大規模マルチビームヘテロダイン受信機 実現に向けた検討と45m鏡への試験機搭載計画

国公立大学で最も標高が高い（＝宇宙に一番近い）大学

中島 拓

公立諏訪東京理科大学
工学部 機械電気工学科

1. マルチビーム受信機の科学的必要性

対象天体のマッピング（イメージング）観測

→ 近傍分子雲、銀中/銀河面、近傍銀河、高赤方偏移天体/宇宙論的観測、太陽系天体 …etc で必須の観測手法
（分子ガスの分布や運動の解明、環境効果(UV, CR, X-ray, metallicity)、統計観測(多様性の理解)）

大口径単一鏡
(NRO45m, IRAM30m, LMT50m)

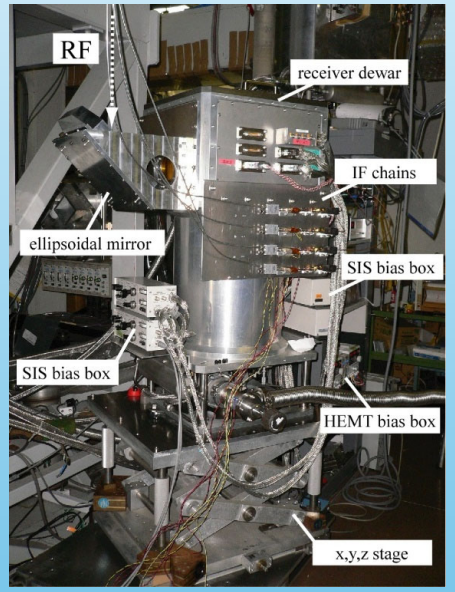
中規模干渉計
(NMA, NOEMA, VLA)

大規模干渉計
(ALMA)

「大口径単一鏡大規模サーベイ＋大規模干渉計高分解能観測」という戦略
ALMA2～の時代にさらに重要性を増す

2. マルチビーム受信機開発の現状

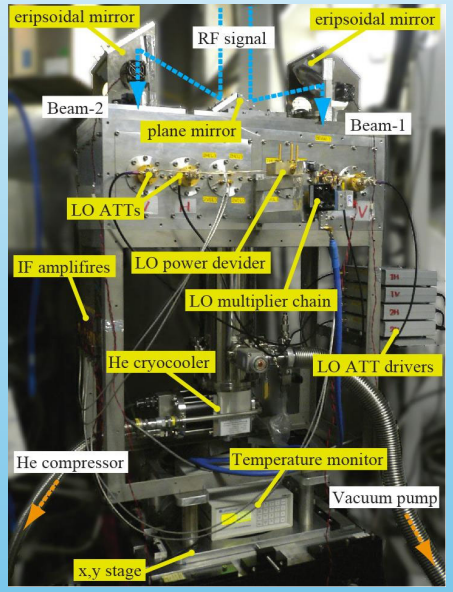
T100 (1-beam)



1 pixel
Sideband-separating
Dual polarization

Nakajima et al. (2008)

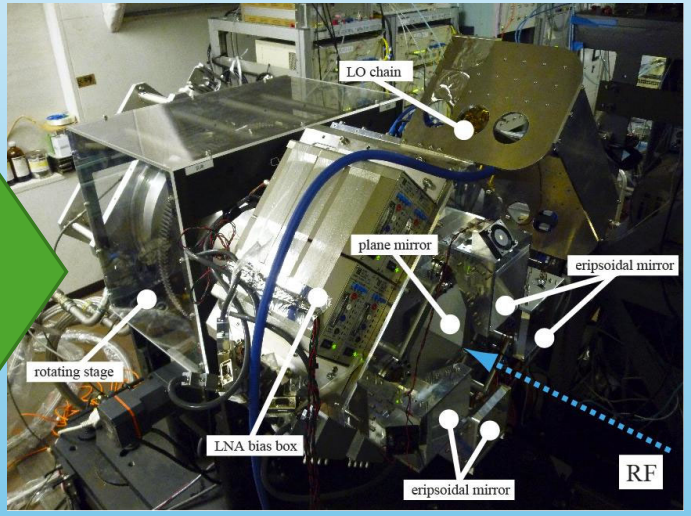
TZ (2-beam)



2 pixel
Sideband-separating
Dual polarization

Nakajima et al. (2013)

FOREST (4-beam)



4 pixel (2x2)
Sideband-separating
Dual polarization

Nakajima et al. (2012) & Minamidani et al. (2016)

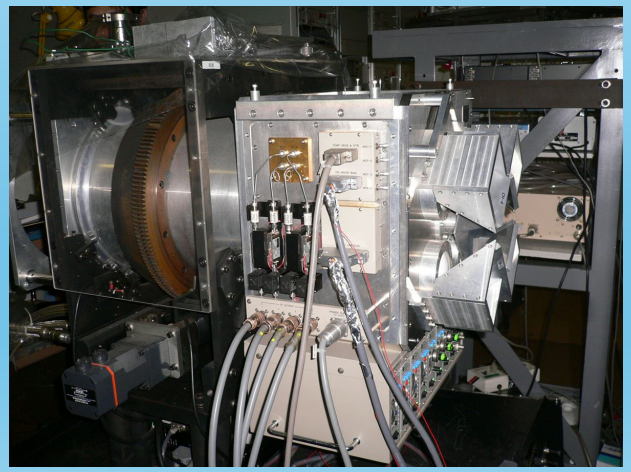
2. マルチビーム受信機開発の現状

野辺山45m鏡搭載マルチビーム受信機

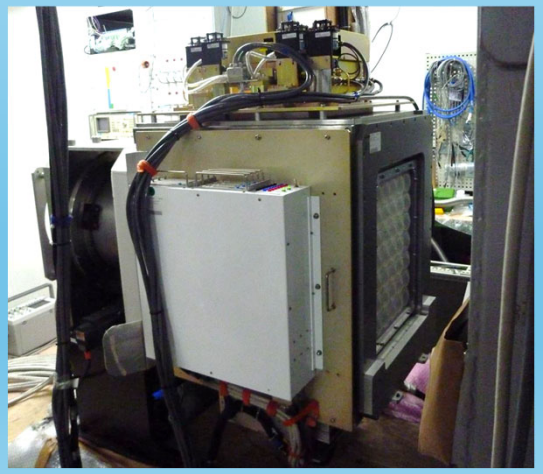
- 広帯域化、低雑音化、SSB化、両偏波化が進められてきた

  → しかし、ヘテロダイン受信機のマルチビームは数10ビームが限界
  （世界最大のSuperCAMでも64ビーム）

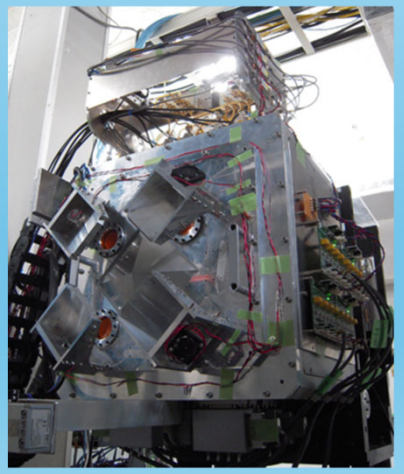
S115Q (Sunada et al. 1995)
- 2x2 (4 ビーム) SIS受信機
- 105-116 GHz, 1-pol. SSB



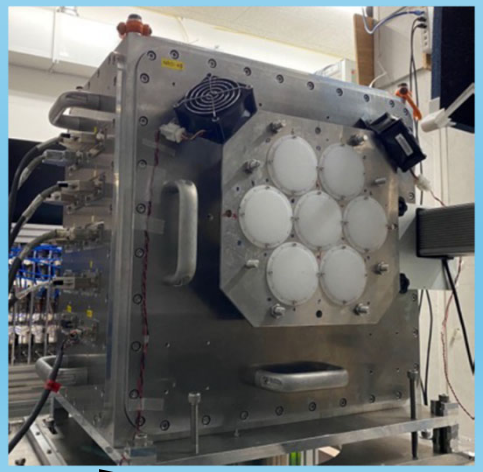
BEARS (Sunada et al. 2000)
- 5x5 (25 ビーム) SIS受信機
- 82-116 GHz, 1-pol. DSB



FOREST (Minamidani et al. 2016)
- 2x2 (4 ビーム) SIS受信機
- 80-116 GHz, 2-pol. 2SB



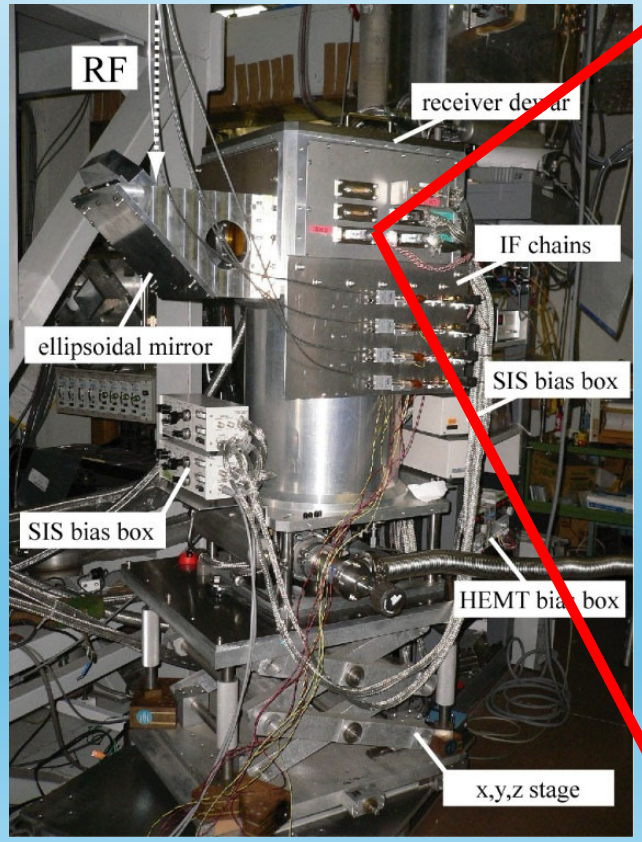
7BEE (Yamasaki et al. 2023)
- 7 ビーム HEMT受信機
- 72-116 GHz, 2-pol. SSB

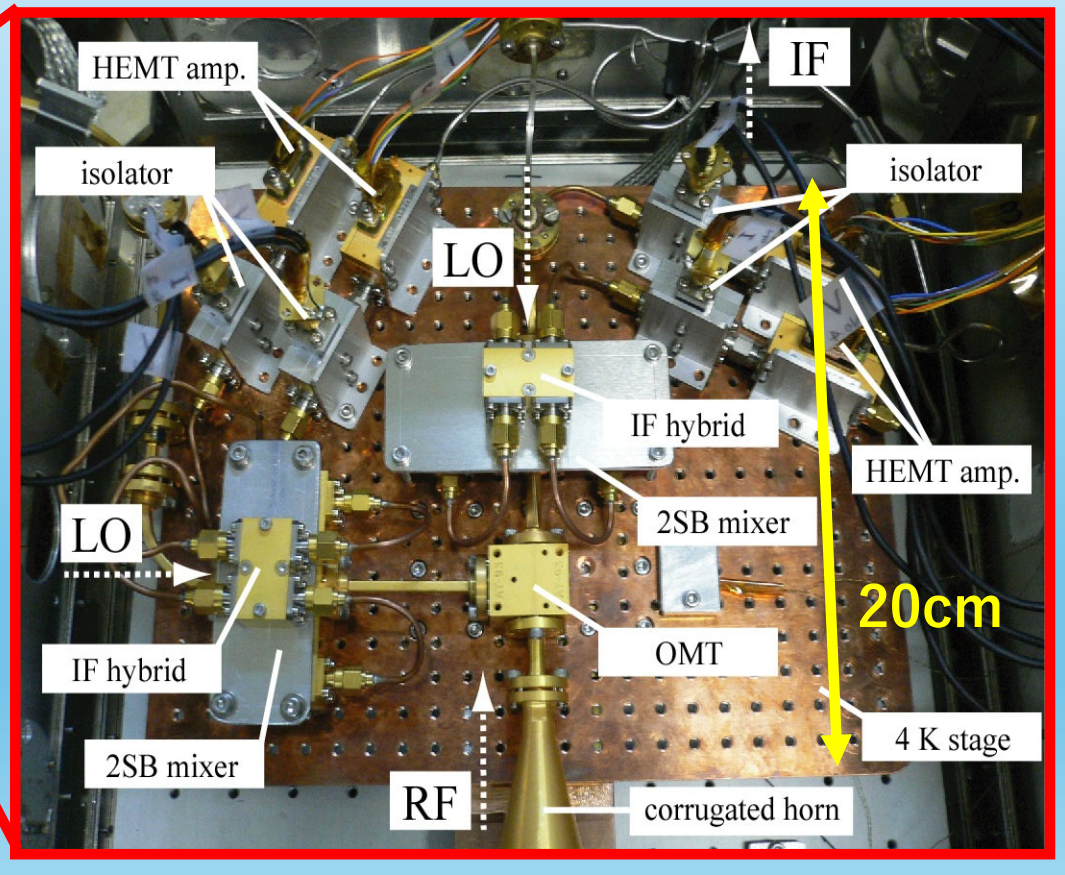


2. マルチビーム受信機開発の現状

マルチビーム受信機の課題

- 100 GHz帯シングルビーム受信機(T100)の4Kデュワー内部の様子





- コルゲートホーン x1
- 偏波分離器(OMT) x1
- 超伝導SISミクサ　x2
- 冷却アイソレータ x4
- 冷却低雑音増幅器 x4

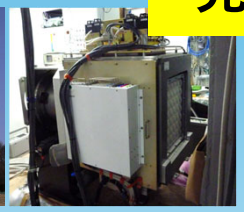
Nakajima et al. (2008)

2. マルチビーム受信機開発の現状

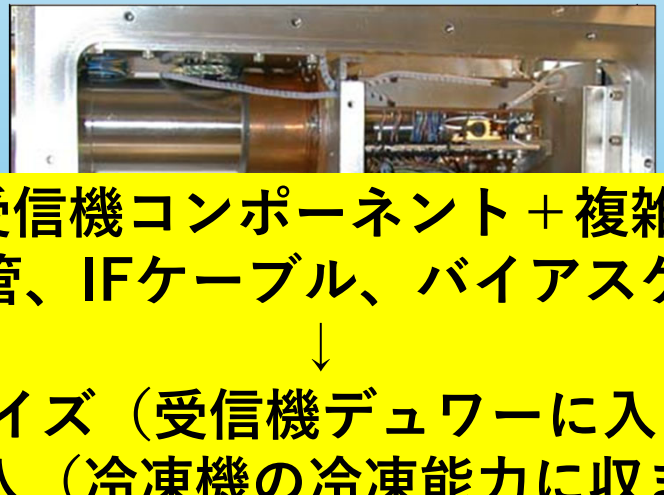
マルチビーム受信機の課題

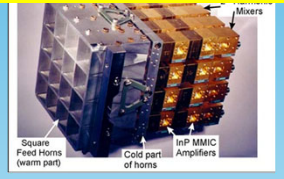
- 様々なマルチビーム受信機の内部の様子

NRO 45m
- BEARS (25 pix @100 GHz)



LMT 50m
- SEQUOIA (16 pix) @100 GHz



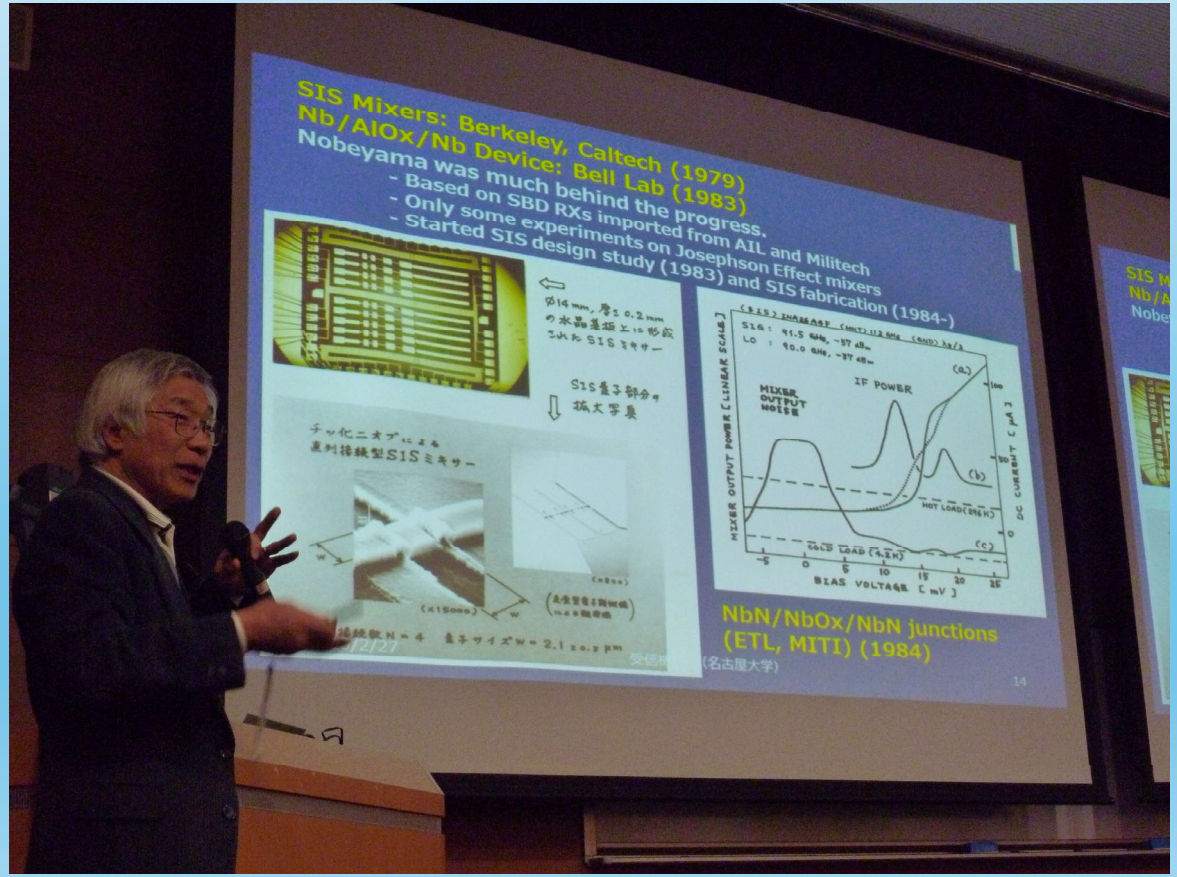


APEX 12m
- LAsMA (7 pix @345 GHz)

多数の受信機コンポーネント＋複雑な配線
（LO導波管、IFケーブル、バイアスケーブル）
↓
物理的サイズ（受信機デュワーに入るか？）
発熱/熱流入（冷凍機の冷凍能力に収まるか？）

2. マルチビーム受信機開発の現状

第13回 ミリ波・サブミリ波受信機ワークショップ（2013.02.27-28）@名古屋大学
稲谷 順司さん「**電波観測装置：果たせた夢、果たせなかった夢**」



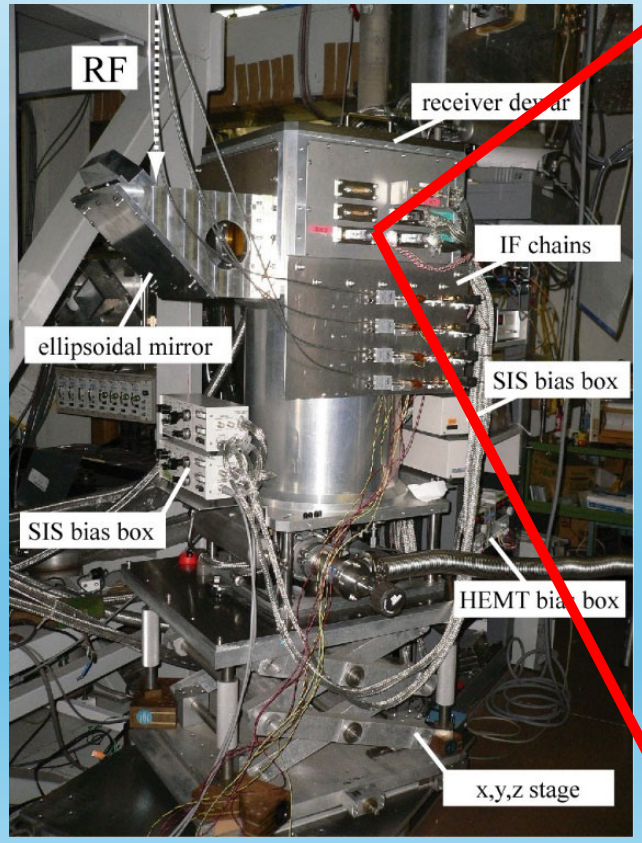
“広視野のヘテロダイン受信機を本気で考える時期に来た”

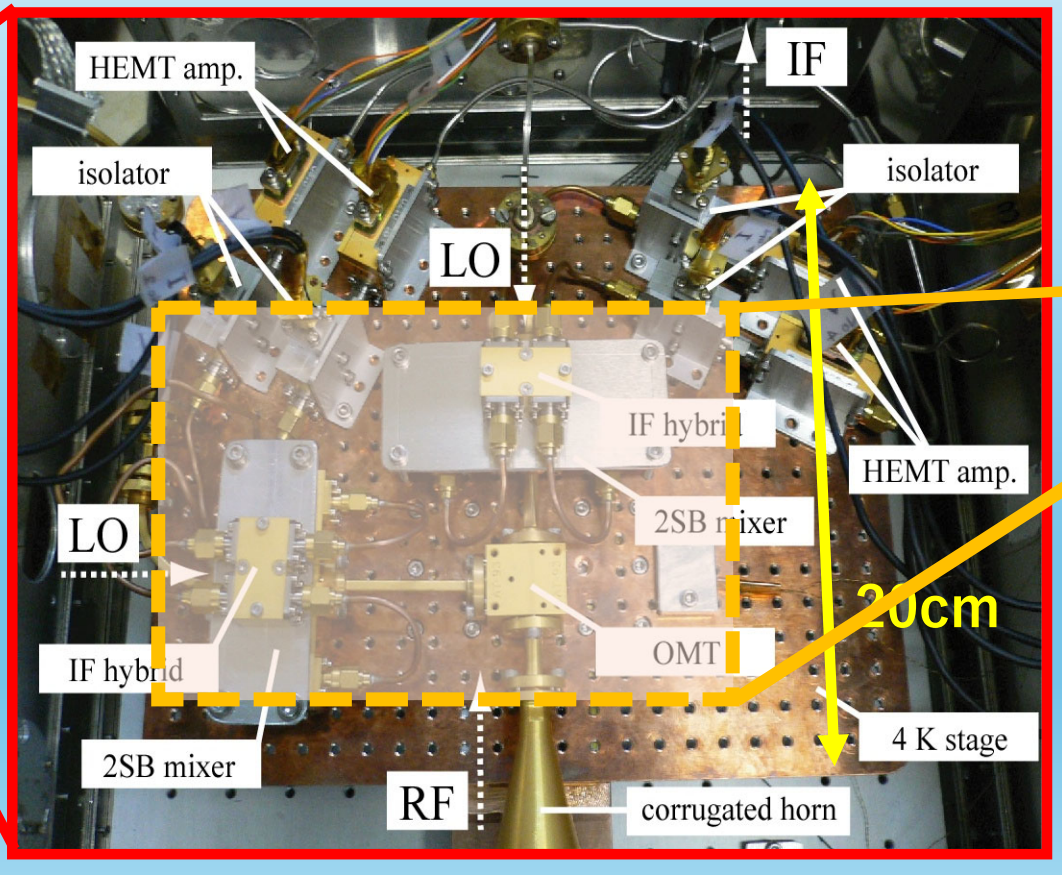
**“NRO 45m 鏡に
1 万画素（100x100）の
ヘテロダインカメラを！“**

2. マルチビーム受信機開発の現状

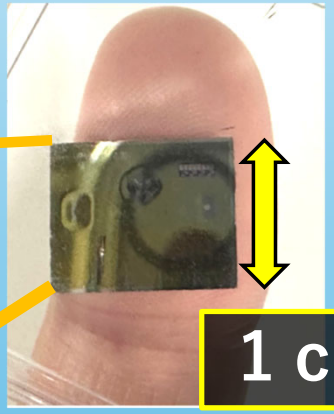
Silicon-based superconducting (Niobium) MMIC　(Shan et al. 2019; 2020)

- 100 GHz帯シングルビーム受信機(T100)の4Kデュワー内部の様子





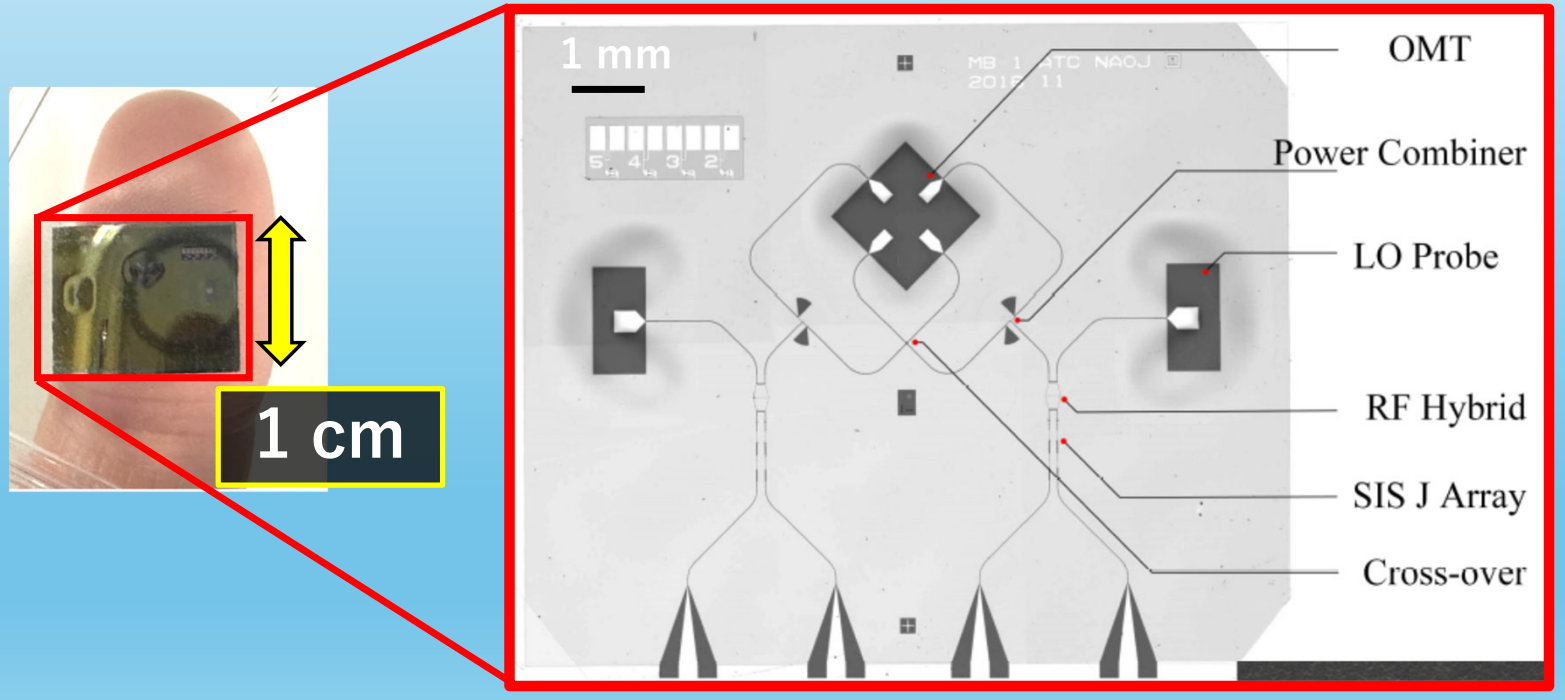
MMIC-SIS chip



Nakajima et al. (2008)

3. Key technology

Silicon-based superconducting (Niobium) MMIC

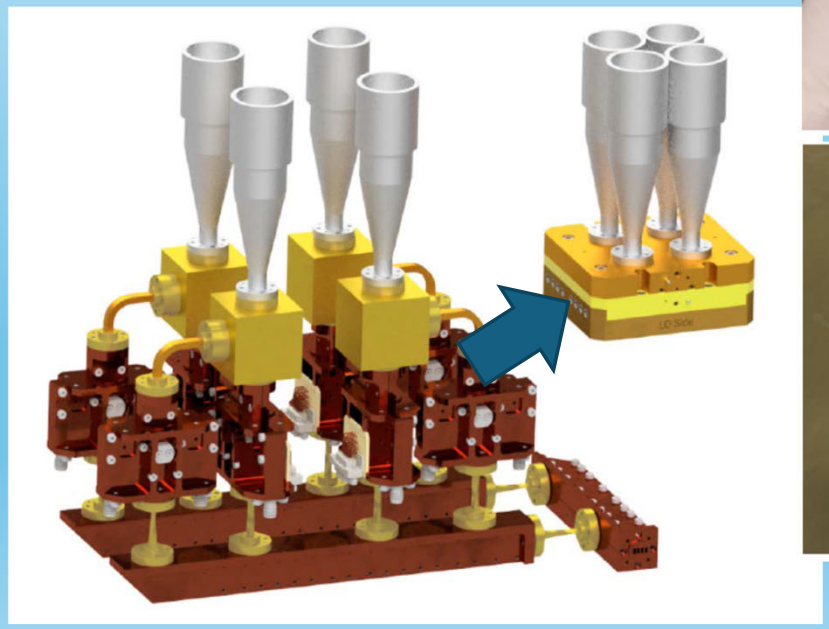


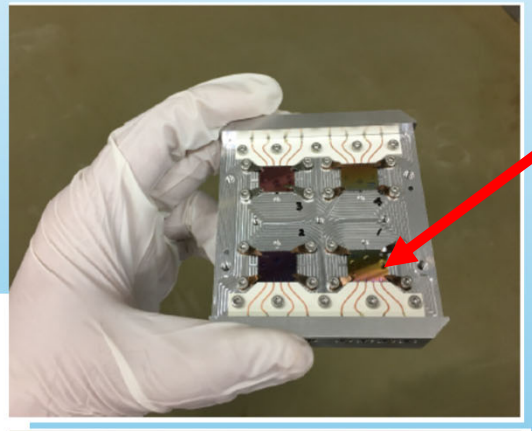
1. Separation of linear polarizations; Ortho-mode transducer (OMT)
2. Injection of LO signal to planar circuit; LO Probe
3. LO and RF signals coupling; RF Hybrid
4. Heterodyne mixing (frequency down conversion; SIS J Array

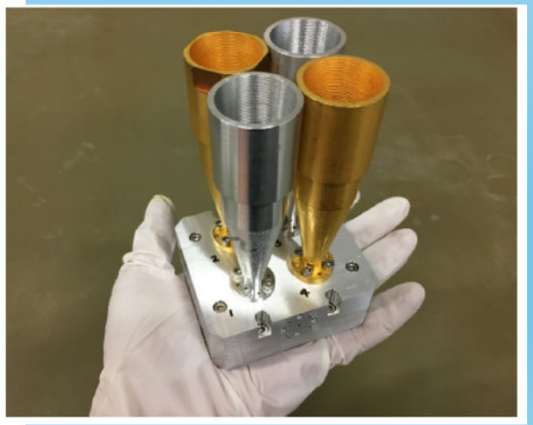
Shan et al. (2019; 2020)

3. Key technology

Silicon-based superconducting (Niobium) MMIC



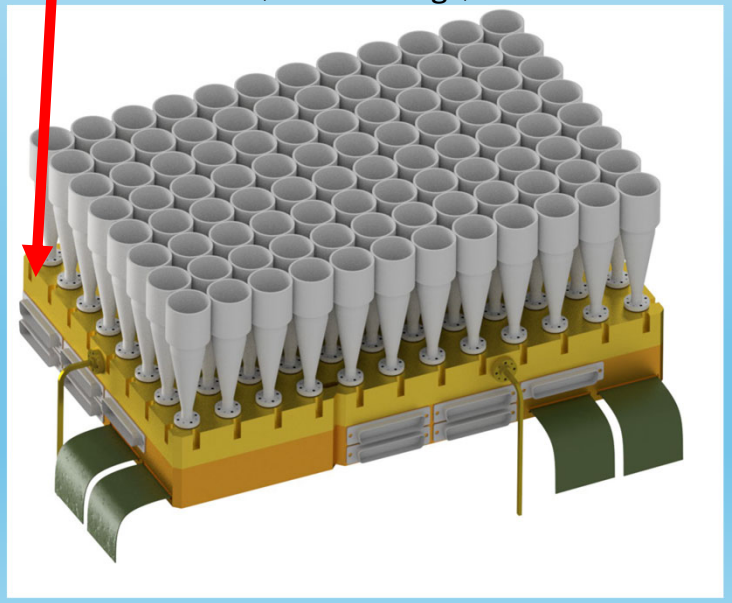




Shan et al. (2019; 2020)

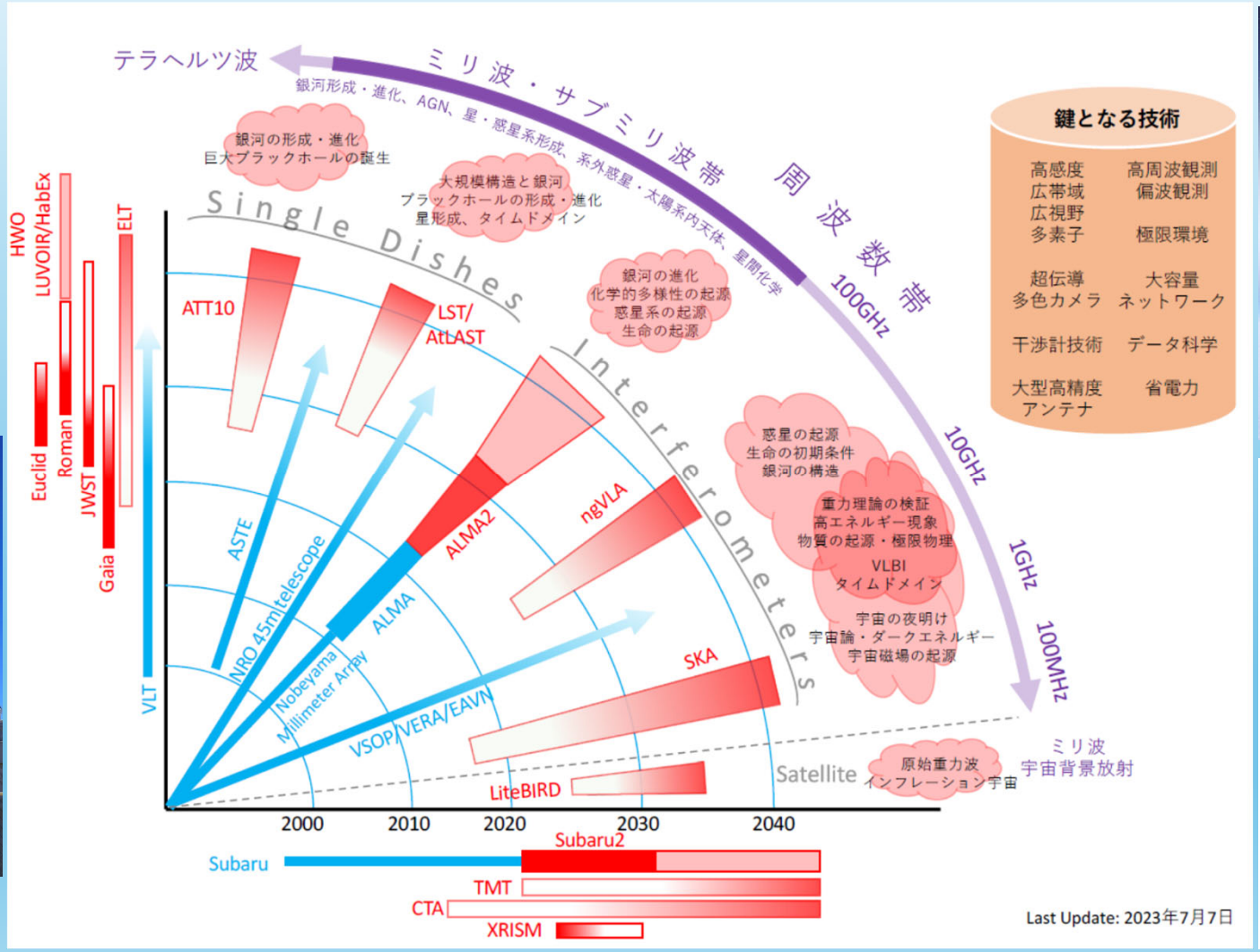
MMIC-SIS chip

96-pixel array receiver
(3D CAD image)



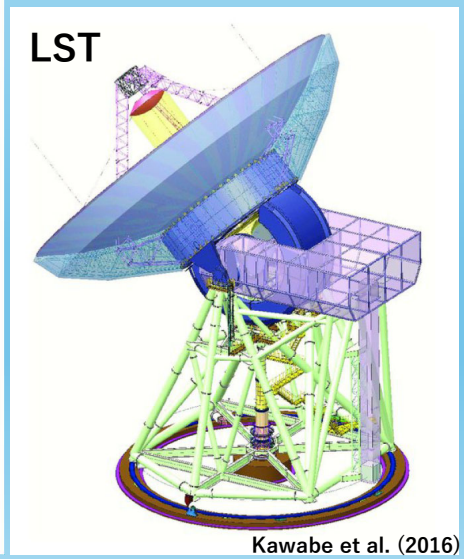
Shan, TN et al. (2023)

4. 今後の見通し



鍵となる技術

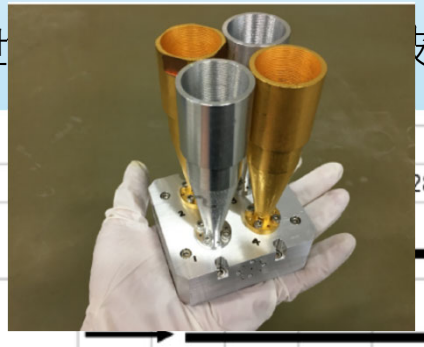
高感度 広帯域 広視野 多素子	高周波観測 偏波観測 極限環境
超伝導 多色カメラ	大容量 ネットワーク
干渉計技術	データ科学
大型高精度 アンテナ	省電力



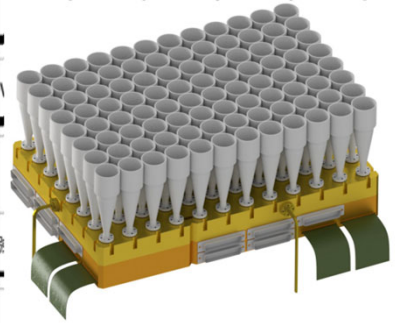
4. 今後の見通し

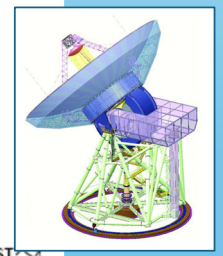
国立天文台 2024年度LoI

- 野辺山45m鏡を用いた次世 波大口径アンテナによる天文学（西村）



年次計画	第5期中期計画						第6期中期計画						
	28	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
有料望遠鏡時間による運用				老朽化対策を随時実施									存廃を検討
7BEE 受信機 (7画素) [3mm]						廃止							
ミリ波分光カメラ試作機 (20画素) [3mm]		要素技術開発		具体的な設計・開発		ユーザー科学利用						廃止	
ミリ波分光カメラ (100画素) [3mm]					要素技術開発		具体的な設計・開発			ユーザー科学利用			LST/AtLASTへ移
新分光計システム		開発		ユーザー科学利用									
超広帯域受信機 (20-150 GHz; 2mm)		開発		ユーザー科学利用・									
超広帯域受信機 (20-230 GHz; 1mm)										用・VLBI利用			
主鏡面の動的制御による鏡面精度向上		開発		部分実装	機能					用			LST/AtLASTへ移
LST/AtLAST (参考)													運用開始？
南極30mテラヘルツ望遠鏡 (参考)		45m鏡を利用したミリ波連続波カメラの開発と観測 (南極30m完成後に移設)						建設					運用開始？





5. まとめ

- **大規模ヘテロダインマルチビーム受信機（＋大口径単一鏡）が求められている**

- **100ビームを超える受信機は、既存技術の延長では実現しない**
  - 受信機系：回路の集積化技術＋超伝導検出器/超伝導伝送路技術の融合、初段アンプ・IF多重化が課題
  - 光学系：小型平面アンテナ＋レンズ？（フェーズドアレイ(PAF)・ビームフォーミング？）
  - 分光計：100-1000ビーム（x 2pol. x 2SB）のIF信号の高分散分光処理の実現

- **天文台ATC以外でどこがやる？誰がやる？（どこが出来る？誰が出来る？）**
  - 2030年代の実現に向けて、早急に必要な技術開発に “今” 取り組むべき
  - 工学の専門家や若手/学生に天文装置に興味を持ってもらうことが大事（企業は難しい？）
  - 日本（＆世界も）の技術を結集すべき大きなプロジェクトになるだろう
  - 日本の強み：NRO45m/ASTEで小規模アレイ試験 → LST, ALMA3(?) へと繋げていく

- **「大規模マルチビーム受信機開発検討会」**
  - 5/13-14, 7/9-10 に野辺山を現地会場に実施
  - 40名の方が参加し、将来欲しい夢の観測装置について議論