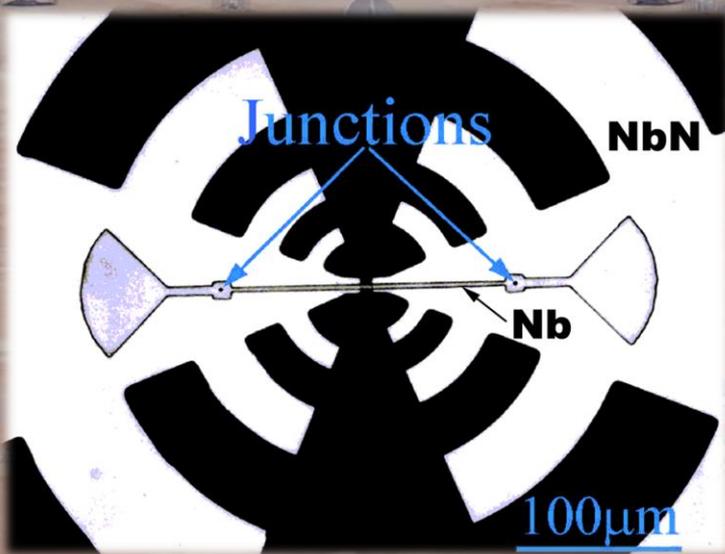


巨大電波望遠鏡「ALMA」における 超伝導技術



国立天文台 先端技術センター
鵜澤佳徳

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

自己紹介

- 専門: 超伝導エレクトロニクス
- 1991 大学院修士課程修了後、郵政省通信総合研究所入所
 - サブミリ波帯窒化ニオブSISミキサの研究開発
- 2000 博士(工学)取得
- 2005 国立天文台准教授
 - ALMA電波望遠鏡用SIS受信機の研究開発
- 2014 情報通信研究機構テラヘルツ連携研究室室長
 - テラヘルツ帯通信技術、計測技術の研究開発
- 2018 国立天文台教授
 - 次世代受信機技術の研究開発
 - 先端技術センター長(2018年11月～2022年3月)
 - 技術主幹(2022年4月～)

内容

- 国立天文台について
- ALMA最高周波数帯受信機の開発
 - ALMA望遠鏡概要
 - バンド10受信機開発
- 将来技術の開発
 - 超伝導増幅器、超伝導非相反回路の紹介



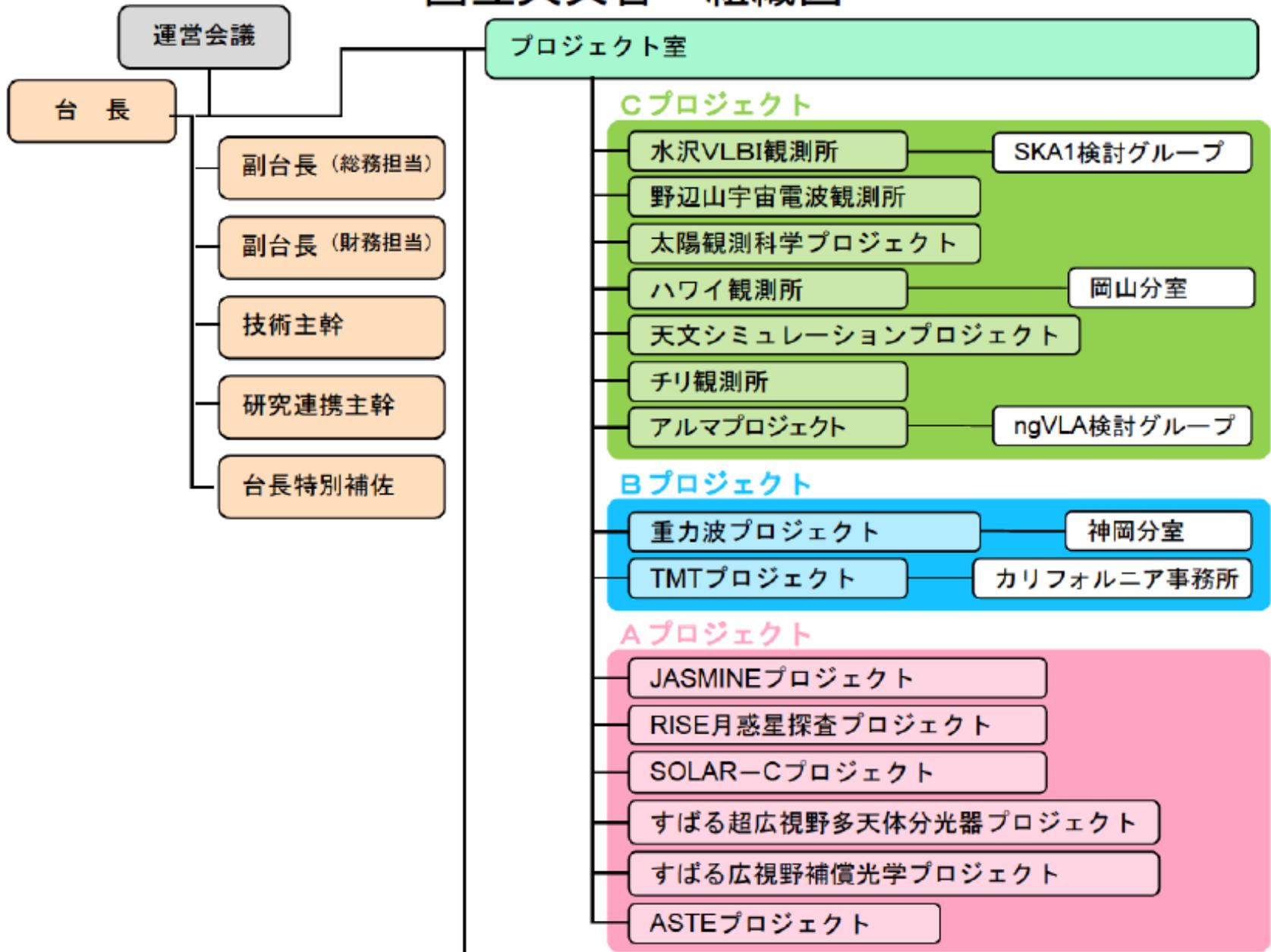
国立天文台について (Webより)

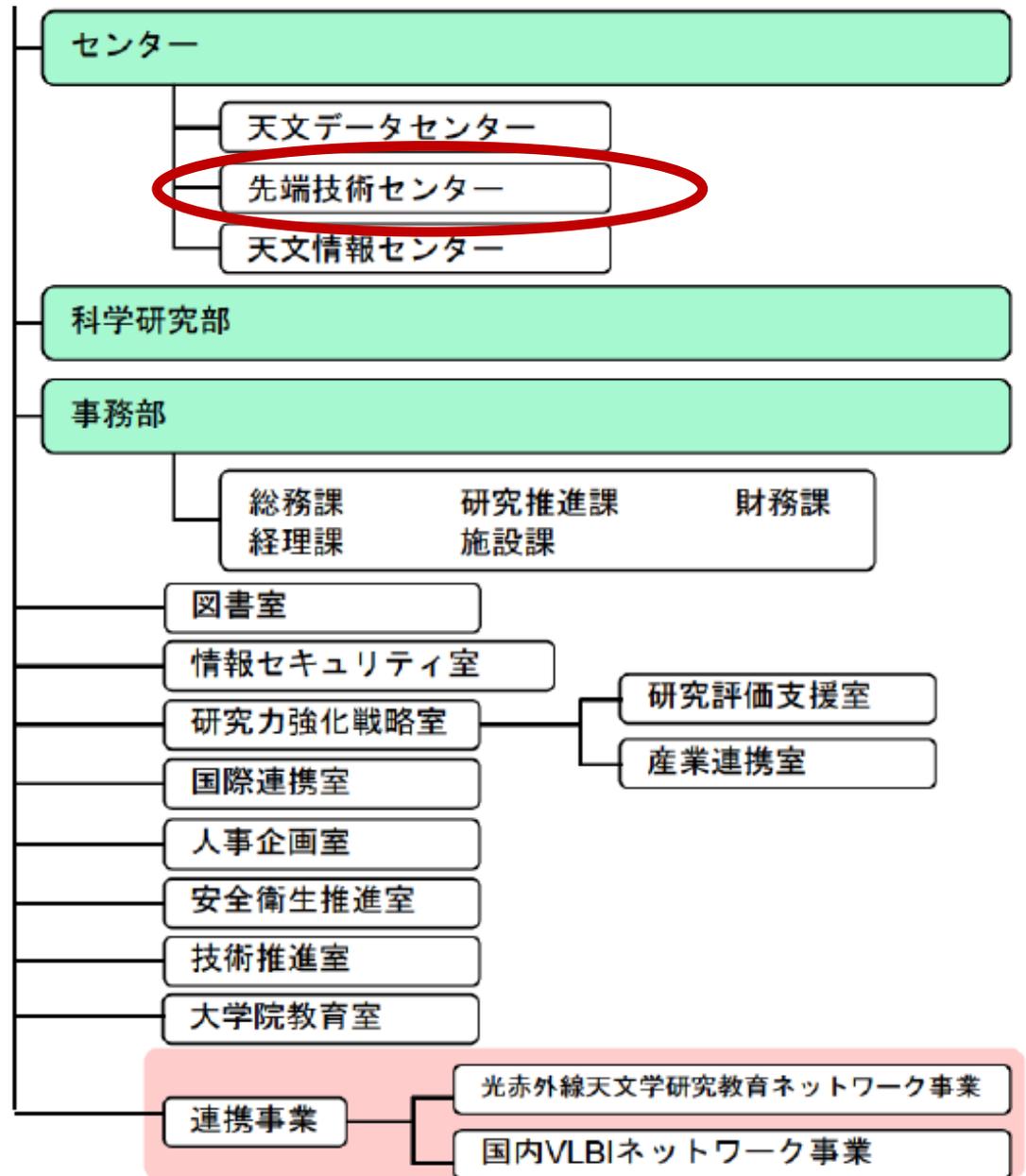
<https://www.nao.ac.jp/about-naoj/organization/info.html>

- 組織概要

- 名称: 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台
- 設立日: 1988年7月1日
- 本部所在地: 東京都三鷹市大沢2-21-1
- 代表: 常田佐久
- 予算: 12,127,876千円
- 職員数: 516名 (2022年4月1日現在)
- 組織図: 次ページ

国立天文台 組織図





2022年4月1日現在

先端技術センター(ATC)について

先端技術センター

自然科学研究機構 国立天文台



ADVANCED TECHNOLOGY CENTER

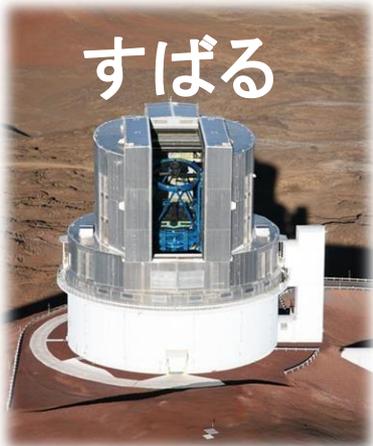
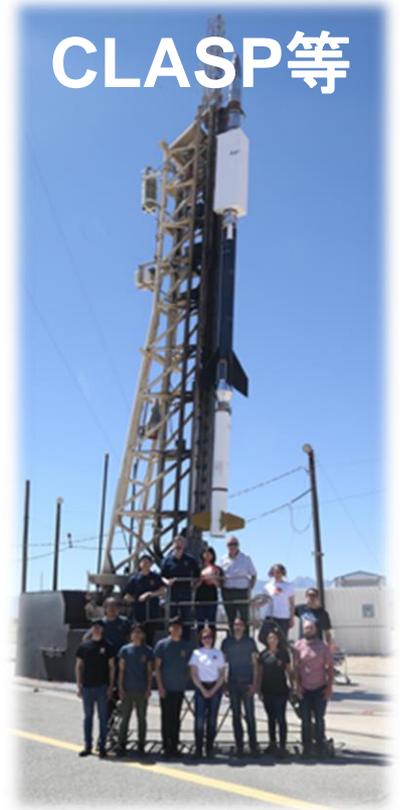
National Astronomical Observatory of Japan
National Institutes of Natural Sciences

先端技術センターは、国立天文台の天文学研究を、観測機器の研究・技術開発という面から支えています。国立天文台が運用している望遠鏡や観測機器だけでなく、将来の観測計画のための望遠鏡や観測機器の基礎技術、応用技術の開発研究を実施しています。また、天文研究のコミュニティーのために、共同開発研究を進めたり、観測機器開発を支援しています。

電波から可視光・紫外線
まで、地上・宇宙を問わず、
先端的な天文学の
観測装置の開発拠点

[http://atc.mtk.nao.ac.jp/
Brochure/2103J.](http://atc.mtk.nao.ac.jp/Brochure/2103J)

ATCが関わるプロジェクト



内容

- 国立天文台について
- ALMA最高周波数帯受信機の開発
 - ALMA望遠鏡概要
 - バンド10受信機開発
- 将来技術の開発
 - 超伝導増幅器、超伝導非相反回路の紹介

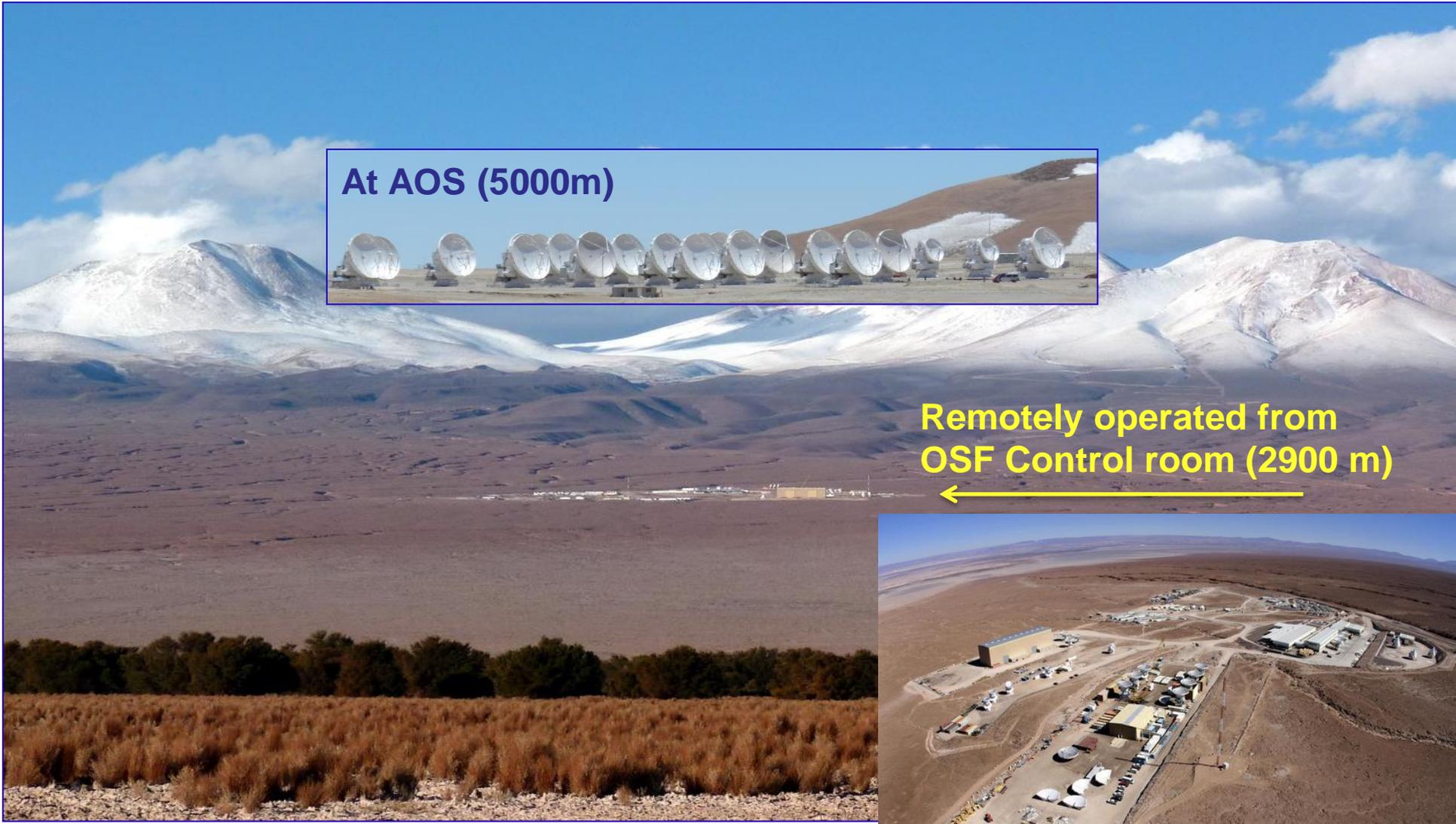


Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array

- International Project : EA, NA, EU (22 countries)
- The number of antennas : 66 (12 m x 54, 7 m x 12)
- Angular Resolution : 0.01 arcsec (10 times better than the Hubble Space Telescope)
- Sensitivity : About 30 to 100 times better than current radio telescopes.

Array Operation Site (in Northern Chile at 5000 m)

Operation Support Facility (OSF)

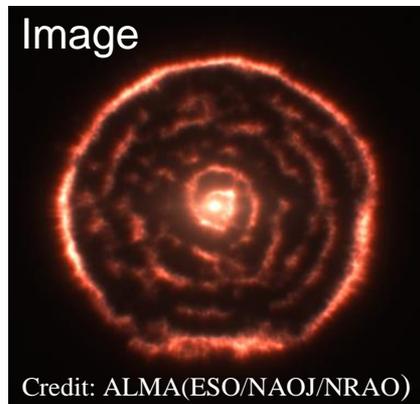
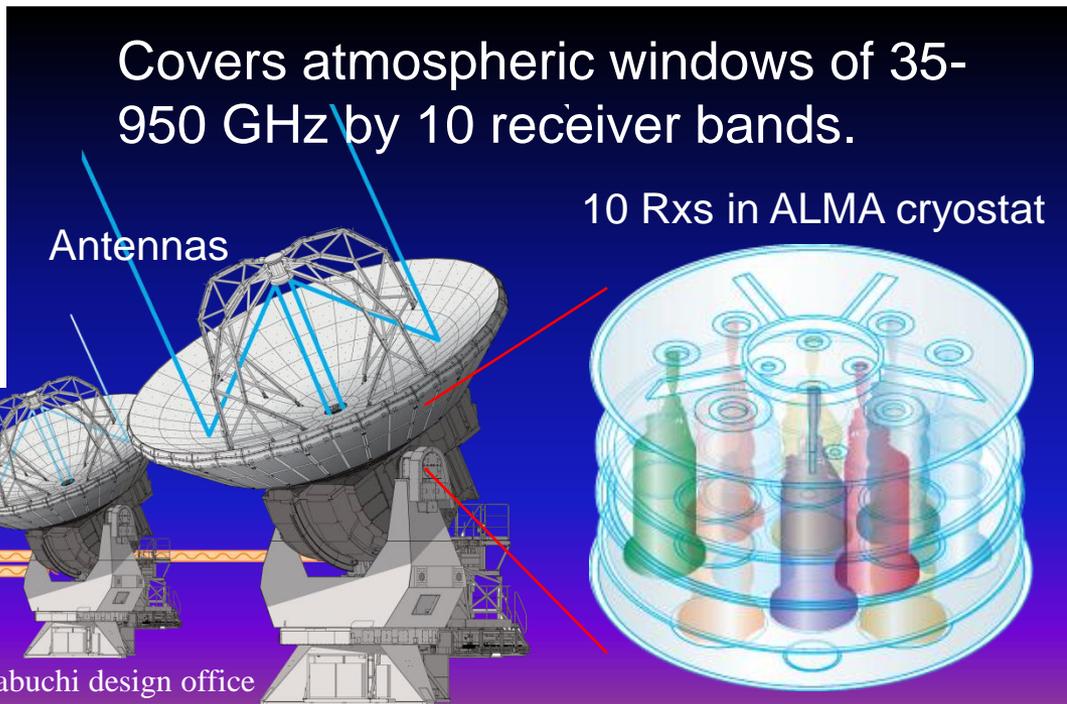
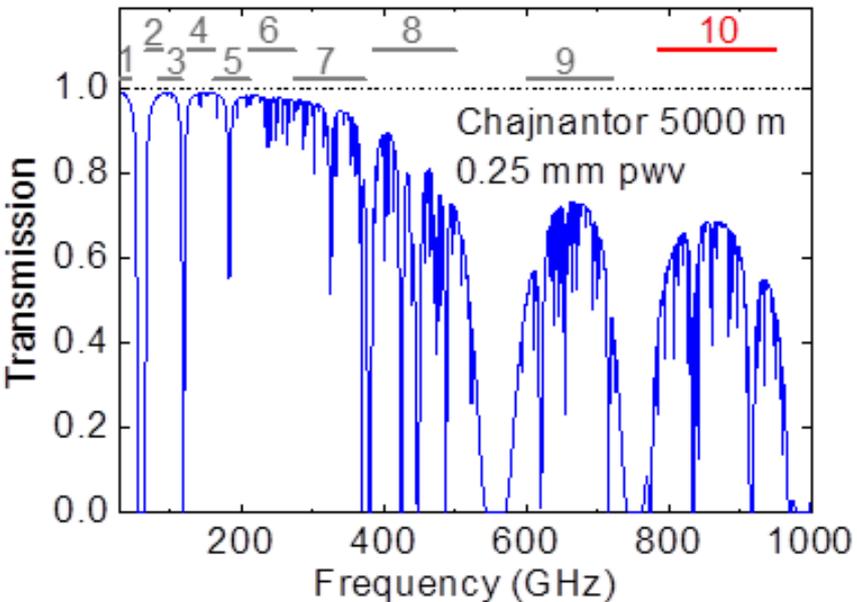


At AOS (5000m)

Remotely operated from
OSF Control room (2900 m)



観測のメカニズム



Band 1		Band 6	
Band 2		Band 7	
Band 3		Band 8	
Band 4		Band 9	
Band 5		Band 10	

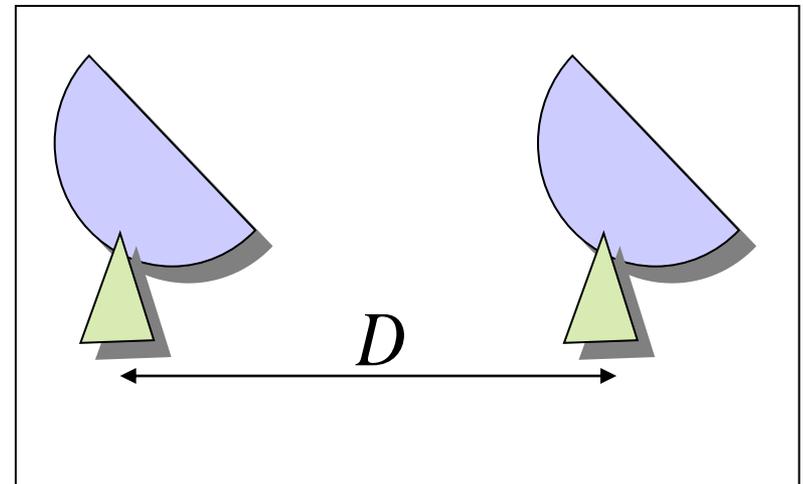
Band 2 is to be decided.

Highest resolution at Band 10

- Inversely proportional to diameter, D , of telescope
- ▣ For ALMA (interferometer), D : *Baselines*

$$\theta \propto \frac{\lambda}{D}$$

θ : Angular resolution
 λ : Wavelength
 D : Baselines or Dia.



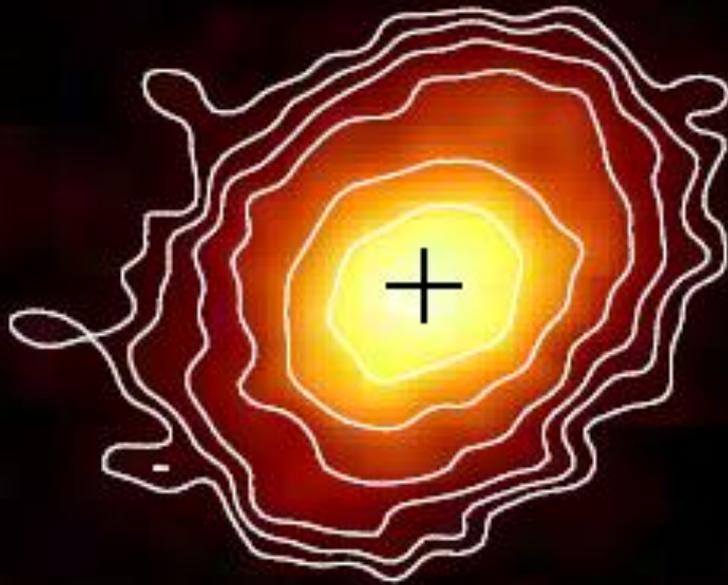
- ▣ For ALMA, D_{\max} : 18.5 km

Angular resolution (arcsec)	
ALMA	0.007 (@0.95 THz)
Subaru	0.1 (@IR)
Human	60

従来の望遠鏡とALMAの比較

HL Tau (おうし座HL星)

Resolution: 0.15 arcsecond (1.3 mm)



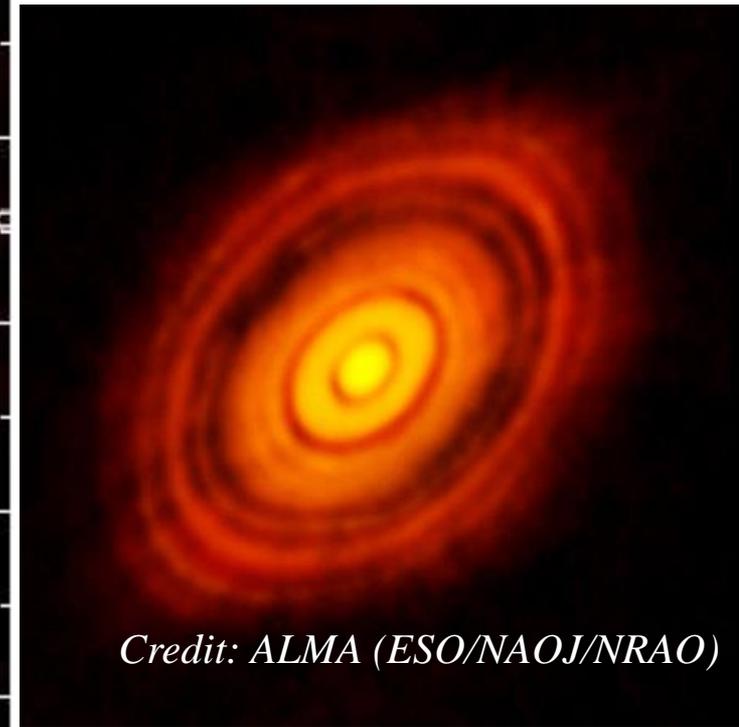
CARMA

W. Kwon et al. 2011

100 AU

第50回 RRL/CRL/NICT親ぼく会

Band 6 receivers
were used.

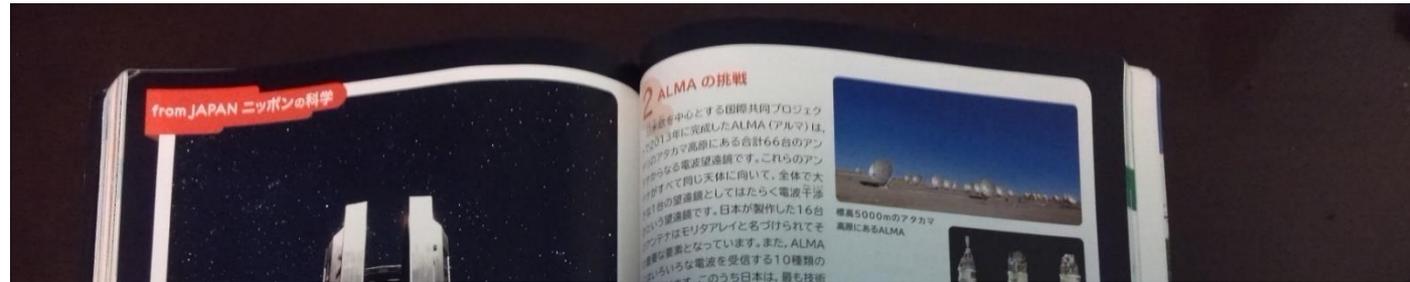


Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

視力2000

ALMA受信機開発

東京書籍
中学校理科教科書
「新編新しい科学3」



2 ALMAの挑戦

日米欧を中心とする国際共同プロジェクトで2013年に完成したALMA (アルマ) は、チリのアタカマ高原にある合計66台のアンテナからなる電波望遠鏡です。これらのアンテナがすべて同じ天体に向けて、全体で大きな1台の望遠鏡としてはたらく電波干渉計という望遠鏡です。日本が製作した16台のアンテナはモリタアレイと名づけられてその重要な要素となっています。また、ALMAにはいろいろな電波を受信する10種類の装置があります。このうち日本は、最も技術的に困難な電波を観測するバンド10ともう2台の受信装置の開発を担当しました。



標高5000mのアタカマ高原にあるALMA



日本が開発した受信装置
(いちばん右がバンド10)

内容

- 国立天文台について
- **ALMA最高周波数帯受信機の開発**
 - ALMA望遠鏡概要
 - **バンド10受信機開発**
- 将来技術の開発
 - 超伝導増幅器、超伝導非相反回路の紹介



ALMAバンド10受信機仕様

Item	Specification
1. Observation frequency	787-950 GHz (above the gap freq. of Nb!!)
2. Cartridge IF output	4-12 GHz for DSB
3. Receiver noise performance	< 230 K (5 hf/k _B) (over 80% of 787-905 GHz) < 344 K (full band)
4. IF ripple	< 4.0 dB/2 GHz, <6.0 dB/8 GHz
5. Gain compression	< 5% between 77 and 373 K
6. Amplitude stability	0.05 and 100 sec < 4.0 x 10 ⁻⁷ 300 sec < 3.0 x 10 ⁻⁶
7. Signal path stability	< 3 degree/5 minutes
8. RF aperture efficiency	> 80% at the subreflector
9. Beam squint separation	< 10% FPBW on the sky
10. Polarization efficiency	> 99.5% (23 dB)

CRL時代の研究が要求仕様を作ったのではないか？

1991年の CRL関西先端 研究センター



関西先端研究センター初仕事

- 1991年8月に小金井から関西へ移転
- 12月に自家配管工事完了

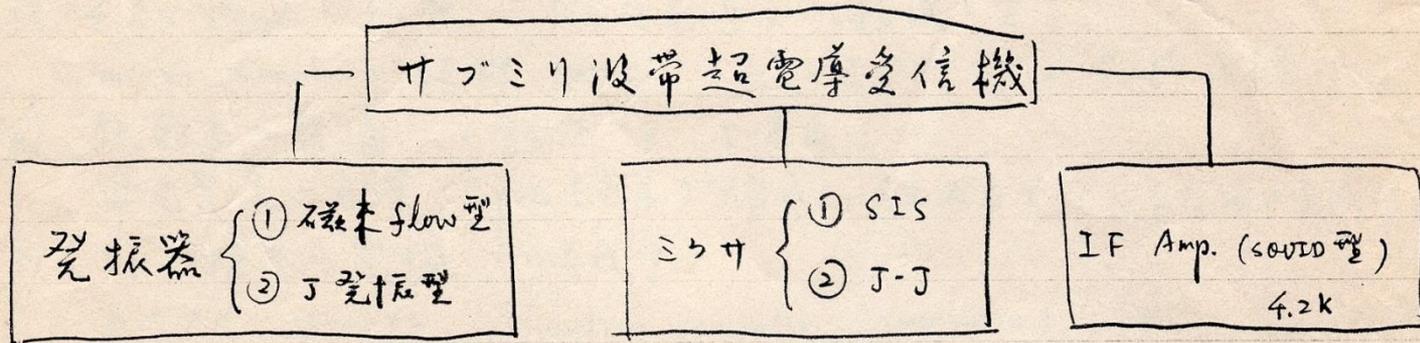


研究計画

研究目的

サブミリ波帯の超高感度、極低雑音超電導受信機（発振器、ミキサ、中間増幅器）の開発。

現状



- ① 出力インピーダンス小
外部ミキサとの整合難
(九大、野辺山)
- ② power小
直列アレーのコヒーレンス動作難
(川上)

- ① 雑音激増
(野辺山開発中)

- ② 素子作製技術未確立
点接触型X
トンネル型Δ
ブリッジ型○

未開発
(gain小)

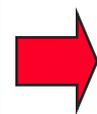
周波数の名称と利用状況

周波数								
300 kHz 3 MHz 30 MHz 300 MHz 3 GHz 30 GHz 300 GHz 3 THz →								
超長波 ～長波	中波	短波	超短波	極超短波	マイクロ波	ミリ波	サブミリ波	光波
航行用無線標識	中波放送 船舶通信	短波放送 船舶通信 航空無線	FM放送 TV放送 航空無線 ポケベル	TV放送 携帯電話 MCA	衛星通信 衛星放送 各種 レーダー	防災無線 簡易無線	未開拓電磁波	光通信
既に広く利用が進んでいる周波数帯						利用が進んでいない周波数帯		

周波数利用の現状 (平成10年通信白書より)

利用が進んでいない原因

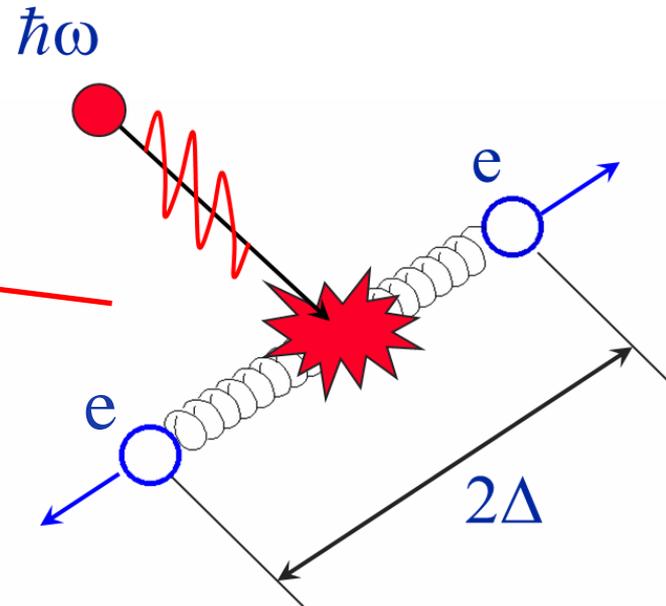
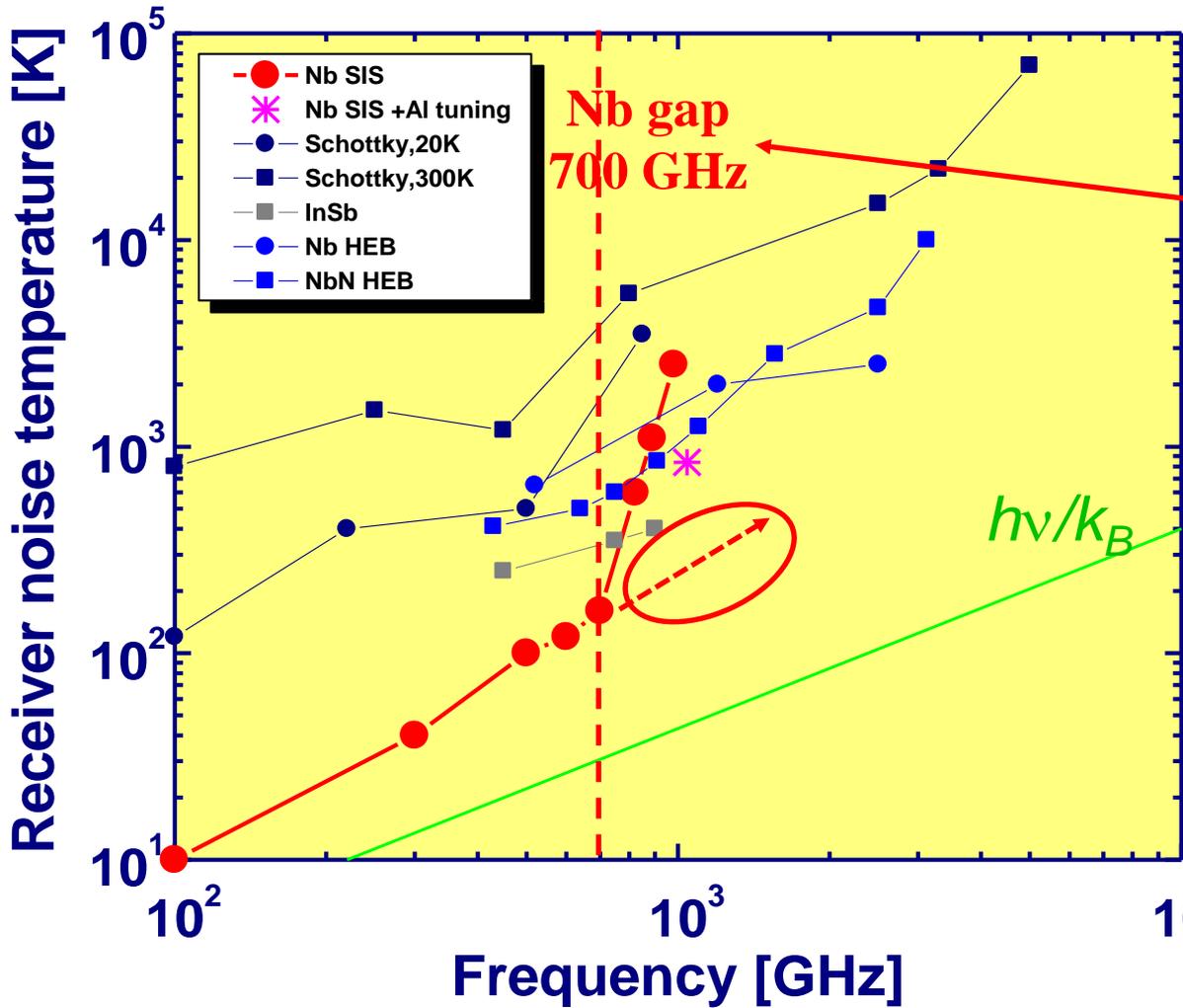
電磁波の発生、検出技術が未開発



サブミリ波帯高感度受信機の開発

Y. Uzawa 博士論文公聴会資料(1999年)

種々の受信機雑音温度の周波数依存性



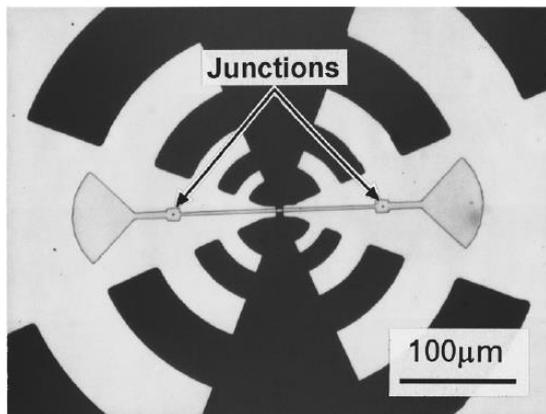
● SISミキサ
 高周波応答 \triangle
 雑音温度 \circ

しかしTHz帯における
 低雑音受信機はなし!

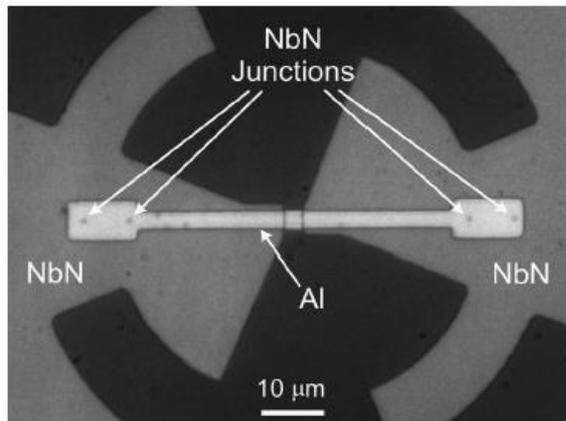
Y. Uzawa 博士論文公聴会
 資料(1999年)

CRL/NICTでのミキサ開発成果

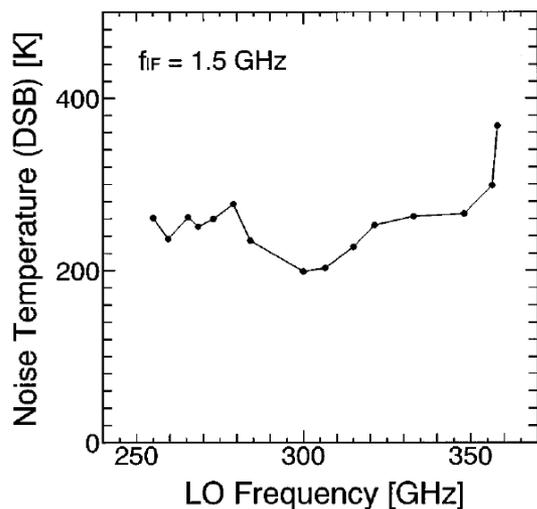
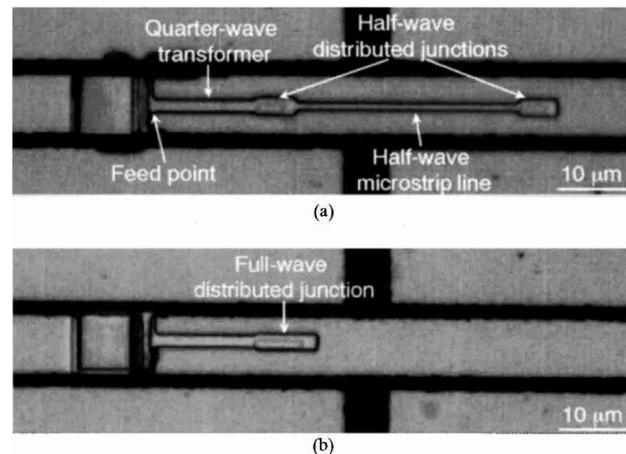
Appl. Phys. Lett. 69, 2435(1996)



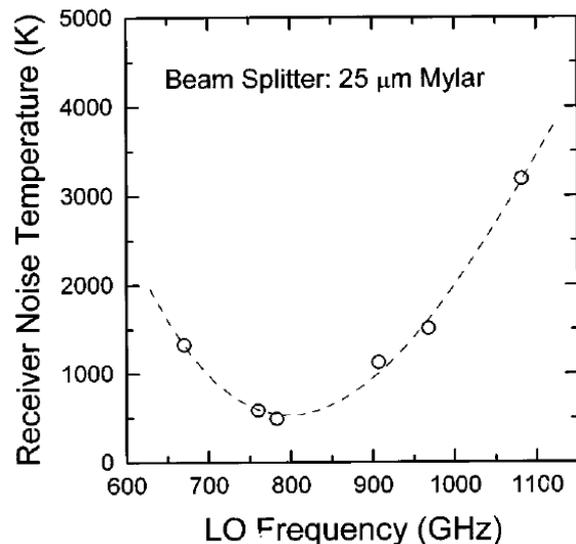
Appl. Phys. Lett. 73, 681(1998)



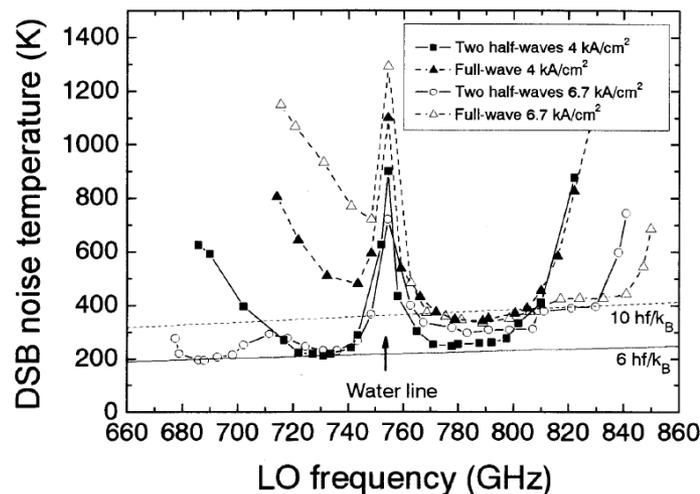
Int. J. IRMMW 26, 41(2005)



NbN接合で世界初の
低雑音動作



THz帯で世界最高感度
を達成



新たな分布定数型SIS接合で
低雑音、広帯域動作に成功

A LOW NOISE NbTiN-BASED 850 GHz SIS RECEIVER FOR THE CALTECH SUBMILLIMETER OBSERVATORY

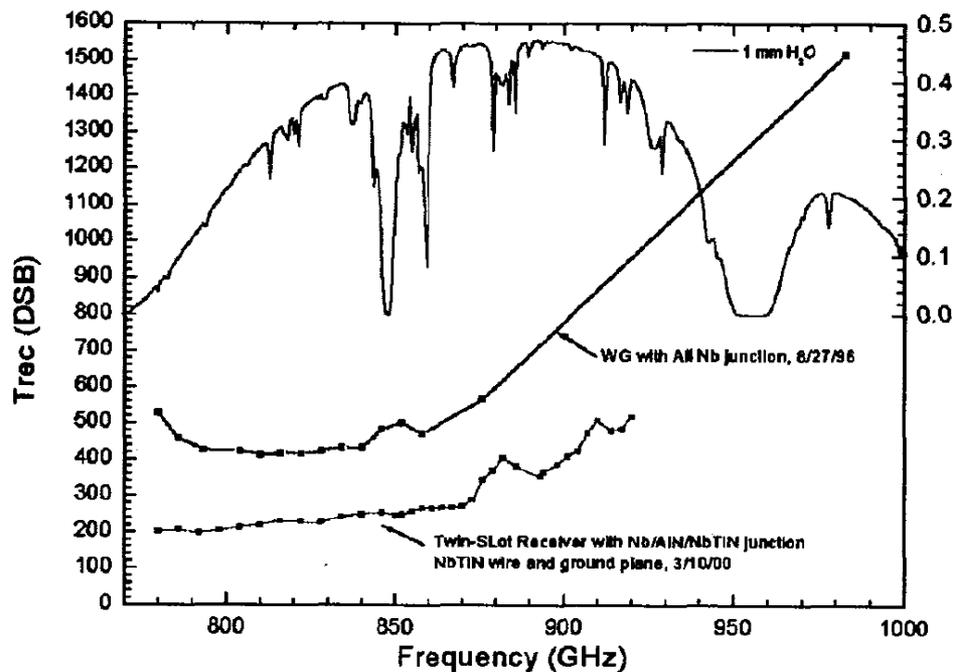
J. W. Kooi,¹ J. Kawamura,¹ J. Chen,³ G. Chattopadhyay,¹
J. R. Pardo,¹ J. Zmuidzinas,¹ T. G. Phillips,¹ B. Bumble,² J. Stern,²
and H. G. LeDuc²

¹California Institute of Technology
320-47, Pasadena, California 91125, USA

²Center for Space Microelectronics Technology/JPL
Pasadena, California 91108, USA

³On leave from the Research Institute of Electrical Communication
Tohoku University
Sendai 980-8577, Japan

Received June 29, 2000



Proc. 11th Int. Symp. Space THz Technol.

May 1-3, 2000

On the Grounds of
The University of Michigan
Ann Arbor, Michigan

QUASI-OPTICAL TERAHERTZ SIS MIXER

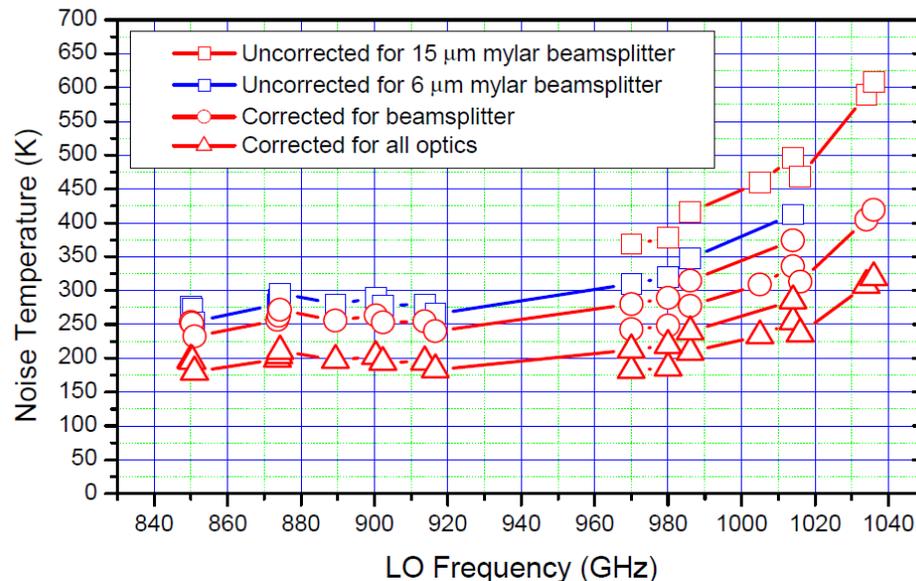
A.M. Baryshev^{1,2}, B.D. Jackson¹, G. de Lange¹, S.V. Shitov², N. Iosad³, J.R. Gao¹,
T.M. Klapwijk³

¹SRON-Groningen, Groningen, The Netherlands

²Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Moscow, Russia

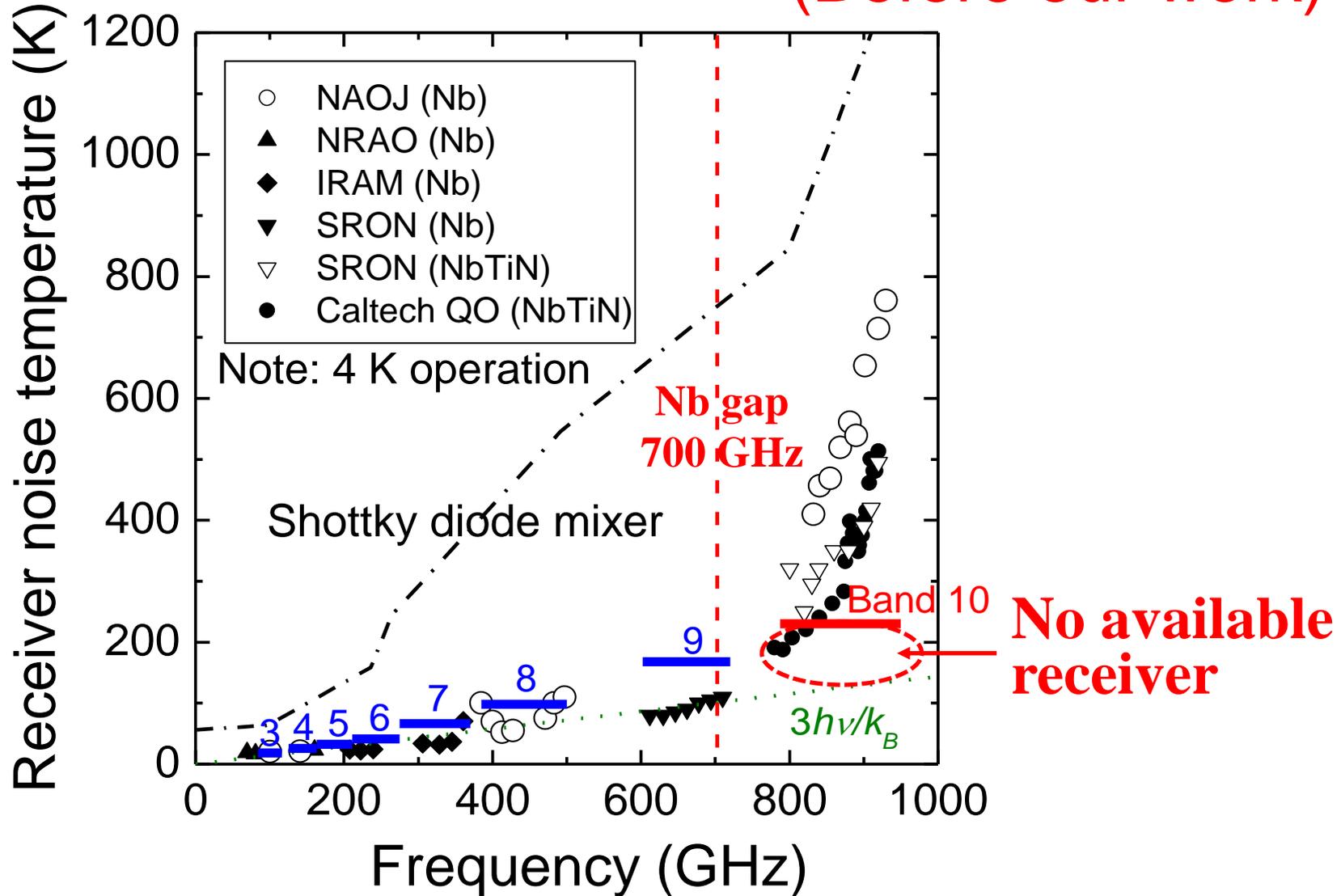
³DIMES, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands

Double slotline antenna mixer, 2.5 K bath temperature



State-of-the-art T_{RX} vs ALAM Spec.

(Before our work)





福地会長(左)、筆者(右)

元通信総合研究所長

畚野 信義

畚野信義氏は電波研究所において宇宙科学や衛星開発で活躍されました。この連載は、JFSCが畚野氏へインタビューしたことをきっかけに実現しました。今回は第5回になります。

衛星通信フォーラム会長
首都大学東京教授
福地 一

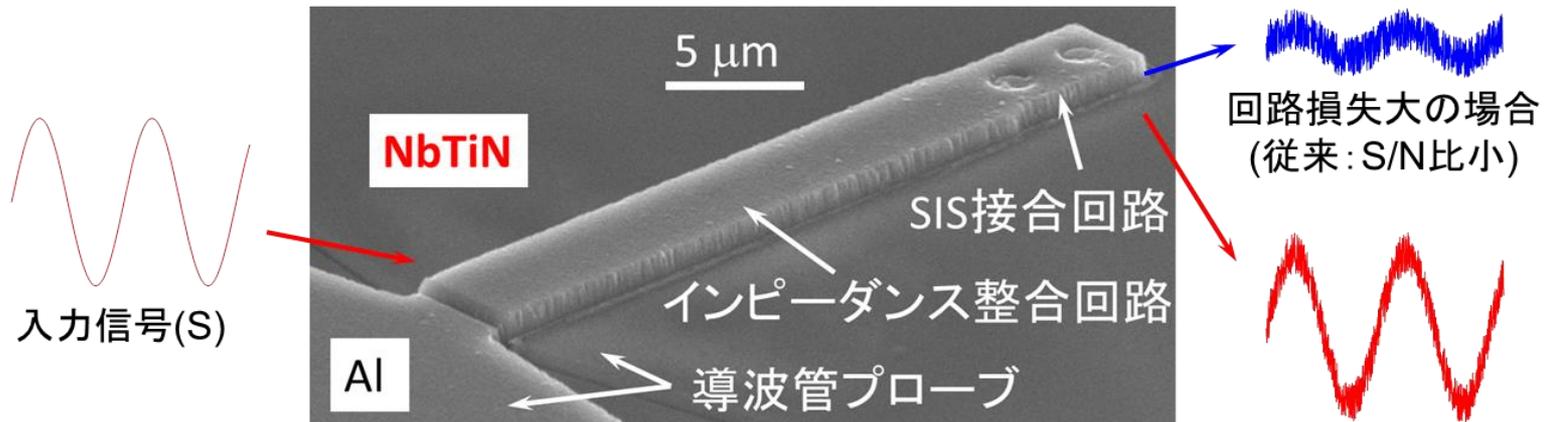
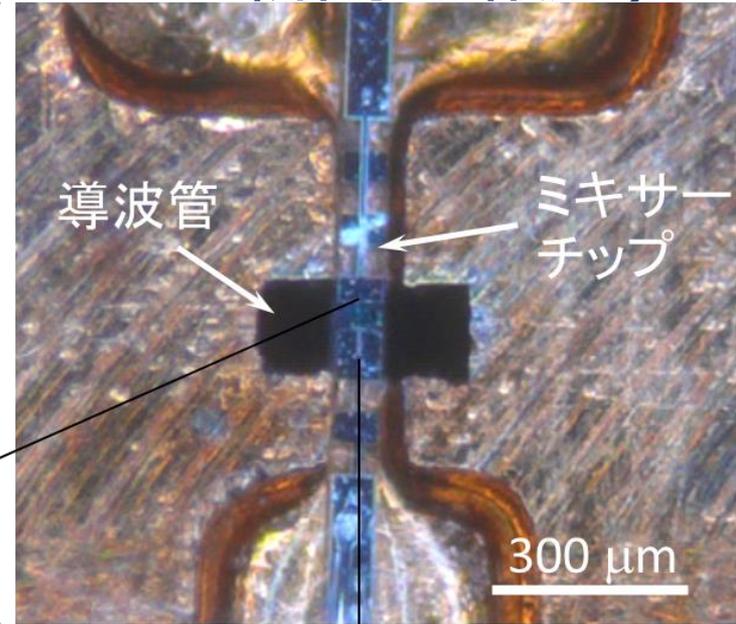
私は2003－6年度の期間、総合科学技術会議の評価専門調査会の専門委員をしていた。その頃総合科学技術会議では、総額300億円を超えるビッグプロジェクトはそれを発足させるかどうかを決める時には、アドホックの評価検討会を立ち上げ、集中的な検討を行うことになっていた。2003年秋ALMAにゴーをかけるかどうかを決める評価検討会が作られ、私が座長を務めることになった。メンバーには江崎さんを始めとする大物が多くおられた(別表)。元電波研究所という名の電波を中心とした研究をする組織の責任者をしていたということで、この役が周って来たのだらうと気楽に考えていた。

第2回の評価検討会に海部天文台長とこのプロジェクトの最初から中心になっておられた石黒教授が説明に出席された。その話を聞いて私はアッと驚いた。ALMA建設計画はすでに発足し、欧米は2年前から予算が付き、2者だけで計画はどんどん進み、予算が認められていない日本は取り残されていた。ハッキリ言えば外されて除け者にされているというではないか。日本が先行して調査や検討を進めてきたにもかかわらず、実行予算が認められないために、計画の中身は欧米中心(有利)にドンドン修正されて来ていた。何とか食い込むにはこれが最後のチャンスと説明は悲壮感にあふれていた。この計画の経緯(国立天文台の努力)をある程度知る私は何故この時点になってこのような事態になるまで文部科学省が予算の優先度を後回しにして来たのか理解できなかった。そこで、日本が不利な状況を挽回(対等の関係を回復)するよう努力することを条件に、この計画にGOをかけるようキツイ目の報告書を提出した(別紙)。幸い評価専門調査会の審議をクリアーし、総合科学技術会議でも認められ、2004年度から予算が付くことになった。

日本(国立天文台)もALMA計画に参加へ

Band 10受信機開発のため2005年10月に天文台へ

NAOJ-NICT共同で開発したSISミキサ (2009年記者発表、NHKや新聞で報道)

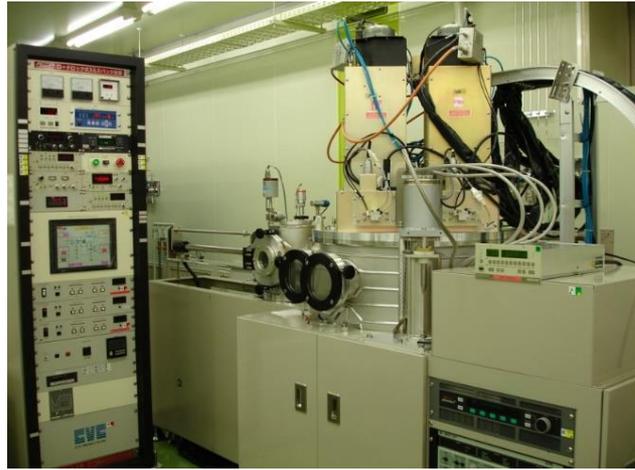


世界初のALMA仕様の達成

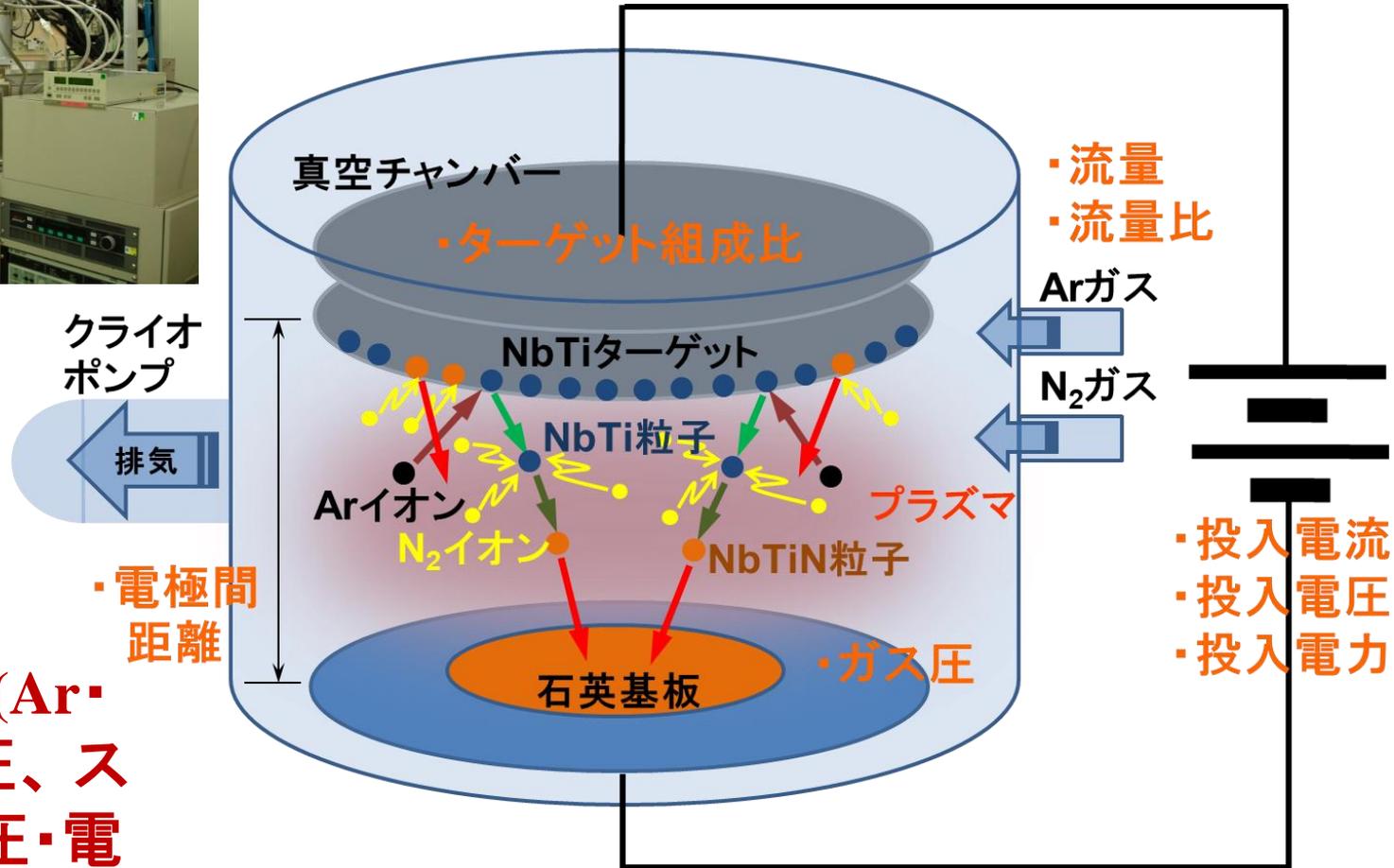
+ SISの雑音(N)

回路損失極小の場合
(本成果: S/N比大)

高品質NbTiN薄膜の作製 (NICT)

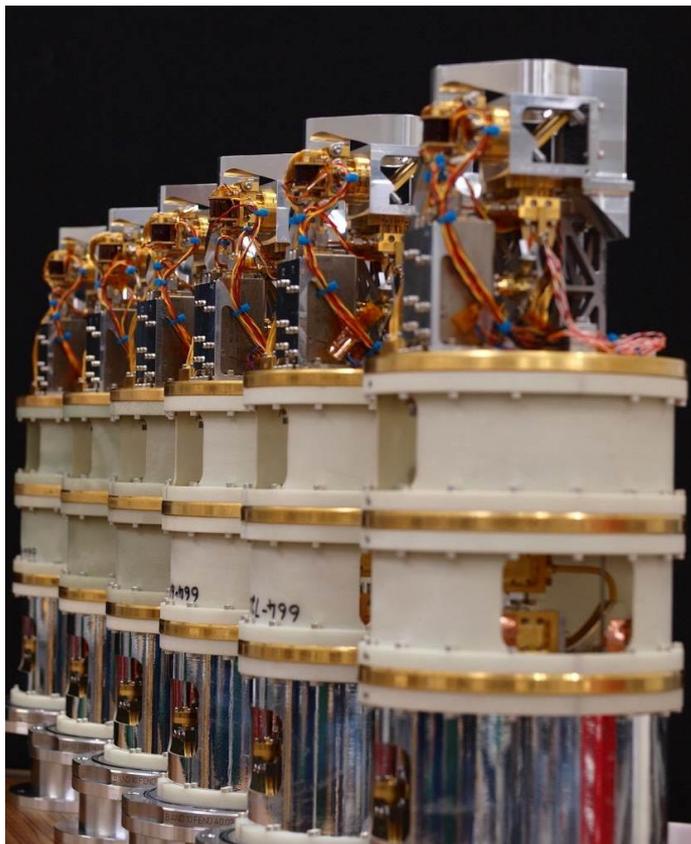


反応性DCスパッタ

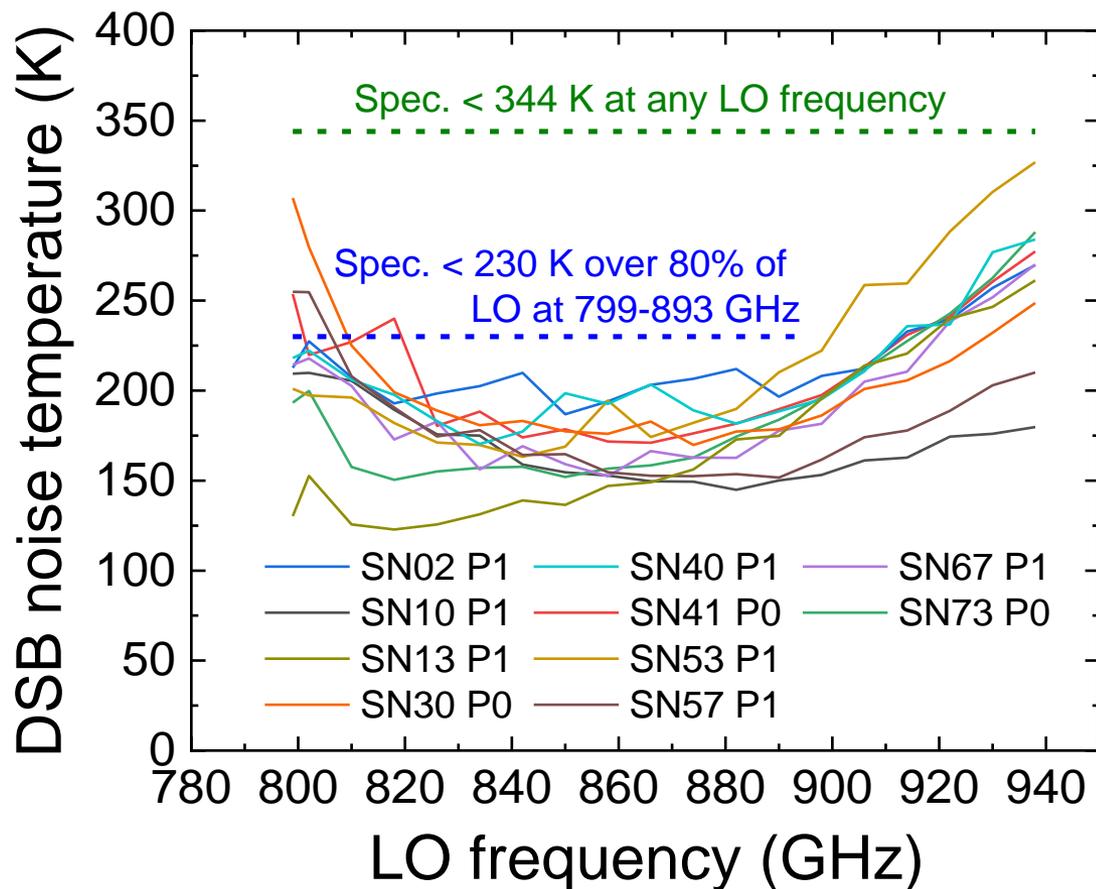


$NbTiN$ 品質 = $f(\text{Ar} \cdot N_2 \text{流量、ガス圧、スパッタ電流} \cdot \text{電圧} \cdot \text{電力、....})$

量産した受信機と雑音性能

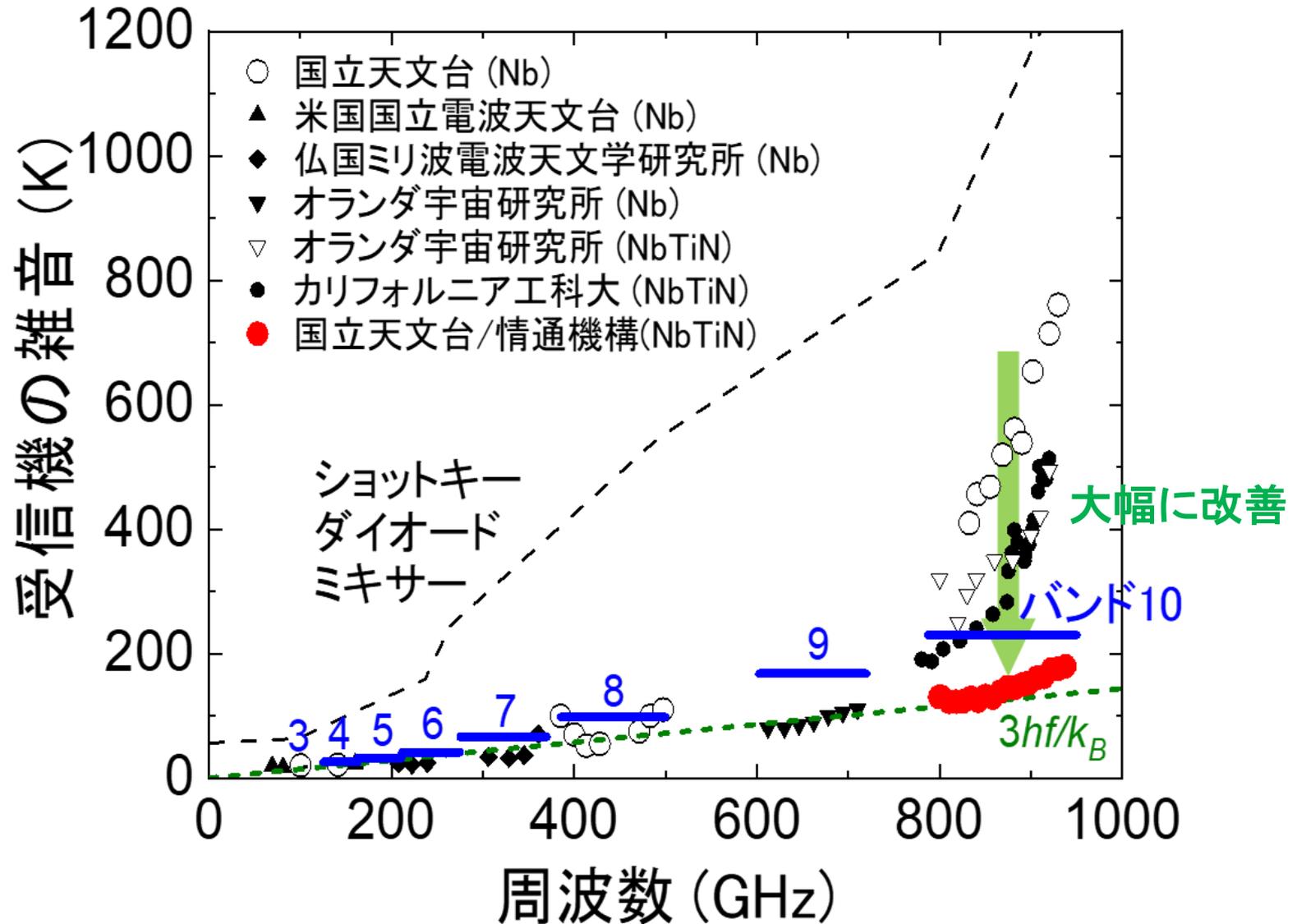


73台をチリに出荷
(2013年度に完了)



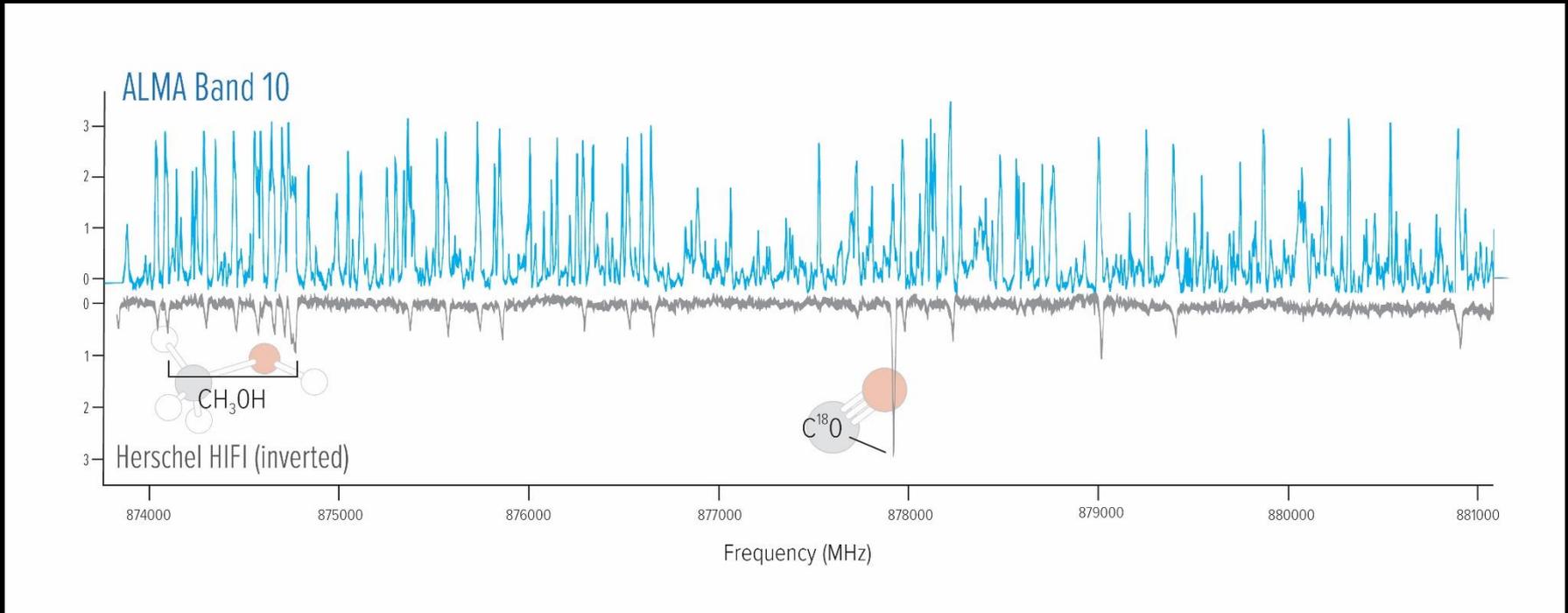
要求仕様を達成

バンド10受信機雑音性能



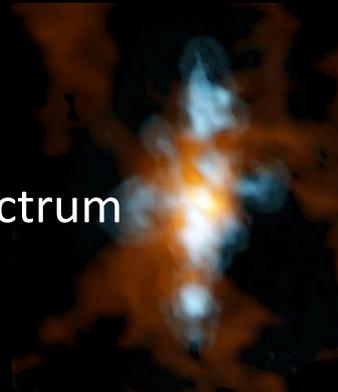
世界最高性能を達成

ALMA Band 10 Spectral Survey of NGC 6334 I



- Spectral survey of NGC 6334I
- North-south bipolar outflow seen in HDO and CS
- Rich chemical structure not readily seen in beam-diluted Herschel spectrum

McGuire et al. (2018)



内容

- 国立天文台について
- ALMA最高周波数帯受信機の開発
 - ALMA望遠鏡概要
 - バンド10受信機開発
- 将来技術の開発
 - 超伝導増幅器、超伝導非相反回路の紹介



テラヘルツ研究センターは先進的無線計測技術で標準化、産業界へ貢献し、テラヘルツ帯の有効利用を促進する

テラヘルツ帯の有効利用による快適な社会の実現

産業

テラヘルツ波能動業務イメージ

標準

製品、サービスの提供
 ・材料、デバイス開発等
 ・システム開発等



国際的周波数利用の取り決め
 ・ITU-R デジュール標準(周波数分配等)
 ・IEEE802等 デファクト標準(通信規格等)

研究協力
 技術提供

参加

研究
 開発委託

↑

テラヘルツシステム応用推
 進協議会
 パナソニック、富士通、NEC等

総務省
 Ministry of Internal Affairs
 and Communications
電波部

情報発信

【参考】

ITU-R
 WRC-19における275-450GHz帯能
 動業務周波数特定検討(議題1.15)
 合意

IEEE
 世界初の300GHz帯を用いた無線
 通信の国際標準規格
 IEEE802.15.3dが2017/9/28に成立

参加・運営

研究成果の提供

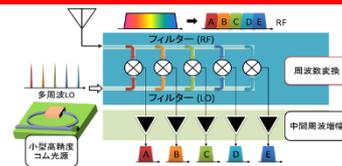
大学・公
 的研究
 機関

共同研究

NICTテラヘルツ研究センター(先進的THz計測拠点)

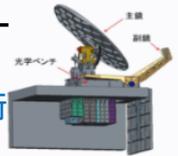


- ・THz無線テストベッド
- ・THz無線計測技術
- ・THz材料特性評価技術



・小型THzセンサー

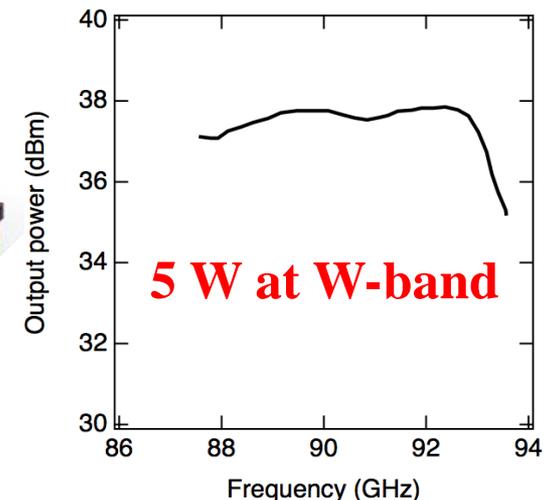
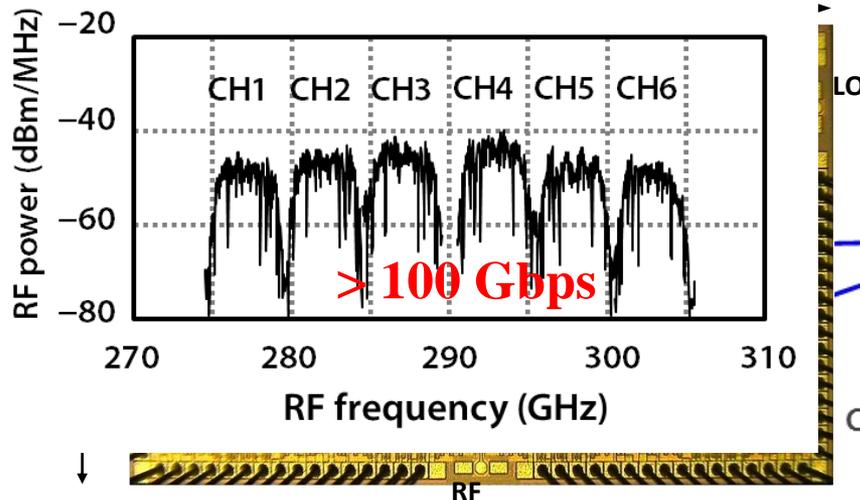
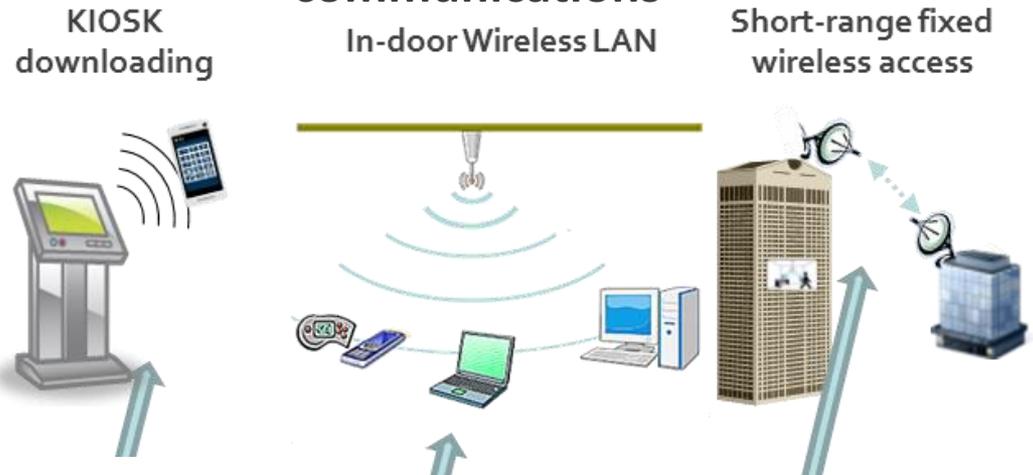
高度な無線通信技術
 をセンシング技術へ



超高速無線通信に向けた開発

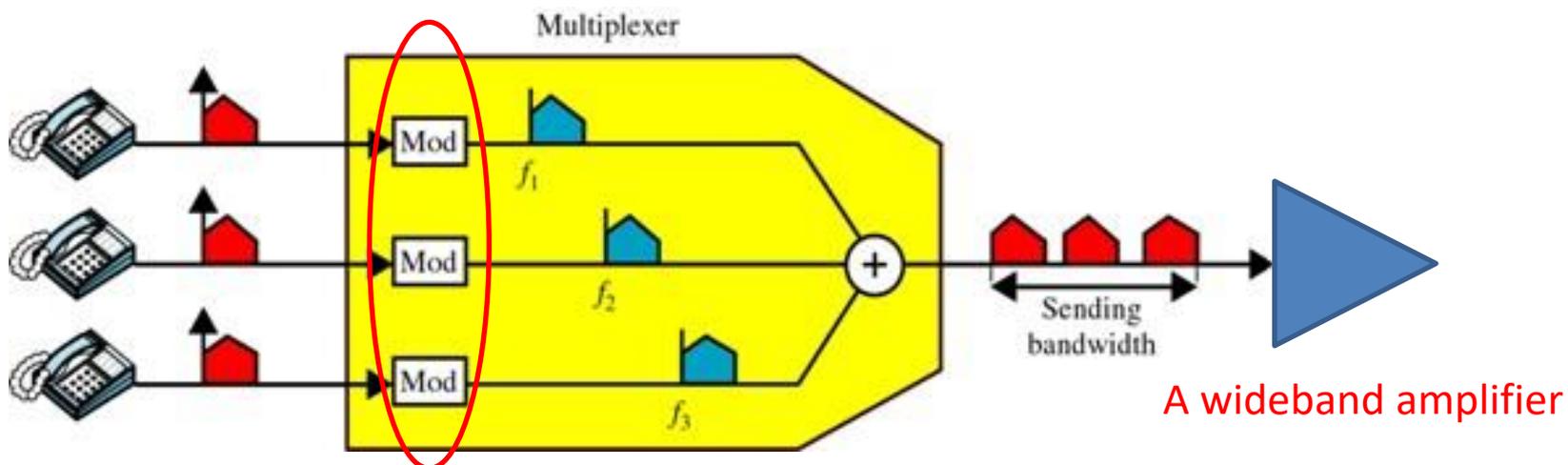
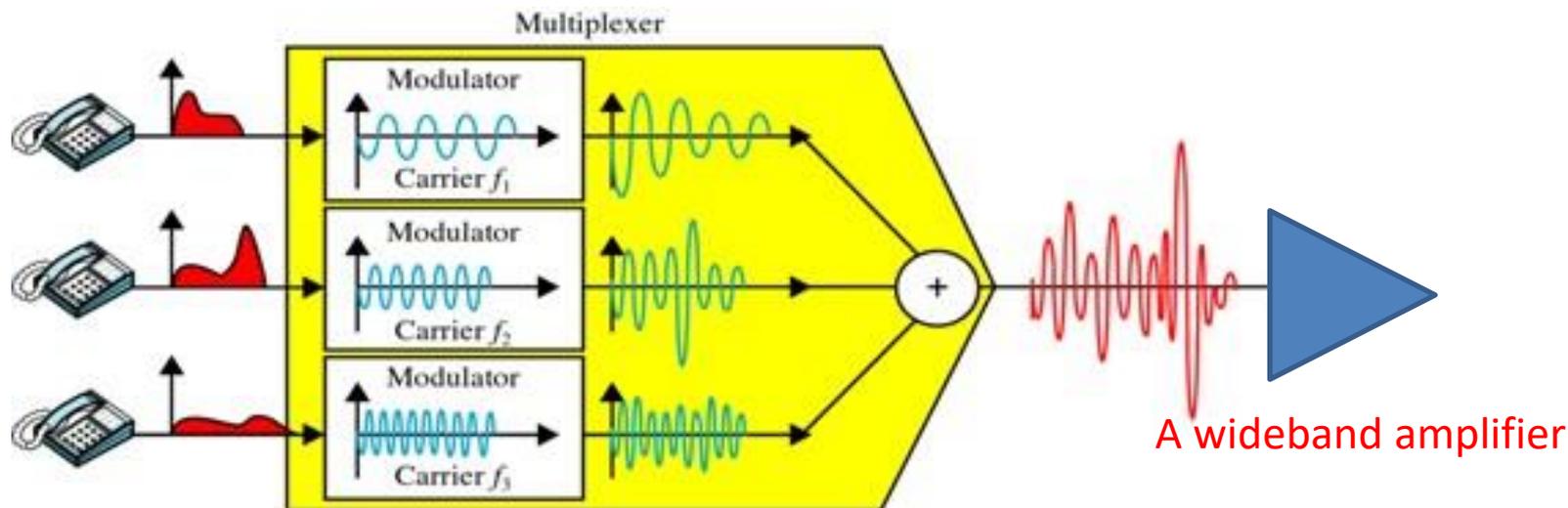
- 高周波
- 広帯域
- 低雑音
- 多チャンネル

Use cases of terahertz wireless communications



With
Hiroshi
Univ. at
Panasonic

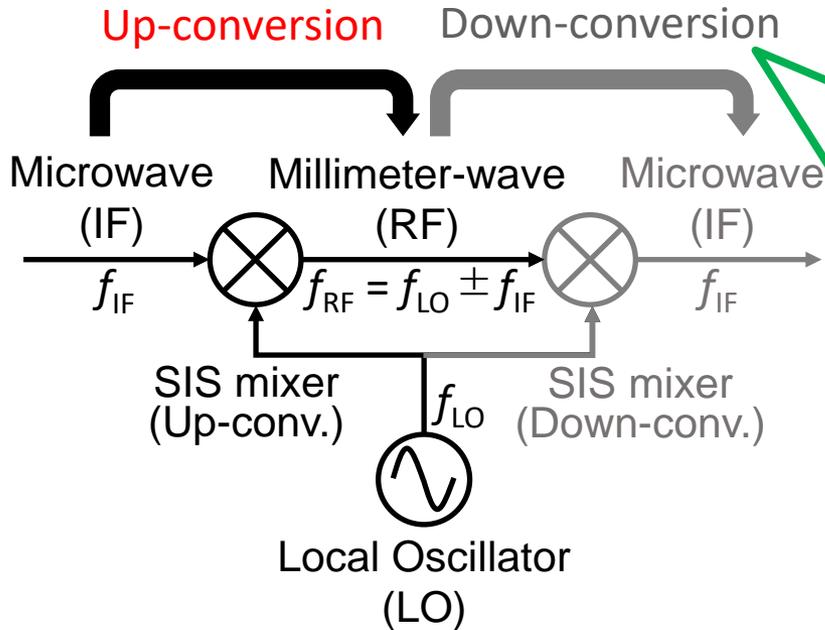
周波数分割多重化 (FDM)



Up-converters

アップコンバータにSISミキサを用いたら？

SISミキサを用いた増幅器



Appl. Phys. Lett. 36, 777 (1980)

Conversion gain in mm-wave quasiparticle heterodyne mixers

T.-M. Shen and P. L. Richards

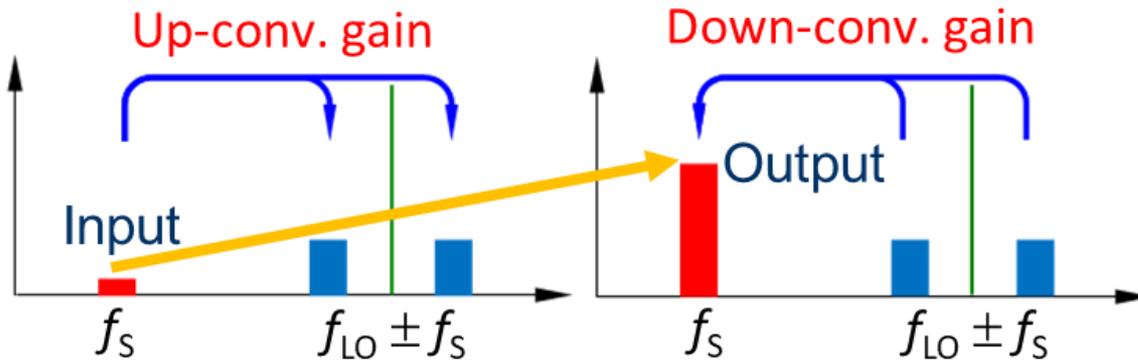
Department of Physics, University of California, Berkeley, California 94720

R. E. Harris and F. L. Lloyd

National Bureau of Standards, Boulder, Colorado 80303

(Received 4 February 1980; accepted for publication 27 February 1980)

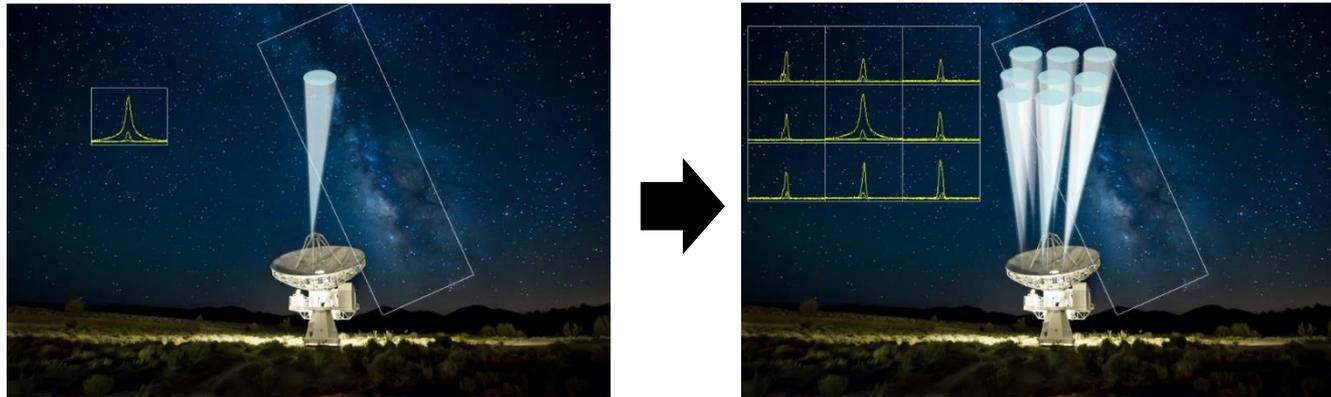
We report the observation of heterodyne mixing in superconductor-insulator-superconductor tunnel junctions with significant conversion gain and with a noise temperature comparable to the photon noise limit. (Double sideband $L^{-1} = 1.40 \pm 0.14$, $T_M \lesssim 1.5$ K at 36 GHz.) The mixing arises from the strong nonlinearity in the quasiparticle tunneling currents at voltages comparable to the full energy gap. Gain is observed when the onset of quasiparticle current is sufficiently sharp that quantum effects are important. The observed gain is in good quantitative agreement with calculations based on the work of Tucker. It should make possible the construction of photon-noise-limited microwave heterodyne receivers.



Microwave signal could be amplified with low power consumption ($< 1 \mu\text{W}$?).

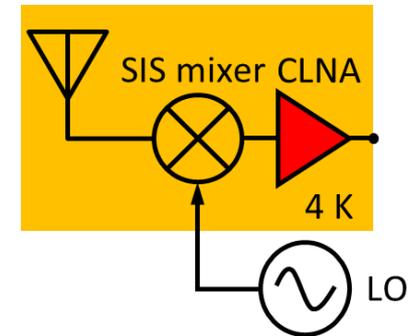
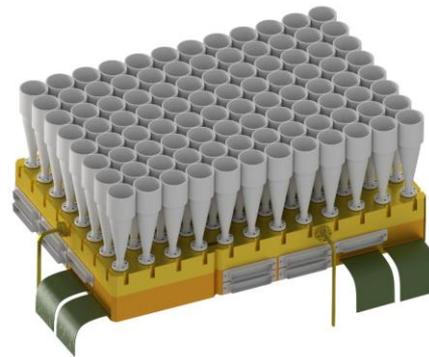
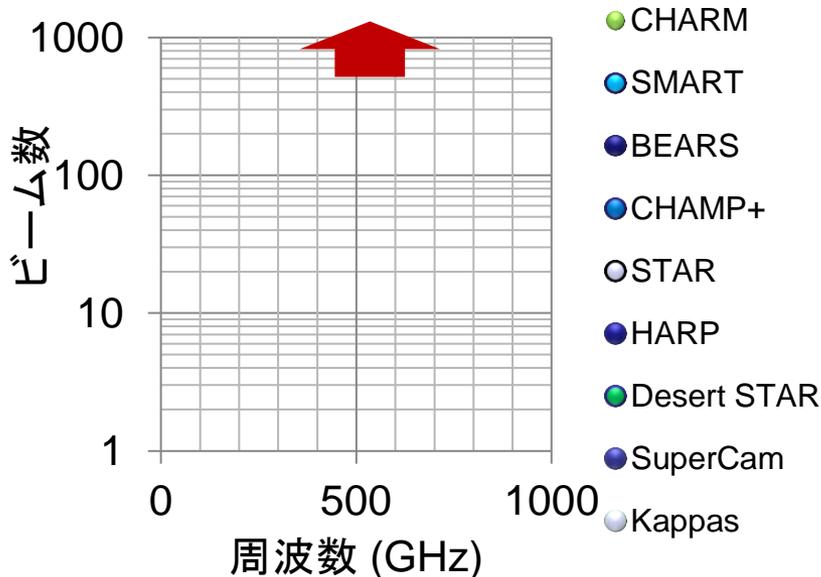
低消費電力増幅器のニーズ

■ 電波望遠鏡の超伝導受信機はシングルビームからマルチビームへ



ビームに比例して
観測効率が向上

■トレンドは1000ビームへ

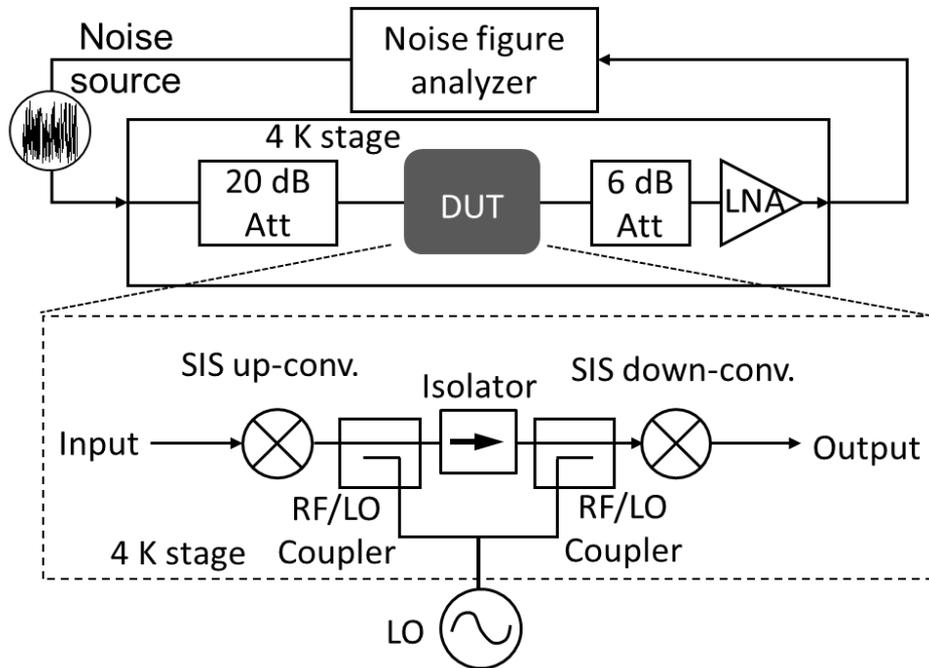


課題: 4 Kステージ上の消費電力の低減
半導体ベースの冷却型増幅器 10 mW
=> 10 W(/1000 beams)

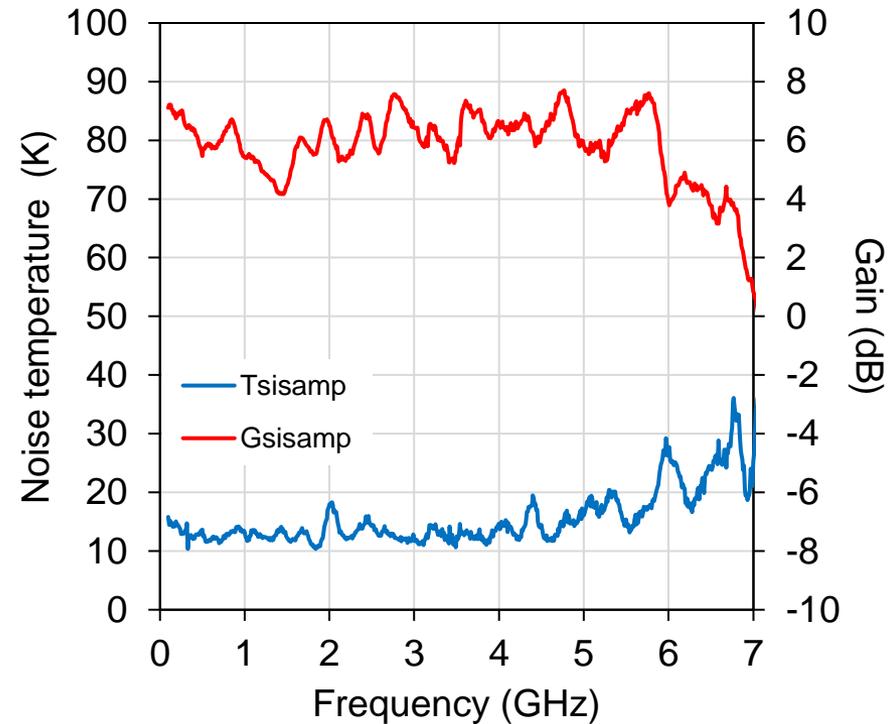
➡ 低消費電力なマイクロ波帯低雑音
広帯域アンプが必要

概念実証実験

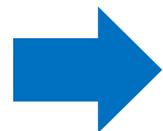
● Experimental setup



● Results



Gain \sim 6 dB and Noise temperature \sim 12 K (almost comparable to semiconductor-based CLNA)

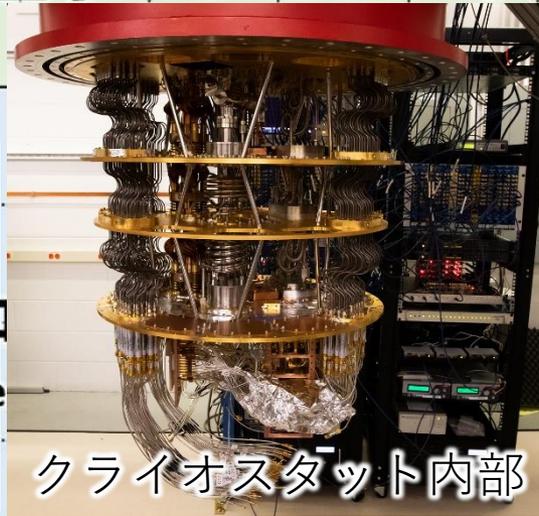
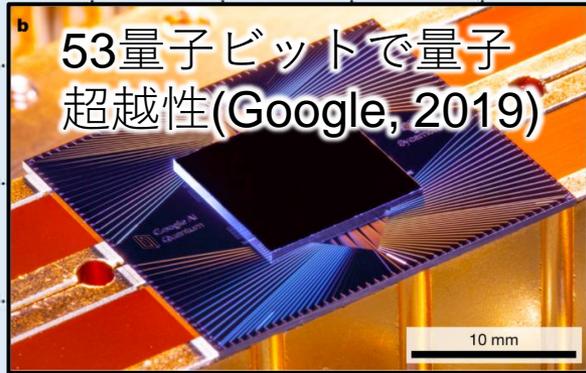


Quantum computing application?

超伝導量子コンピュータの開発状況

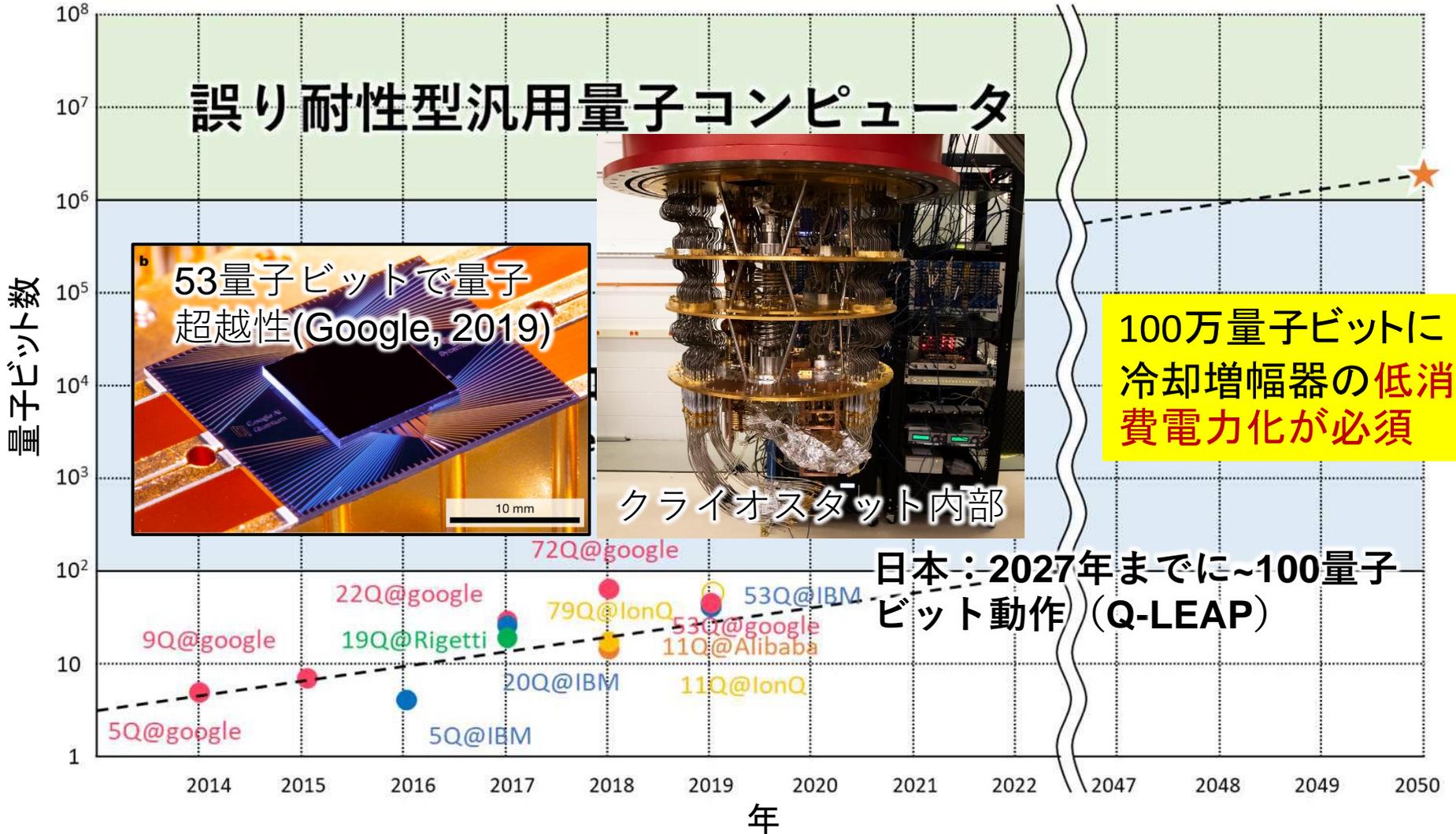
■将来、量子計算機は~100万量子ビット必要(阪大 北川先生の資料)

誤り耐性型汎用量子コンピュータ

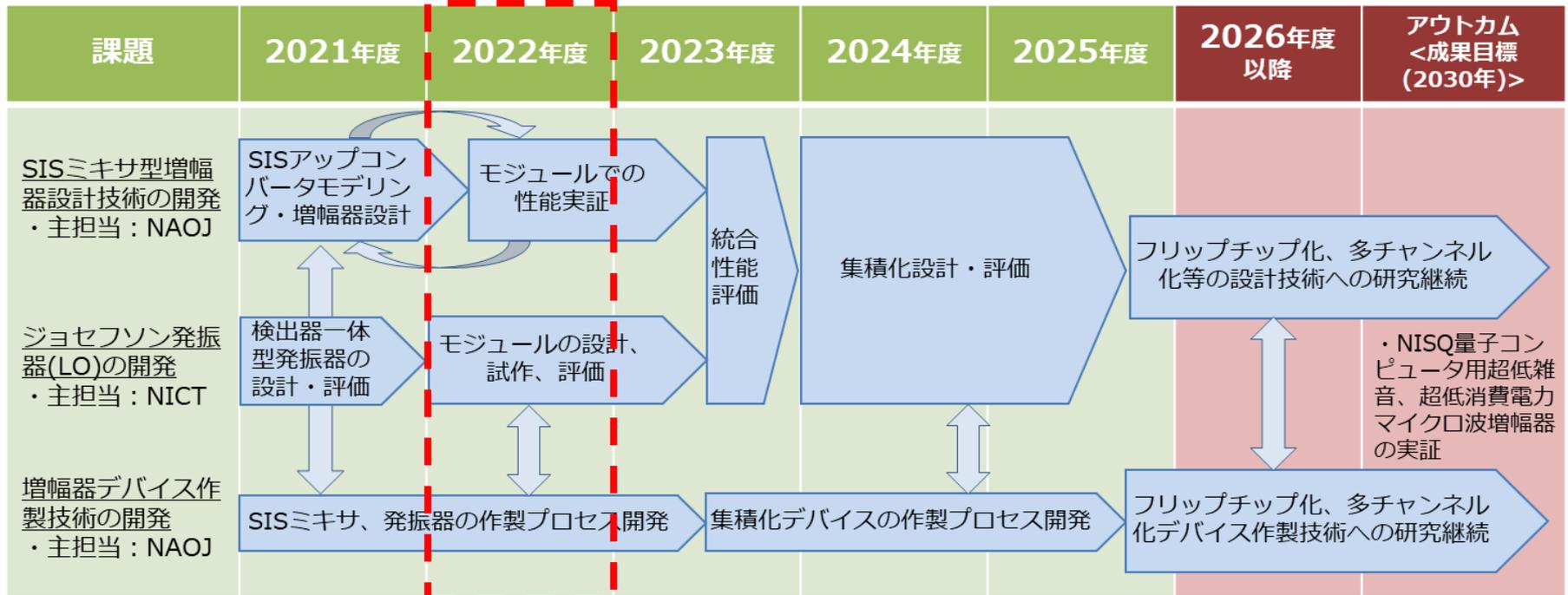


100万量子ビットに冷却増幅器の低消費電力化が必須

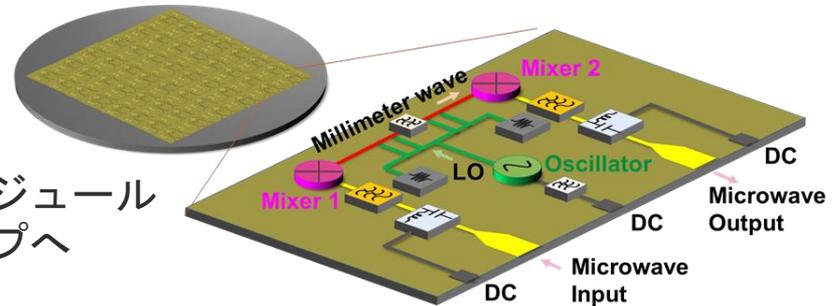
日本：2027年までに~100量子ビット動作 (Q-LEAP)



ムーンショット研究開発事業（目標6）



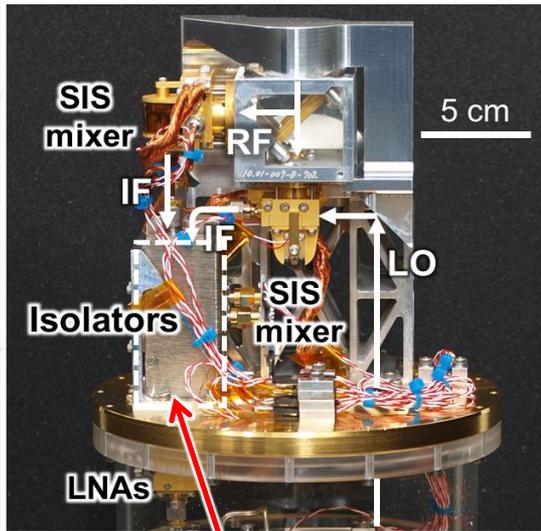
導波管モジュールからチップへ



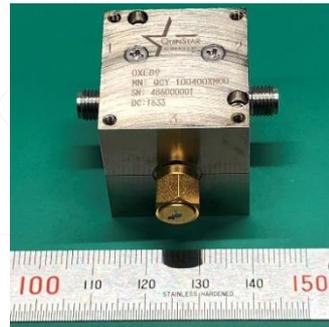
5年目の目標：試作したSISミキサ型増幅器チップの性能評価と動作実証

SISミキサを用いた他の応用 (非相反回路) 科研費で実施

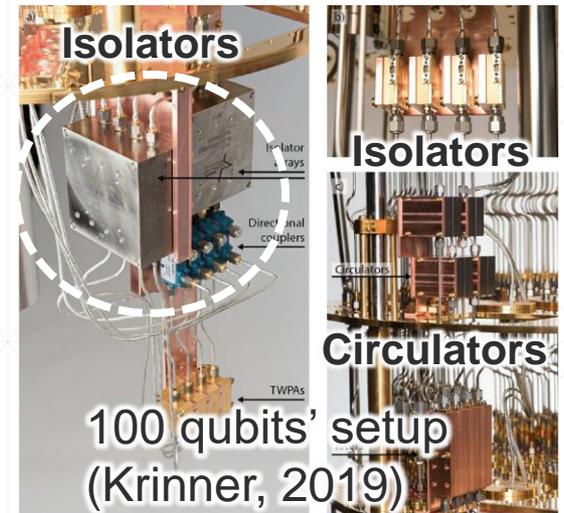
A nonreciprocal device using magnetic materials



Large parts in receiver

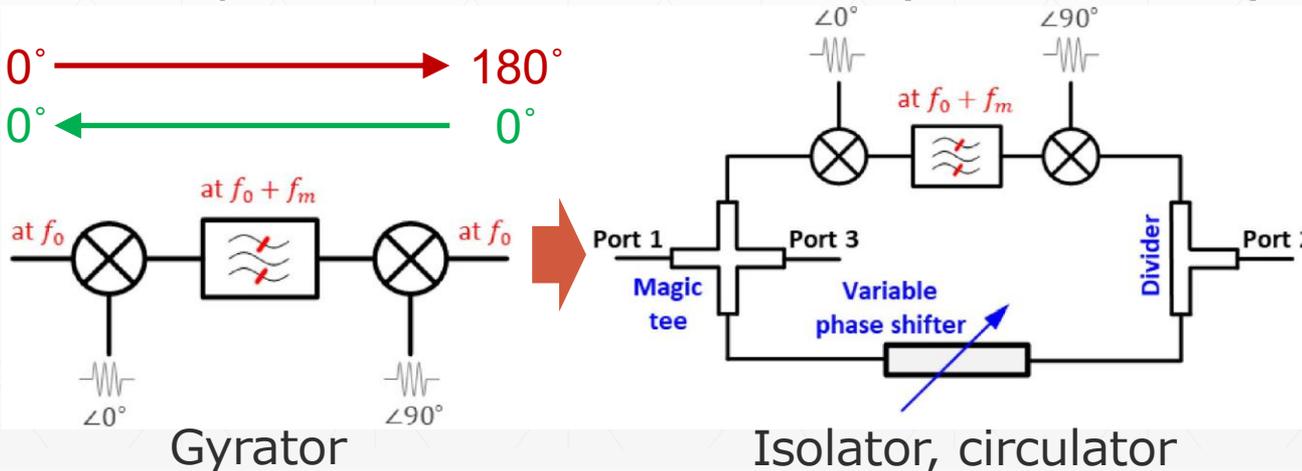


To be miniaturized for large-scale systems



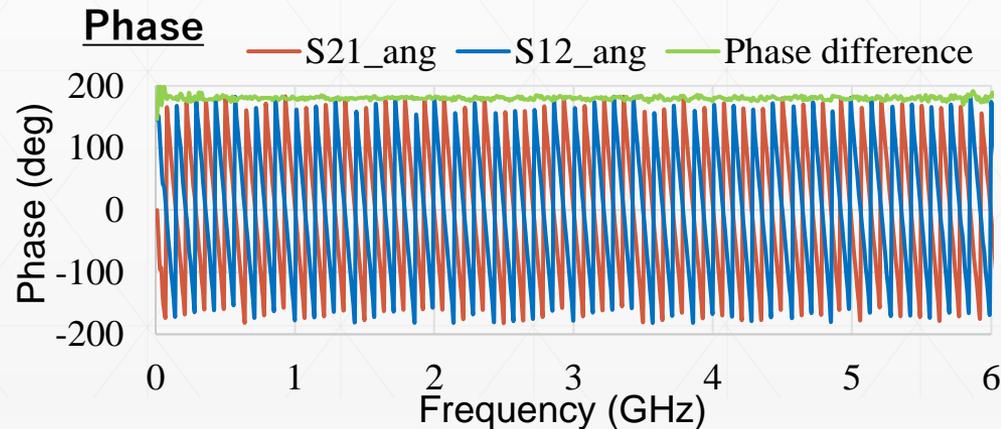
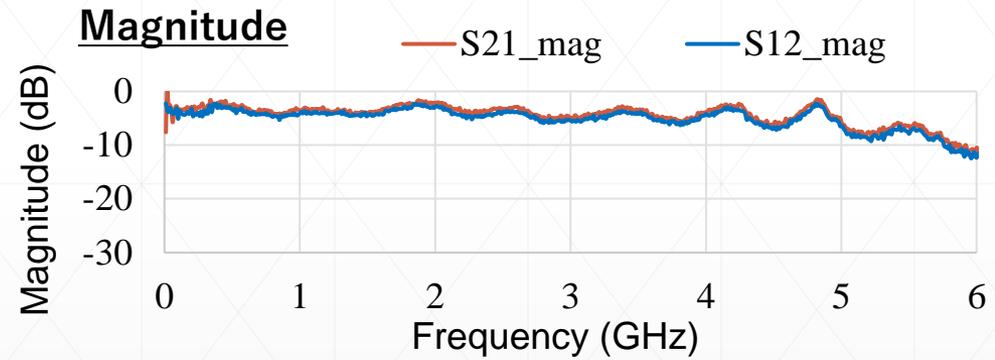
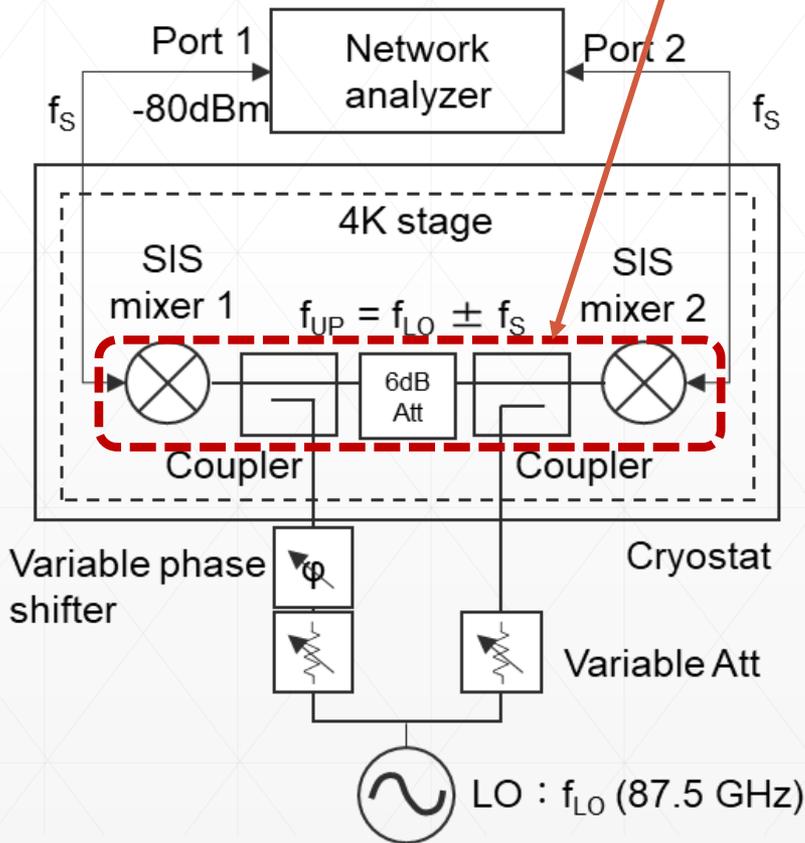
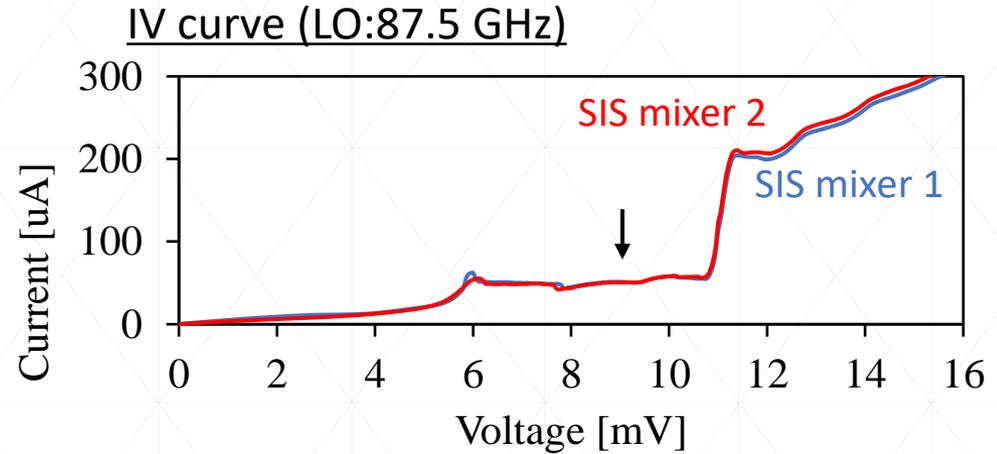
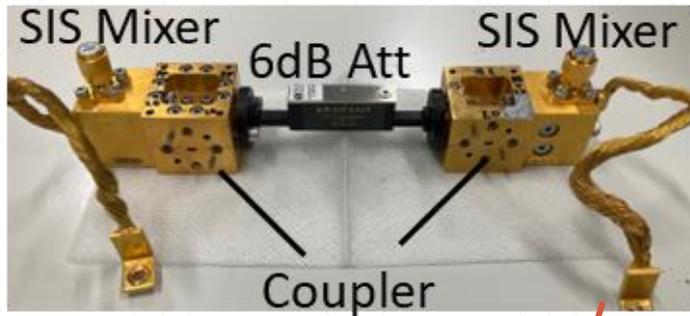
Large parts in quantum computer

- A nonreciprocal circuit with mixers (Kamal, 1960)



Possible to use SIS mixers ?

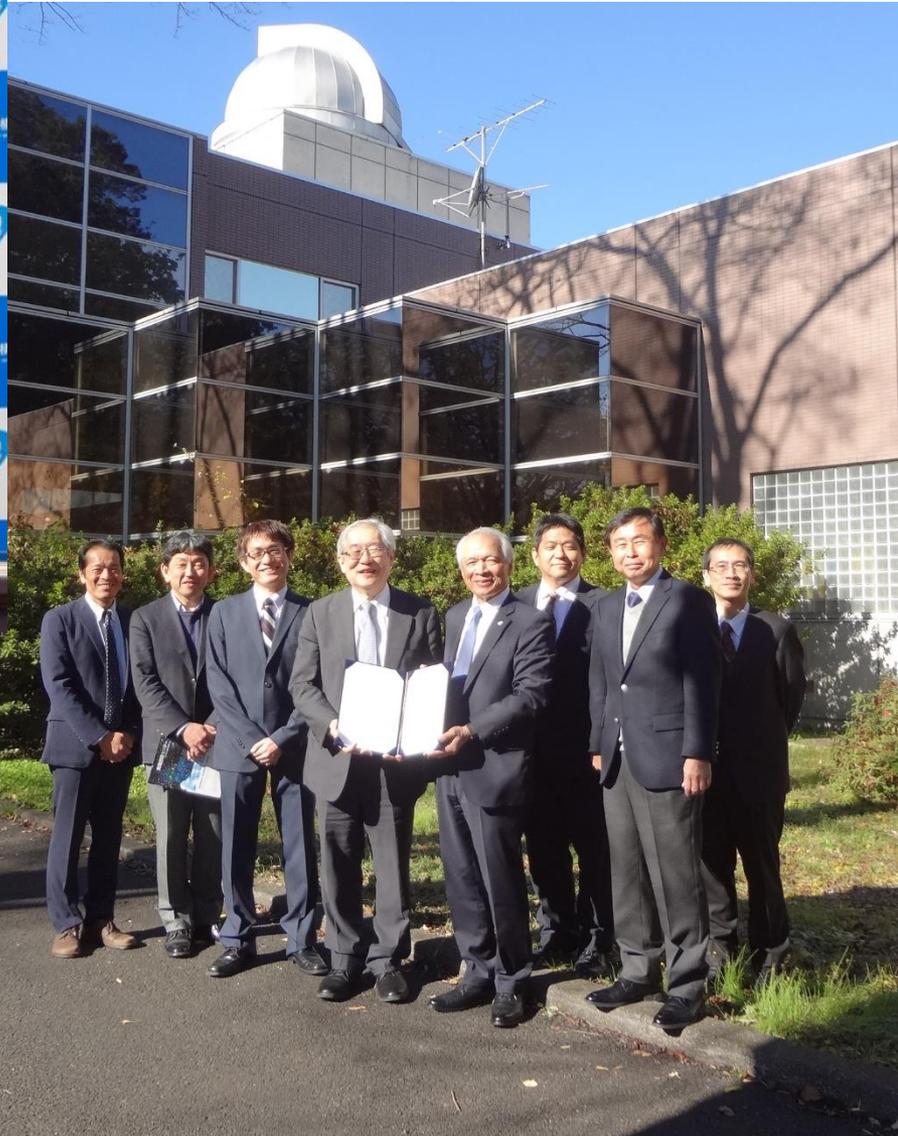
SISミキサを用いた世界初のジャイレータ実験



NICT-NAOJ包括協定 (2019年-現在)



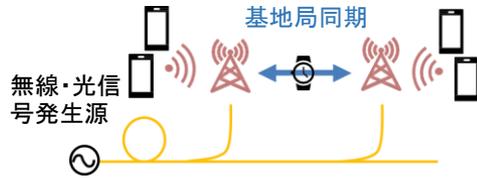
2019年12月3日
国立天文台にて



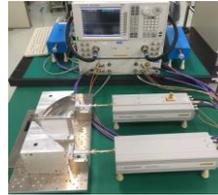
今後の展望

共通する周波数帯を有するB5G/6G、ALMA2の実現に不可欠なテラヘルツ技術と、超伝導量子技術の研究開発を連携して推進し、次世代の大容量無線通信、高性能望遠鏡の実現に貢献する

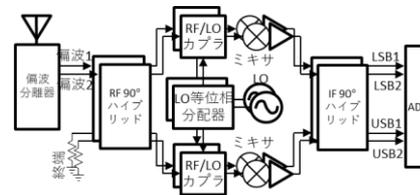
テラヘルツ波基地局間同期技術



テラヘルツ帯材料評価



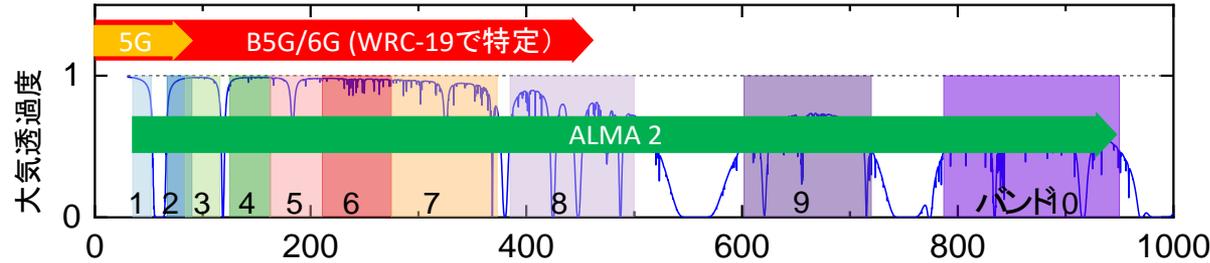
テラヘルツ波受信高度化



超伝導量子技術



MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



NICT
国立研究開発法人
情報通信研究機構

次世代通信: B5G/6G

NAOJ
国立天文台

次世代望遠鏡: ALMA2

まとめ

- 1991年に関西先端研究センター超伝導研究室で開始した窒化ニオブ系超伝導体を用いたSISミキサの研究に携わらせていただいたお陰で、今の私があります。
 - ✓ 国際共同プロジェクトALMA計画において世界最高性能のテラヘルツ帯受信機開発に貢献できました。
 - ✓ SISミキサを用いた新たなデバイスを開発し、次世代受信機や量子コンピュータへの貢献を目指しています。
 - ✓ 今後も連携して次世代技術の研究開発に貢献します。

CRL、NICT、NAOJに感謝!

