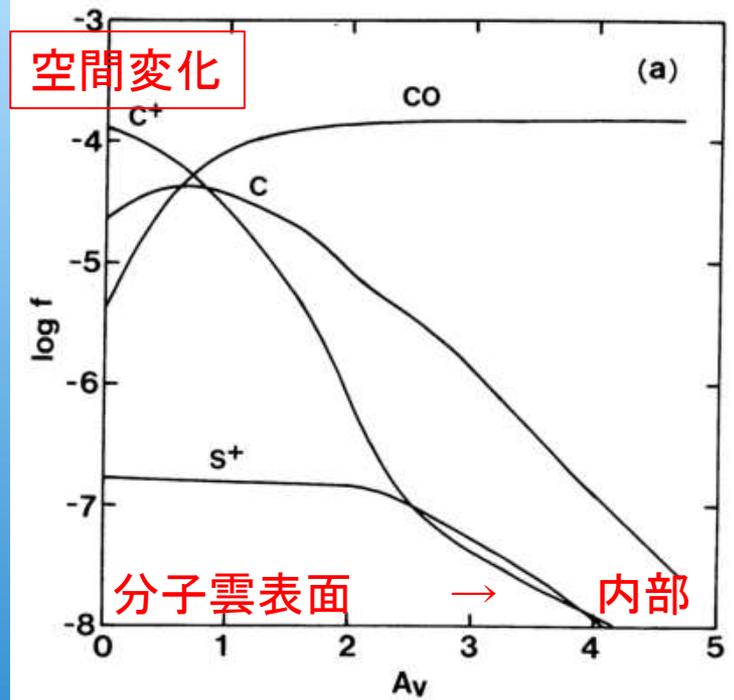


化学進化とCI

分子雲の組成は、時間的に変化する

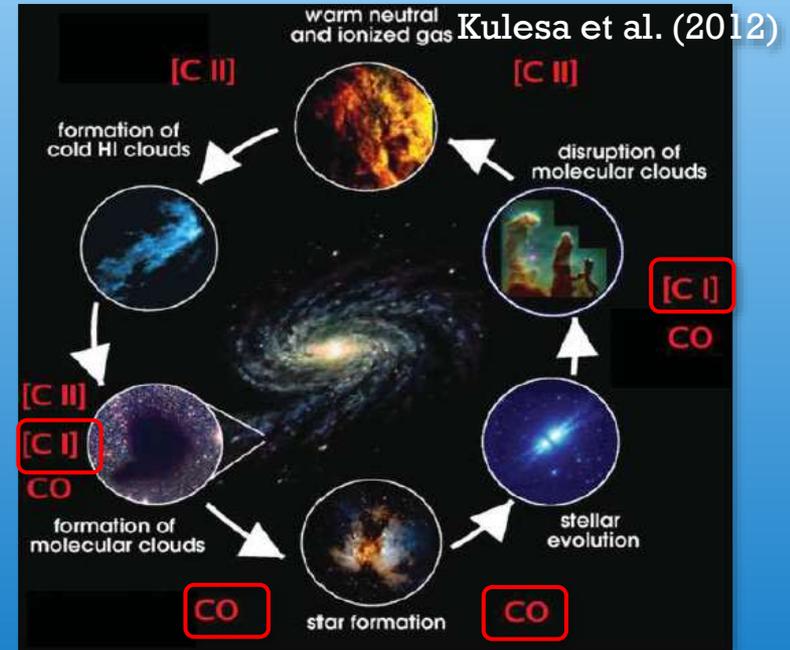
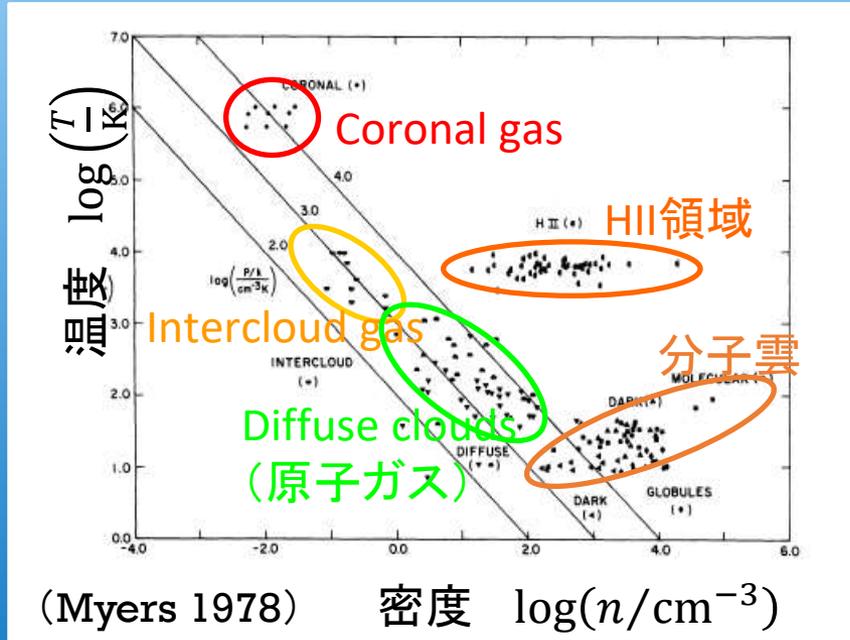


(Suzuki et al., ApJ 1992)



CO(J=4-3)&[C I](³P₁-³P₀)銀河面サーベイ

星間ガスの進化・星形成過程の理解



低温の水素分子は直接観測できない

参考: CO(J=1-0) @115GHz ($E_U/k = 5.5 \text{ K}$, $n_{crit} \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$)

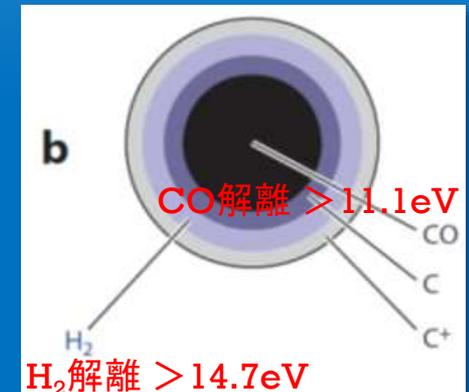
光学的に厚い \Rightarrow 分子雲の表面だけ

[C I](³P₁-³P₀) @492GHz ($E_U/k = 23.4 \text{ K}$, $n_{crit} \sim 500 \text{ cm}^{-3}$)

- 希薄な分子ガス、CO dark gas/暗黒ガス(COが解離された領域) \Rightarrow 分子ガスのよいトレーサー?
- 分子雲の形成・破壊 \Rightarrow まだよくわかっていない

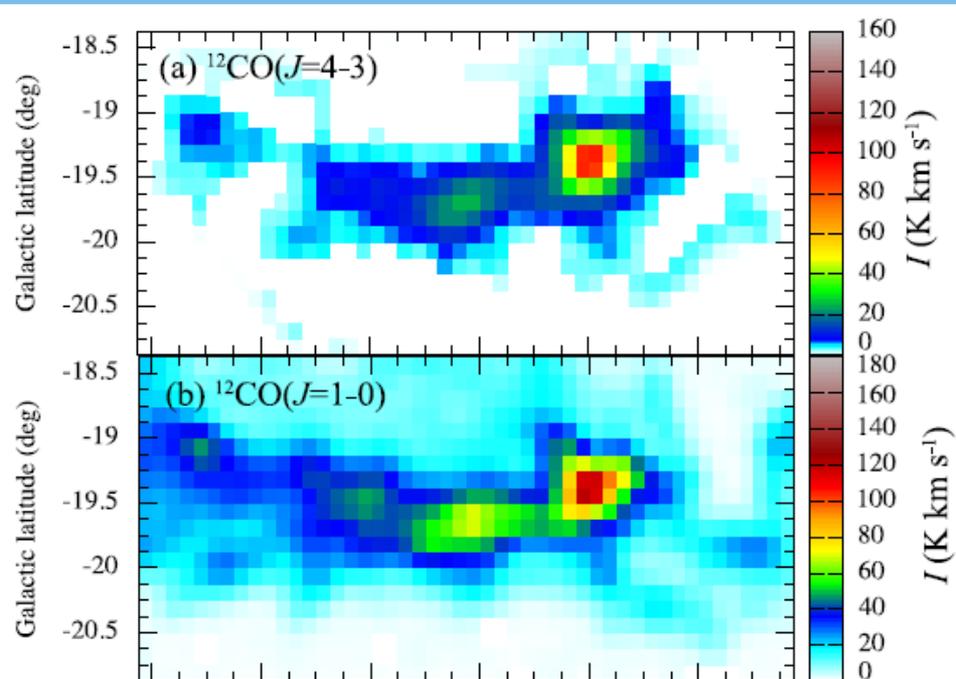
CO(J=4-3) @461GHz ($E_U/k = 55.6 \text{ K}$, $n_{crit} \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$)

- 星形成領域の高温高密度分子ガス



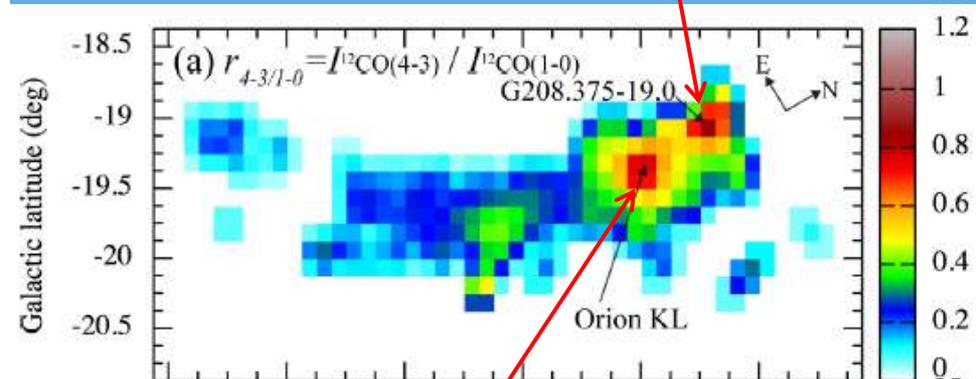
オリオン分子雲のCO($J=4-3$)観測

高温高密度ガス



Ishii et al. (2016)

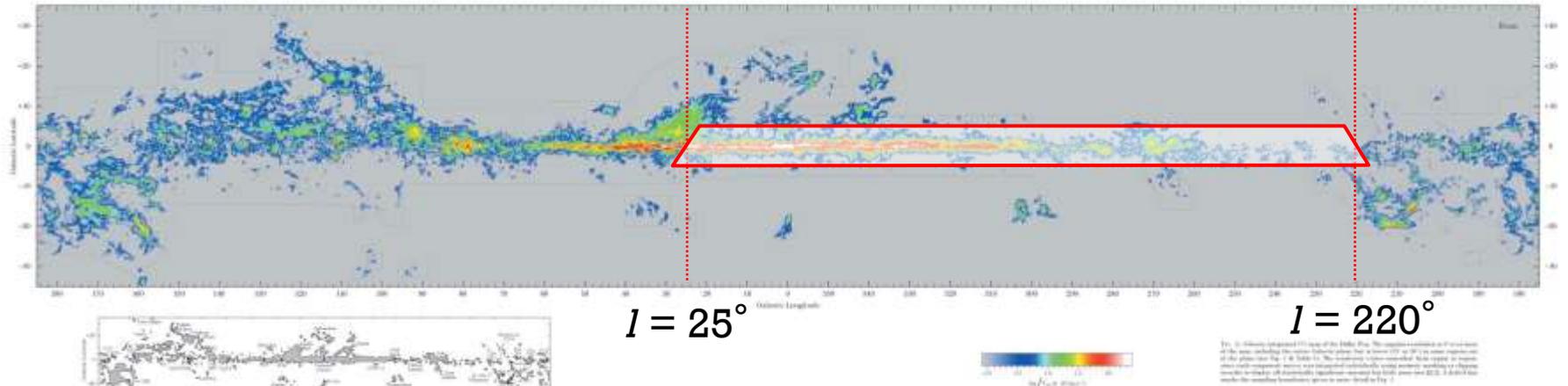
$$\frac{\text{CO}(J=4-3)}{\text{CO}(J=1-0)} = 0.9 \Rightarrow 60\text{K}$$



$$\text{KL} : \frac{\text{CO}(J=4-3)}{\text{CO}(J=1-0)} = 1.1 \Rightarrow 90\text{K}$$

個別天体観測 \Rightarrow 銀河系全体の広域観測

観測可能領域 (ELのピーク > 20°)



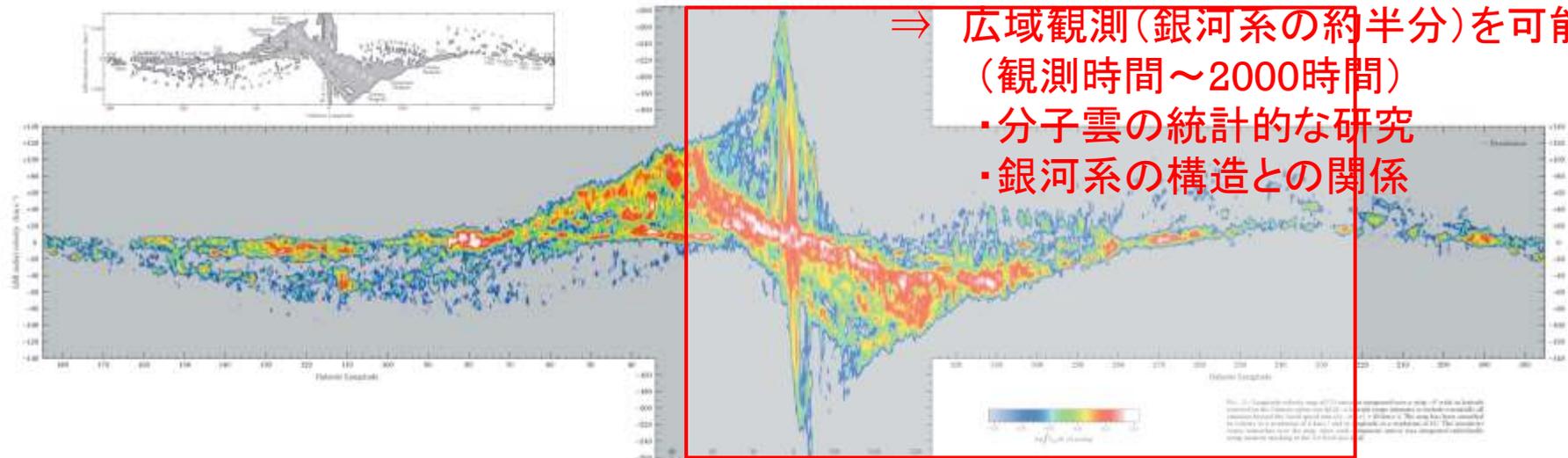
$l = 25^\circ$

$l = 220^\circ$

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)

- ・分子雲の統計的な研究
- ・銀河系の構造との関係



CO($J=1-0$) による銀河面サーベイ (Dame et al. 2001)
(角分解能は南極30cm望遠鏡と同じ9')

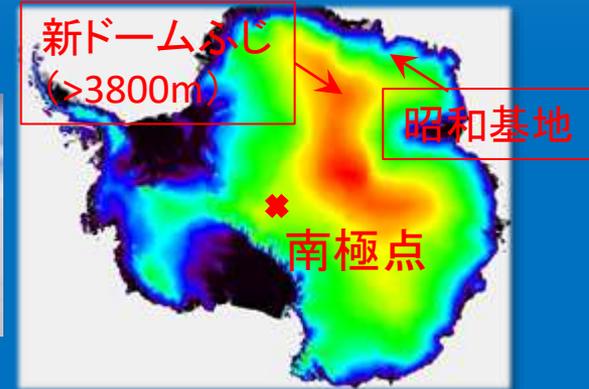
望遠鏡設置サイト

- 新ドームふじ基地 (> 3800m, 南緯77.3° 東経39.7°)
- 国立極地研: 南極計画X期(2022年-2027年)一般研究観測
 - 2021年5月 申請済み(PI: 久野) 8月中に審査結果
 - 夏季のみ観測 (将来的には冬季観測も視野に)

	2022年		2023年		2024年		2025年		2026年		2027年		2028年		2029年	
	11月	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	3月	
夏隊	64次 (0名)	→	65次 (0名)	→	66次 (3名)	→	67次 (2名)	→	68次 (3名)	→	69次 (2名)					
越冬隊	64次 (1名)	→		65次 (1名)	→		66次 (1名)	→		67次 (1名)	→		68次(1名)	→		69次 (1名)
新ドームふじ			庄雪地盤													
望遠鏡台			昭和基地へ		新ドームふじへ 立ち上げ・試験		観測		観測		観測		観測		観測	
30cm望遠鏡																
望遠鏡台							昭和基地へ		新ドームふじへ 立ち上げ・試験							
30cm望遠鏡2号機															撤収	



ドームふじ基地(極地研ホームページより)



南極での運用

• 輸送

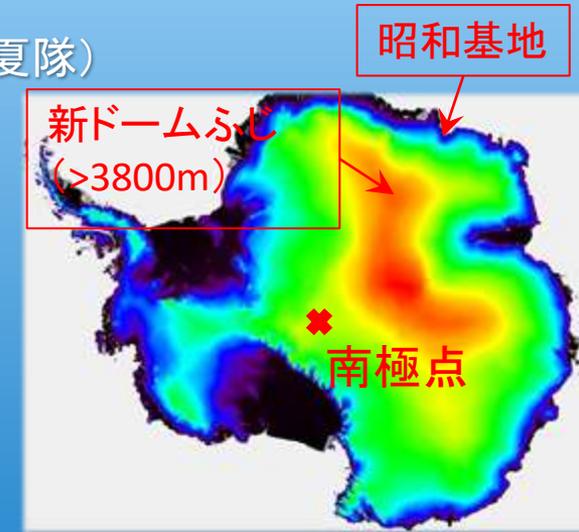
- 日本⇒昭和基地： しらせ(2ヶ月)、DROMLAN(航空機)(夏隊)
- 昭和基地⇒新ドームふじ： 雪上車(2~3週間) **振動対策**

• 電力

- 夏季：極地研が供給(掘削用)
- 冬季保温用：太陽光発電用パネル+蓄電池を設置

• 観測棟

- コンテナを雪上車の上に設置(極地研が用意)



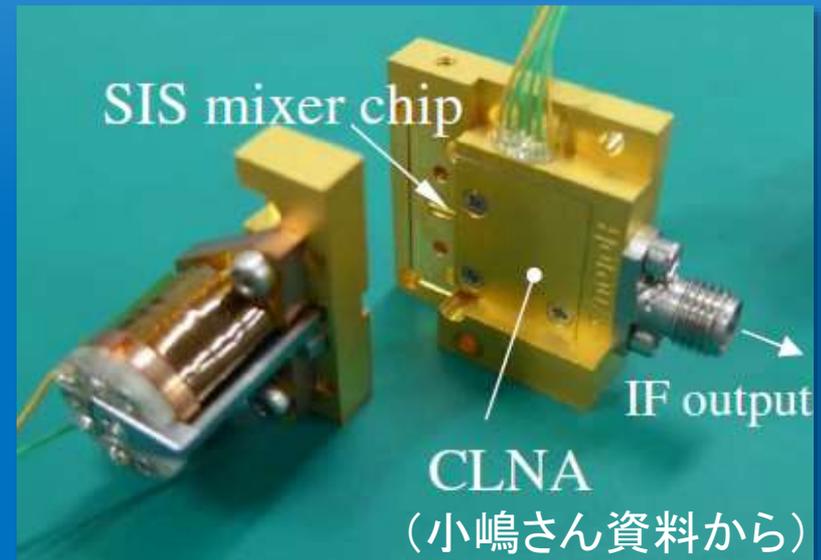
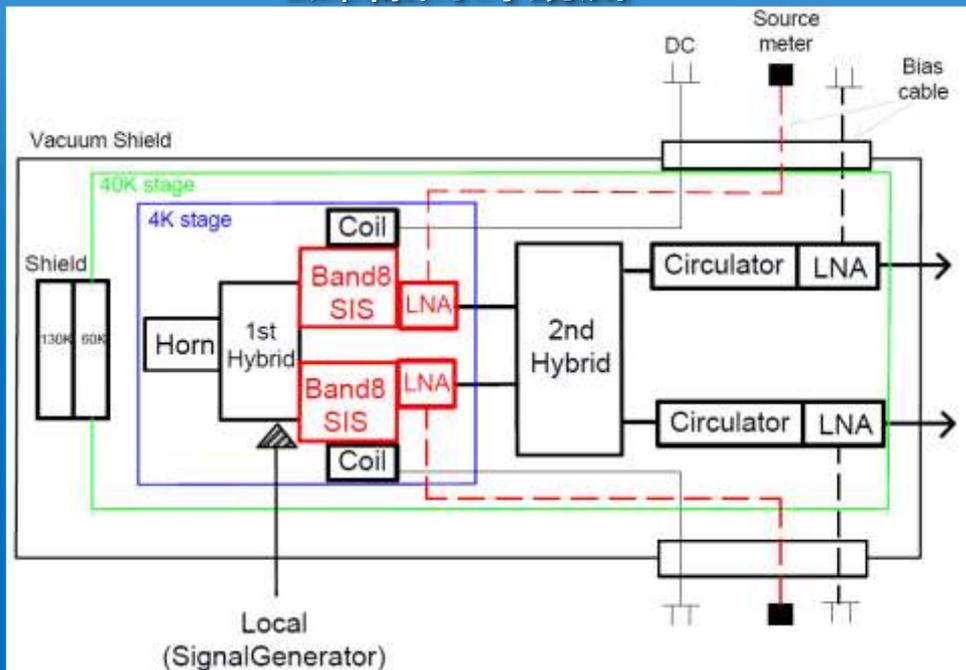
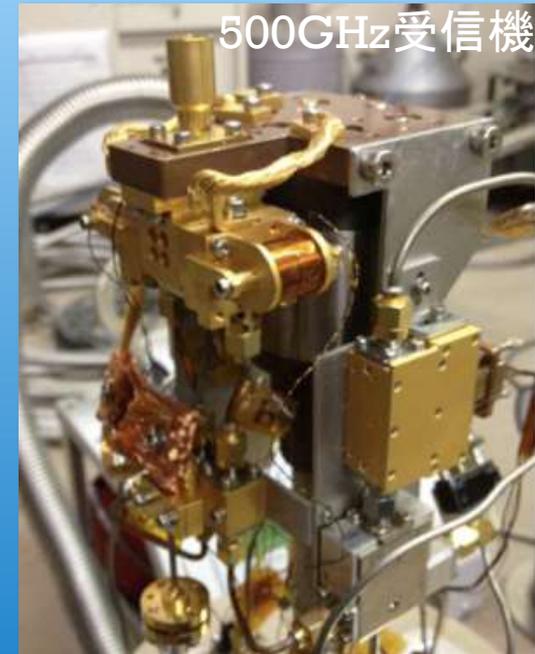
30cm望遠鏡アップデート(1)

2SB受信機の広帯域・低雑音化

- 国立天文台共同開発研究

IF帯域: 4-8GHz \Rightarrow 8-18GHz

- [CI](${}^3P_1 - {}^3P_0$): 492 GHz
- CO($J=4-3$): 460 GHz
- 2輝線同時観測



30cm望遠鏡アップデート(2)

光学ポインティング装置

- ポインティングに使える電波源がほとんどない(500 GHz) ⇒ 光学ポインティング
- 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

- XFFTS (帯域幅 2.5 GHz、32768 ch)
- 2輝線同時観測 ⇒ 2チャンネル化

低温対策

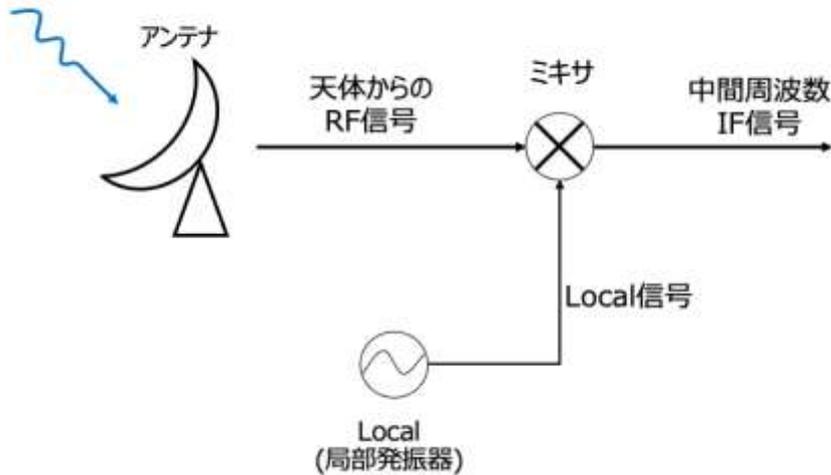
- 霜対策用ヒーター、断熱材

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
- 南極10mテラヘルツ望遠鏡へ



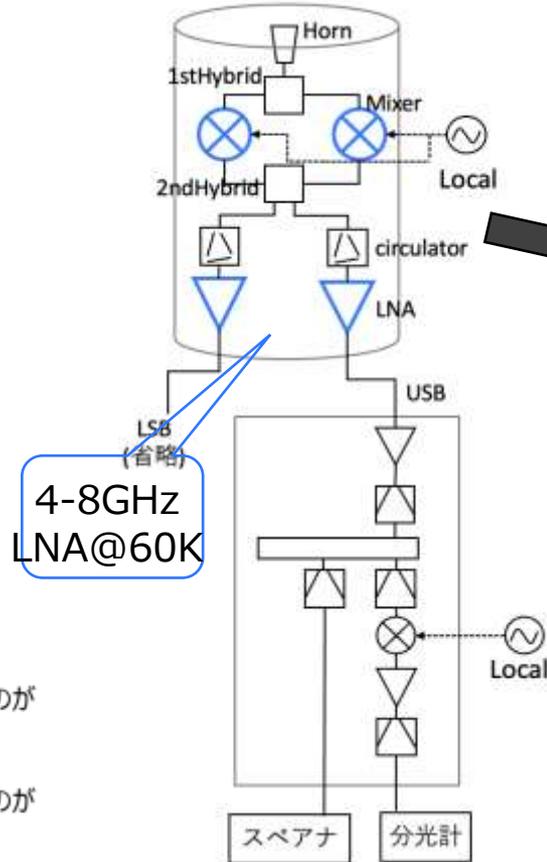
広帯域 2 SB受信機の開発



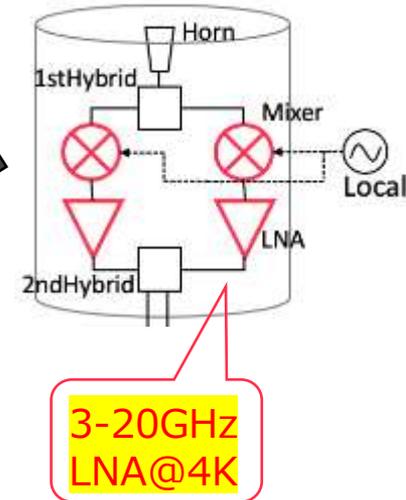
$$v_{RF} = v_{Lo} \pm v_{IF}$$

- $v_{Lo} + v_{IF}$ のサイドに感度を持つものがアッパーサイドバンド(USB)
- $v_{Lo} - v_{IF}$ のサイドに感度を持つものがローワースイドバンド(LSB)

受信機系ブロック図



国立天文台ATCの
広帯域SISミクサー

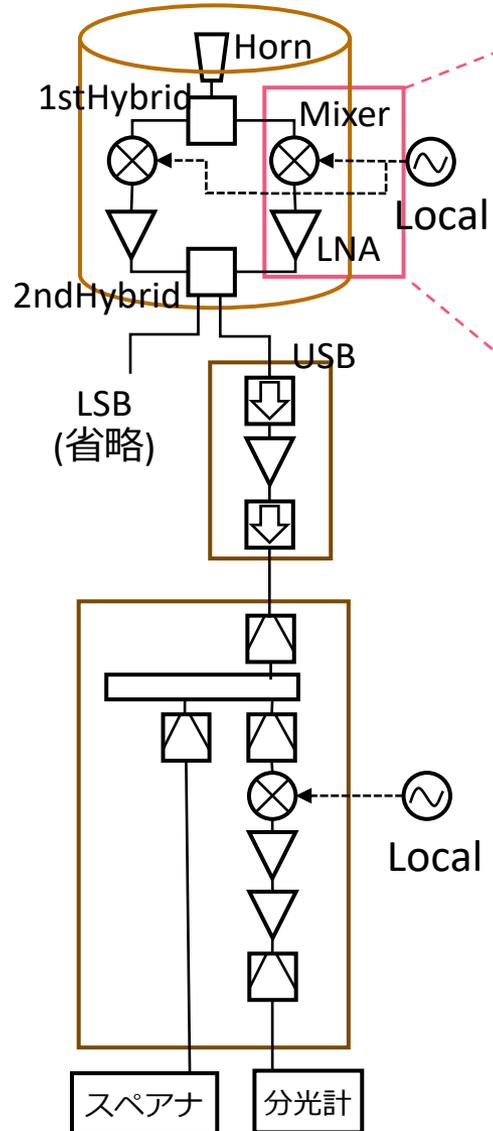


LNA : 低雑音増幅器

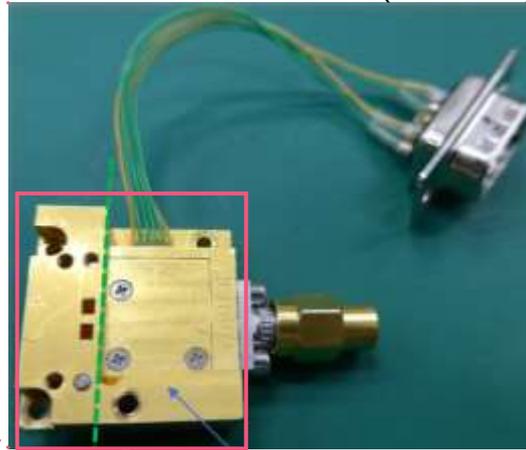
2 SB受信機

- 強度校正の精度向上
- 大気雑音の軽減
- イメージバンドの漏れ込みを防ぐ

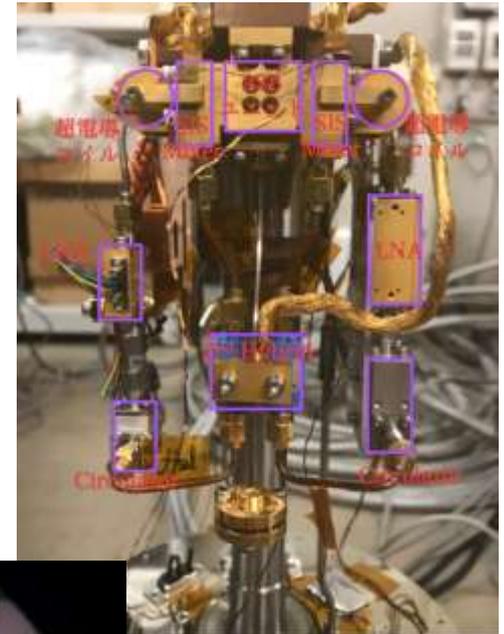
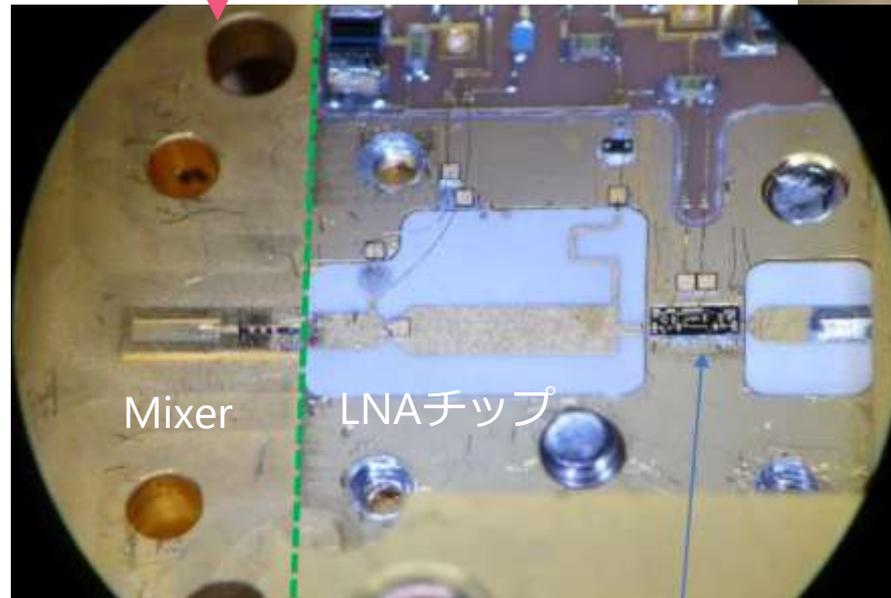
交換後の受信機系ブロック図



新しいミキサブロック(SIS+LNA)



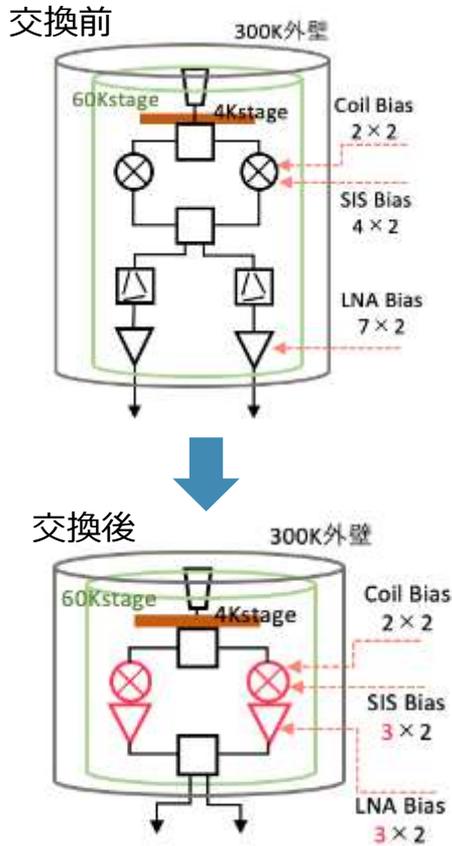
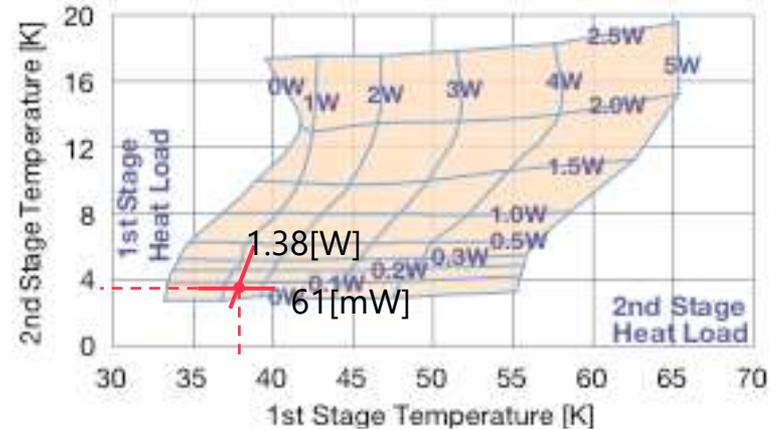
ミキサブロック内部



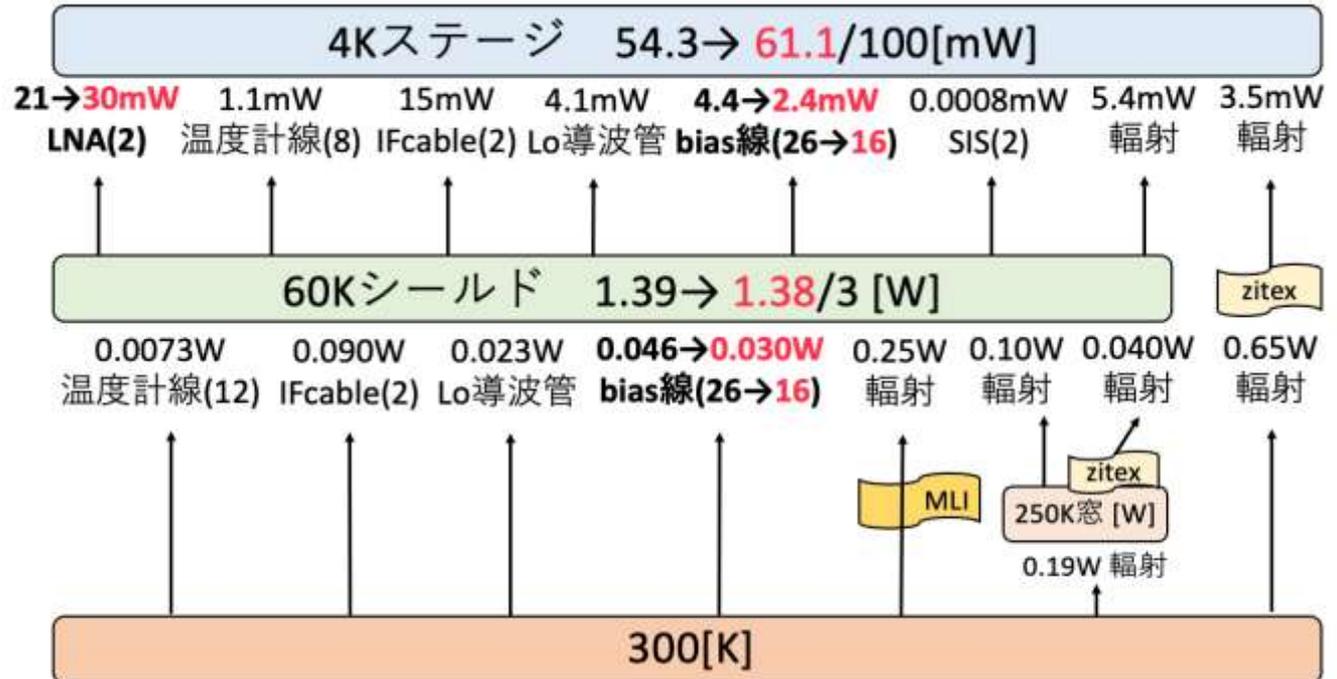
(瀧口さんの講演スライドより)

南極では使用電力に限りがあるため、1.2 ~ 1.3 kW程度の冷凍機で4Kまで冷却。
 冷凍機の許容熱量(4Kstage:100mW, 60Kstage:3W)を超えないよう設計。

冷凍機 許容熱量MAP



熱流入図



(瀧口さんの講演スライドより)

光学ポインティング装置

要求される性能

- 日中に3等星まで観測



星に対して空の輝度を抑える



1pixelの視野は狭く



- 望遠レンズ、エクステンダー
- pixelサイズが小さく、pixel数が多い

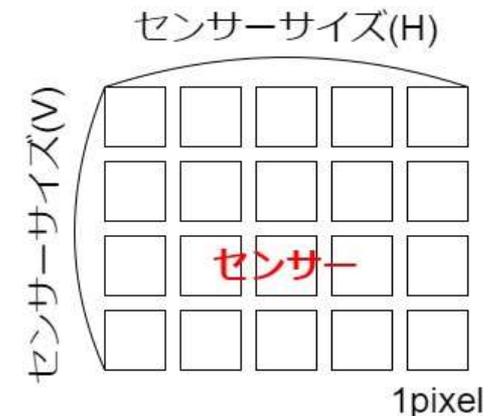
- 低温耐性
 - -40°Cまで
- カメラ本体が小さい
 - 45 x 50 x 45 mm以下

- 全体の視野 1°~2°



- センサーサイズが大きい

バランスが重要



(小山さん講演スライドより)

選定したカメラ

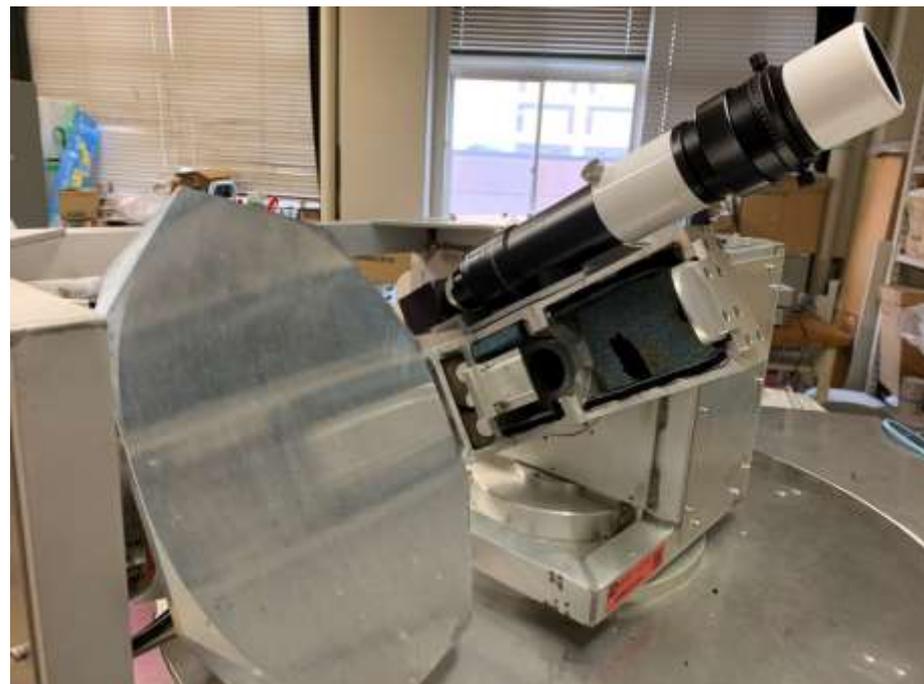


Baumer社製
VCXG-124M.I.XT

- Pixel数 4096 x 3000 pixel
- Pixelサイズ 3.45 x 3.45 μm
- センサーサイズ 1.1インチ モノク
ロ
- 低温耐性 -40°Cまで
- 本体の大きさ 40 x 50 x 40 mm

望遠レンズ(口径45 mm、焦点距離325 mm)
+エクステンダー(2倍)

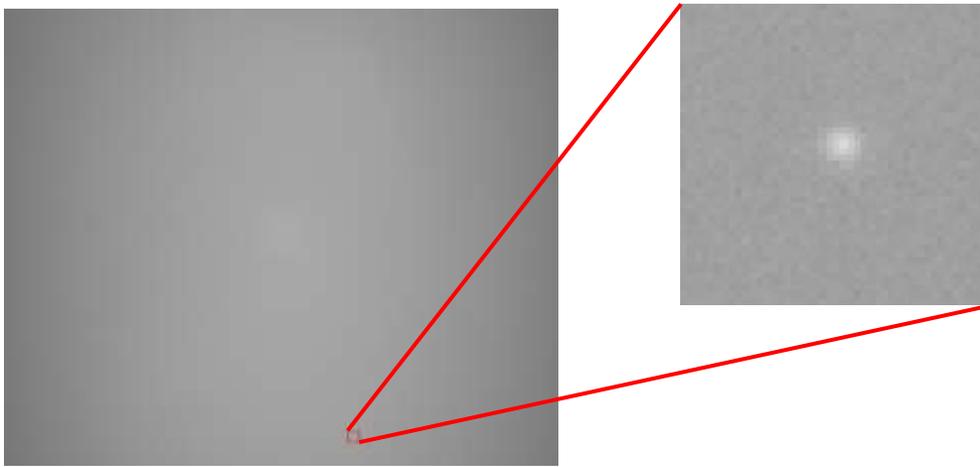
→ カメラ全体の視野: 1°06 × 0°78



(小山さん講演スライドより)

試験観測（北極星）

• 2020/10/29 14:30頃 21.9°C



北極星のカウント(星 + 空)		3500
星の半値全幅(pixel)		4.25
$\frac{\text{中心の 1 pixel に入射する星のエネルギー}}{\text{カメラに入射する星のエネルギー}}$	R_{psf}	0.0442
空のカウント	C_{sky}	2564
空の標準偏差(pixel)	σ	35.48
空のエネルギー($\text{W m}^{-2} \text{m}^{-1}$)	I_{sky}	8.66×10^{-11}

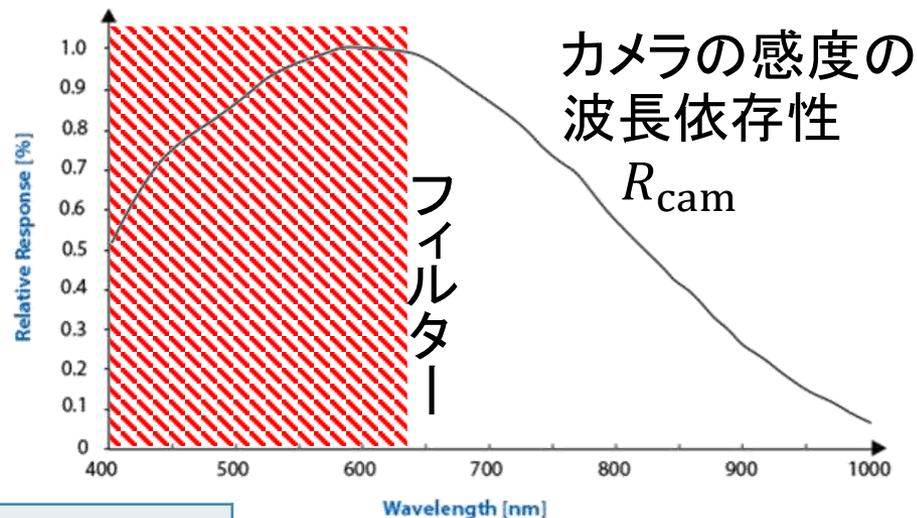


(小山さん講演スライドより)

何等級まで観測できるか

$$m_{\min}(T) = 2.5 \log_{10} \left(\frac{\int_{640}^{1000} I_{\text{star}}(\lambda, T) \times R_{\text{cam}} \times R_{\text{psf}} d\lambda}{\frac{5\sigma}{C_{\text{sky}}} \times I_{\text{sky}}} \times \frac{I_{\text{Vega}}(550\text{nm})}{I_{\text{star}}(550\text{nm}, T)} \right)$$

- 等級の基準は0等星ベガの波長が550nmのときのエネルギー量



スペクトルタイプ	表面温度(K)	観測可能最低等級
B	29000	2.96
A	9600	3.32
F	7200	3.53
G	6000	3.71
K	5300	3.86
M	3900	4.35
南極で観測できる星の数		約120個

(小山さん講演スライドより)

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
- 極地研一般研究観測@新ドームふじ
 - 採択されれば2022年から開始
- 30cm望遠鏡アップデート
 - 500GHz受信機の広帯域・低雑音化
 - 日中測定可能な光学ポインティングシステム
 - 分光計の2チャンネル化、OTF対応、Python化