

# 南極30m級テラヘルツ望遠鏡用電波カメラ

新田冬夢 (筑波大学)

中井直正, 久野成夫, 永井誠, 村山洋佑, 服部将悟, Guangyuan Zhai, Pranshu Mandal (筑波大学)

関本裕太郎, 福嶋美津広, 三ツ井健司, 都築俊宏, 野口卓, 松尾宏, Agnes Dominjon, Wenlei Shan, 長谷部孝 (国立天文台)

関口繁之, 清水貴之 (東京大学)

瀬田益道 (関西学院大学)

成瀬雅人 (埼玉大学)

# 発表概要

## 1. 南極10m望遠鏡搭載に向けた超伝導カメラ

- カメラシステムの概要
- 機械設計, 熱設計, 検出感度など

## 2. 多画素カメラ実現のkey technology

- Microwave Kinetic Inductance Detector
- レンズアレイ & ホーンアレイの開発
- 極低温における反射防止コーティング
- 野辺山45m望遠鏡搭載に向けたMKIDカメラ

## 3. 南極30m望遠鏡に向けて

## 4. まとめ

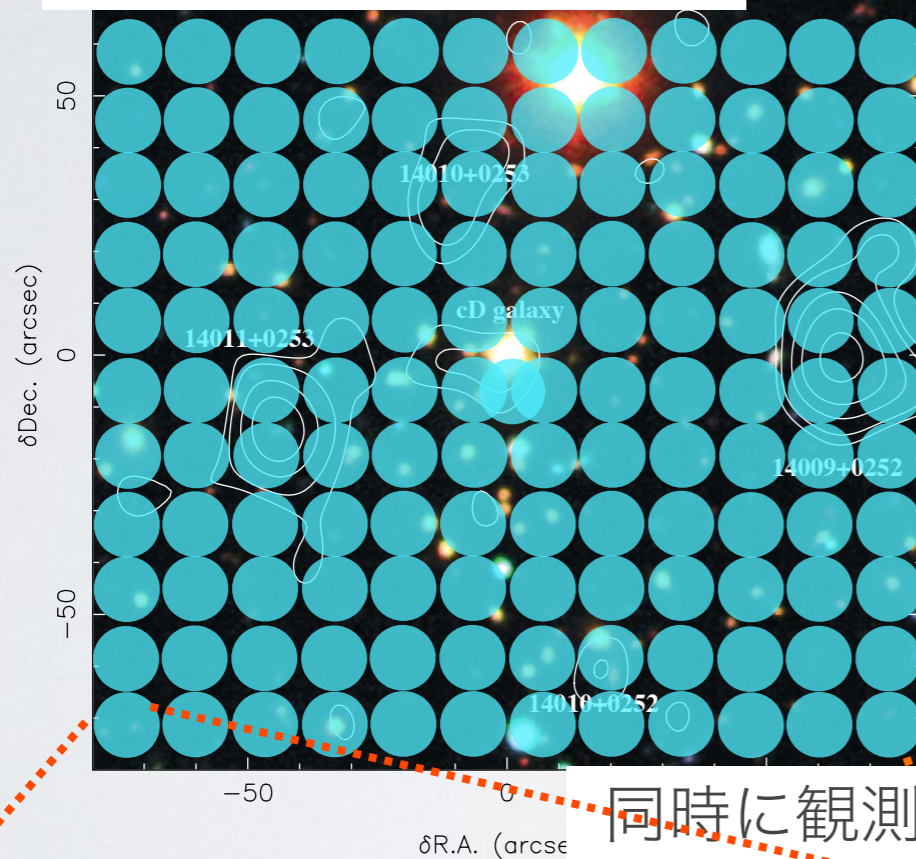
# 南極10m/30m鏡による広視野探査

## \* サブミリ波銀河のサーベイ観測

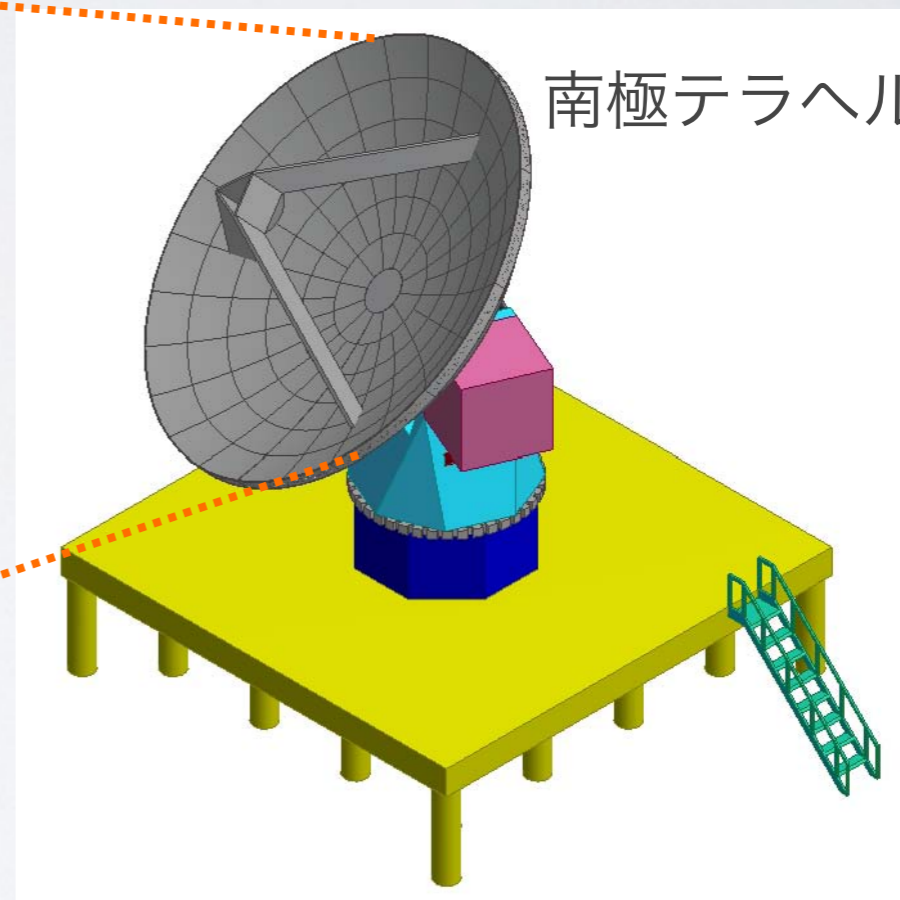
- ・サブミリ波銀河は天空のどこにあるかわからないため、広視野観測が重要  
→南極望遠鏡+電波カメラによるサーベイ観測

電波カメラ：多素子

Blain et al., 2002



同時に観測が可能



南極テラヘルツ望遠鏡

© NAOJ



詳細構造などはALMAを用いてフォローアップ観測  
(相補的な役割)



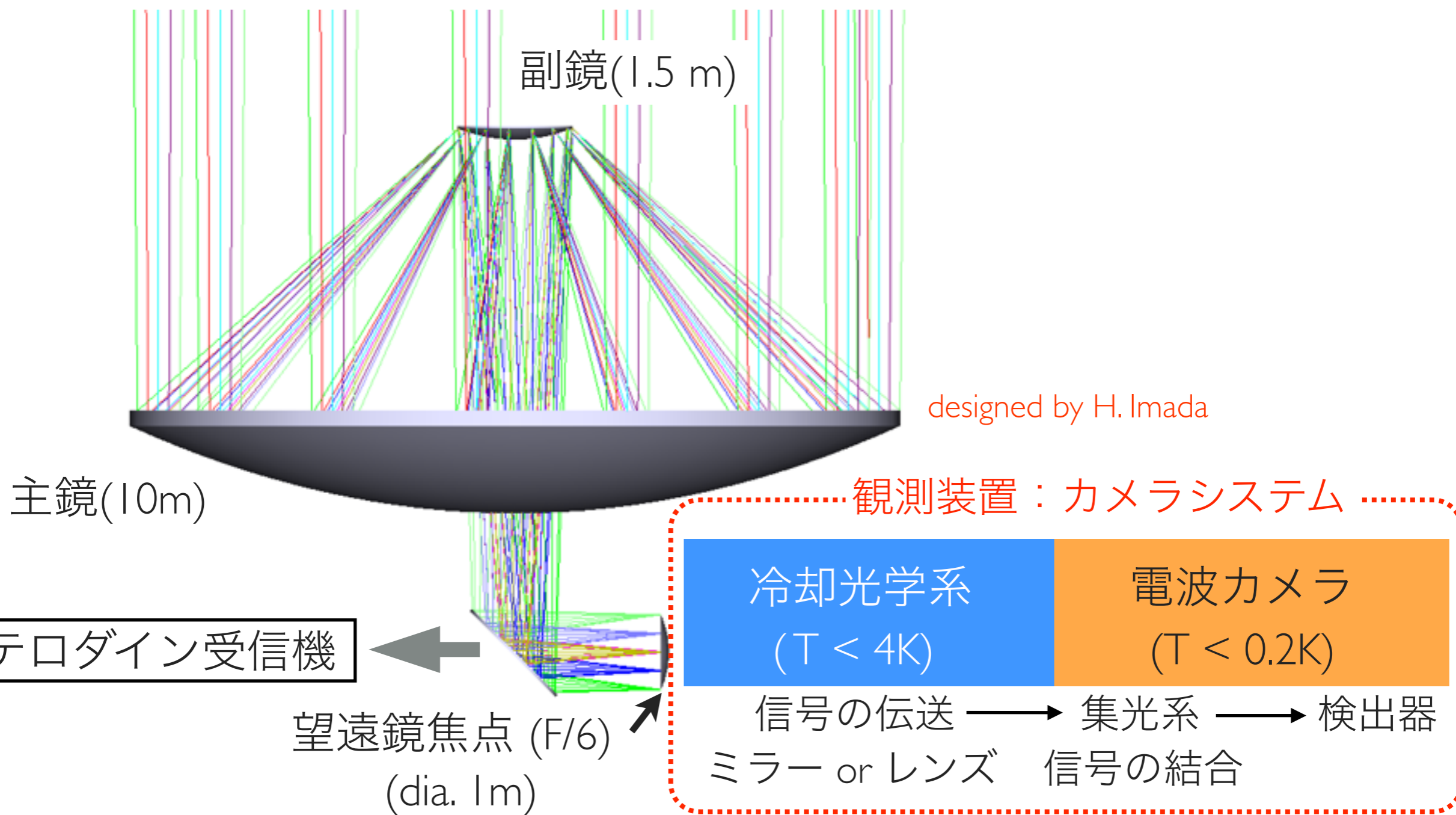
# 南極10m望遠鏡：全体光学系

▶ 視野： $1^\circ$  @ F/6 focus

→ 広域サーベイ観測

▶ 観測周波数

• 400 / 850 / 1300 GHz

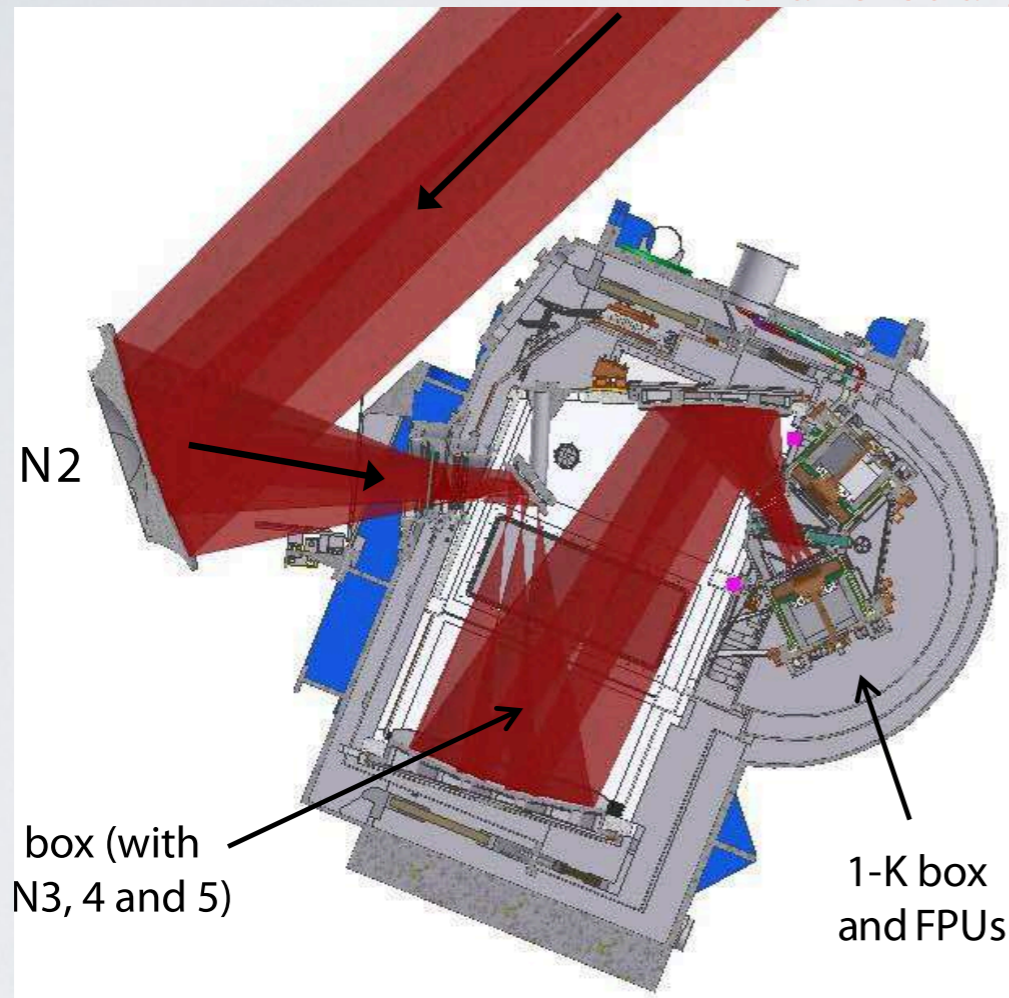




# カメラシステムの伝送光学系

## \* ミラーによる反射系 (e.g. SCUBA-2)

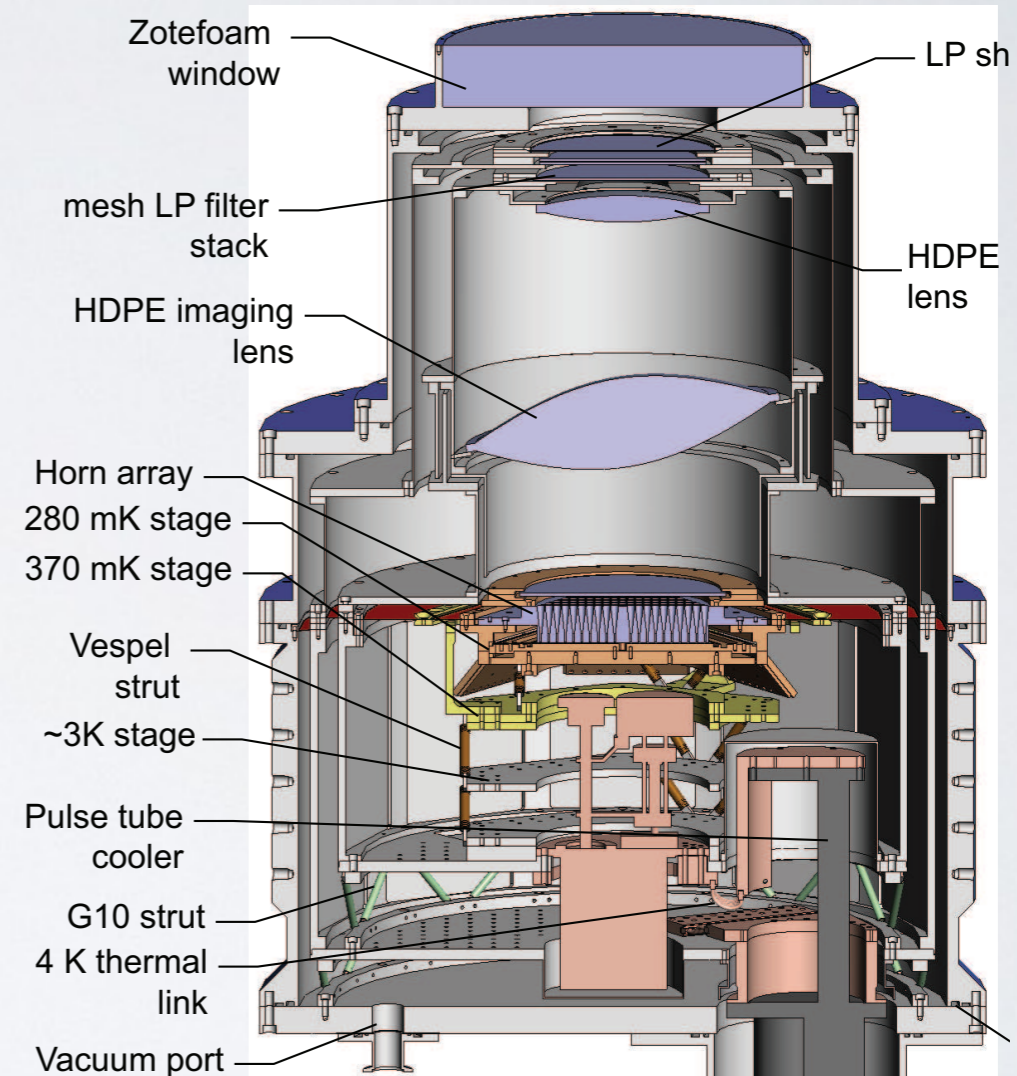
Holland et al., 2013



- 視野1度で伝送するとミラーが巨大化
- 複数枚の組み合わせではアライメント調整が困難
- ミラーの配置を工夫することで冷却部をコンパクトにできる

## \* レンズによる屈折系 (e.g. APEX-SZ)

Schwan et al., 2012

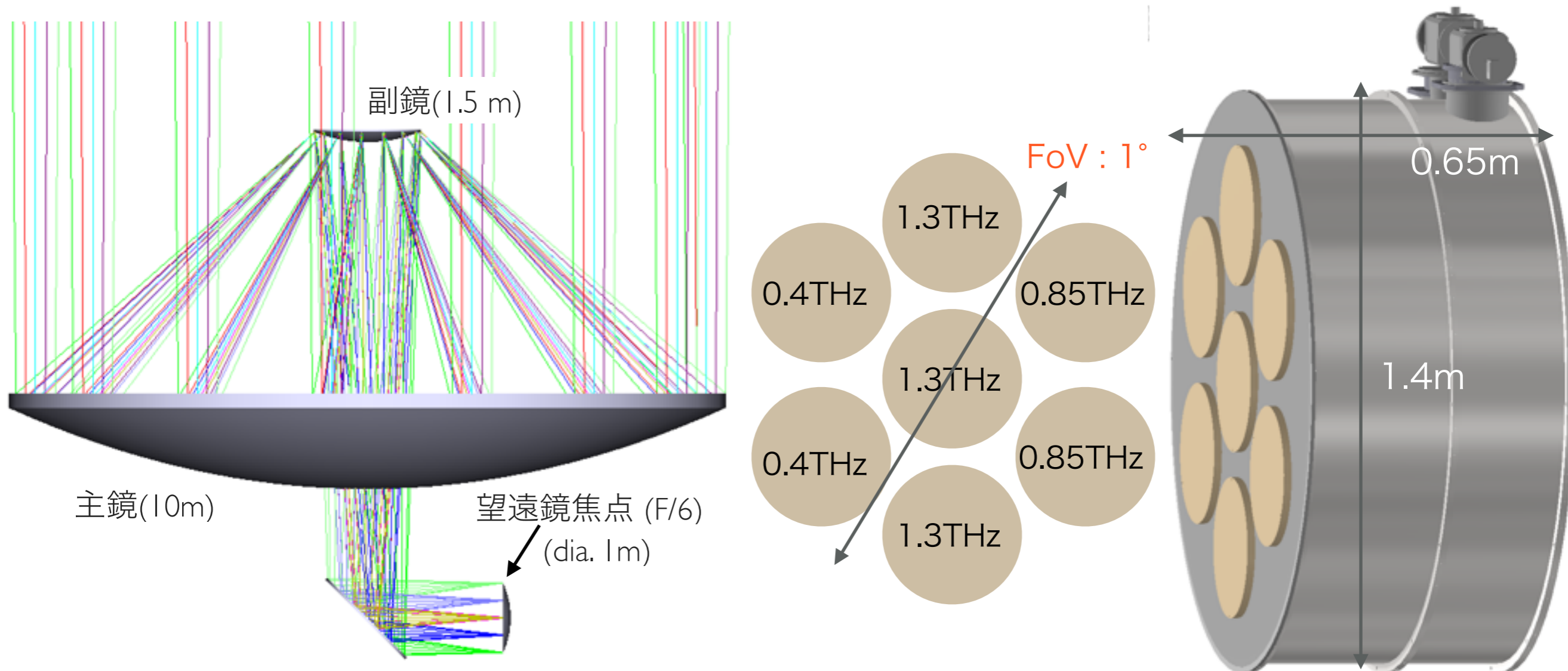


- 屈折率が高いSi等のレンズを用いることで冷却部をコンパクトにできる
- 低温での反射防止対策が必要

# 10mカメラ：クライオスタット

## \* 光学一構造設計

- 1°の視野を7モジュールに分割
- 直径1 mのF/6焦点の先に配置
- Siレンズ2枚を用いたシンプルな冷却光学系
- 3000 pixels × 7モジュール = ~ 20000 pixelsが目標





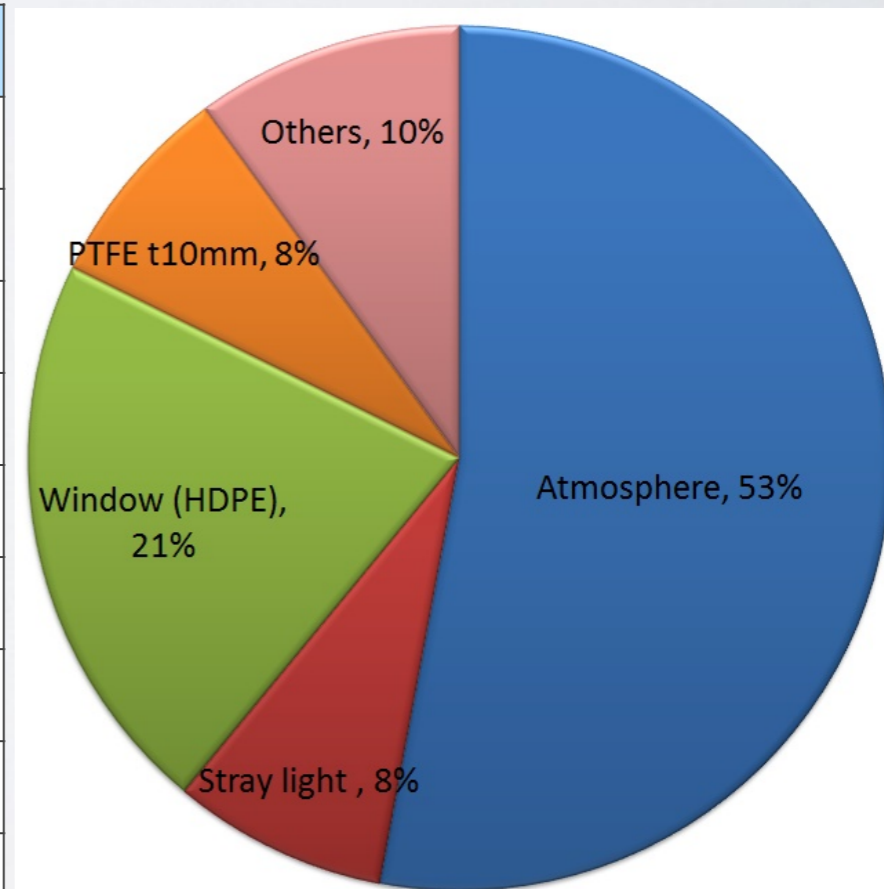
# 10mカメラ：クライオスタット

## \* 熱設計

Sekiguchi, D-thesis (Univ. of Tokyo), 2017

- GM冷凍機1台で4 Kまで冷却
  - 冷却能力：30 W@40 K
  - 冷却能力：1.5 W@1.5 K
- 4 K以下は希釈冷凍機で0.1 Kまで冷却
- Loading : 大気からのloadingが支配的

Stage	40K	4K	1K	0.1K
	W	mW	mW	uW
Shield	5.8	48	0.003	0.004
Conduction	3.4	320	0.31	0.3
Dissipation		280		
Dilution	5	500		
Window	3.2	30	0.015	2.4
Total	17.4	1178	0.33	2.7
Capacity	30	1500	1	20
Margin	42%	21%	67%	86%

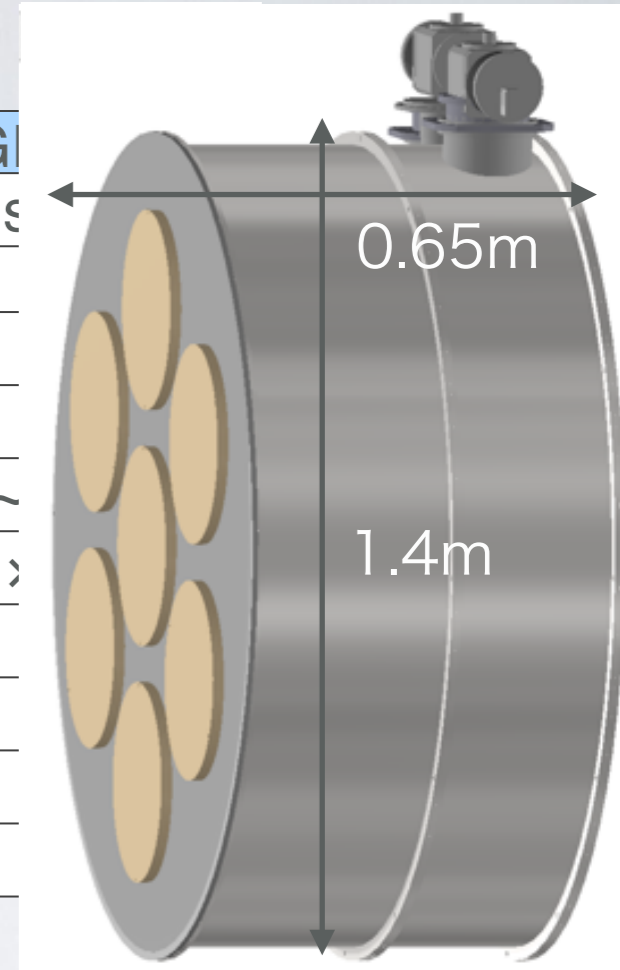




# 感度予想

## \* 10 m 望遠鏡

	400 GHz	850 GHz
coupling	Lens	Lens
No. of module	2	
total beam	1800	
bandwidth [GHz]	40	
detector sensitivity (NEP [W/Hz <sup>0.5</sup> ], Trx	10 <sup>-18</sup> , ~ 0.3 K	10 <sup>-18</sup> , ~
photon noise NEP [W/Hz <sup>0.5</sup> ]	4.3 × 10 <sup>-16</sup>	5.5 × 10 <sup>-16</sup>
single beam NEFD [mJy · Hz <sup>0.5</sup> ]	41.8	
Sensitivity (5σ, Tint = 1h) [mJy/beam]	3.48	
Sensitivity (5σ, Tint = 10h) [mJy/beam]	1.10	
confusion limit [mJy/beam]	~ 2	



## \* 30 m 望遠鏡

周波数帯	感 度 (5σ rms) (τ = 積分時間)				角分 解能	素子数	Mapping speed [deg <sup>2</sup> hr <sup>-1</sup> mJy <sup>-2</sup> ]
	τ = 60sec	1 hour	10 hours	confusion			
350GHz	0.80mJy	0.10mJy	0.033mJy	0.22 mJy	7.1"	4800 × 2	44 × 2
400	1.12	0.15	0.046	0.20	6.2"	6300 × 2	22 × 2
650	1.68	0.22	0.069	0.052	3.8"	16600 × 3	9.8 × 3
850	2.45	0.32	0.10	0.011	2.9"	27000 × 2	4.4 × 2
1300	13.6	1.76	0.56	0.00035	1.9"	10800 × 2	0.024 × 2 (注 3)
1500	46.4	5.99	1.89	0.00009	1.7"	14400 × 3	0.0022 × 3 (同)

# Key Technologies

広視野観測を実現する多素子カメラを開発する

## \* 重要となる開発技術

(1) 多素子の効率的な読み出し、高い歩留まりを実現する検出器

- Microwave Kinetic Inductance Detector

(2) 限られた焦点面に多素子を効率良く配置

- 誘電体レンズアレイ／ホーンアレイの開発

(3) 誘電体レンズを用いたコンパクトな冷却光学系

- 屈折率の高い誘電体を利用する ( Si : ~ 3.4, HDPE ~ 1.5 )
- 低温でも使用可能な反射防止コーティングの開発
- 0.1 Kへの冷却

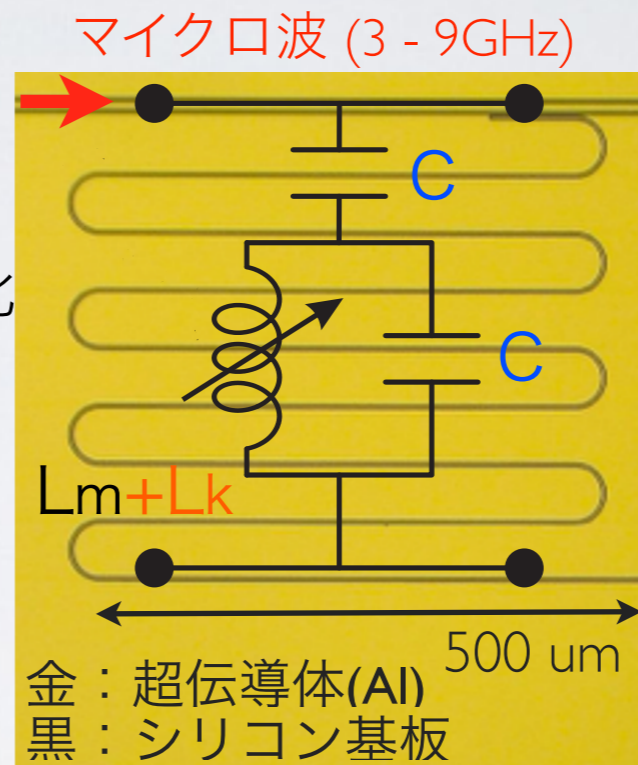
# Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)

## \* MKIDの動作原理

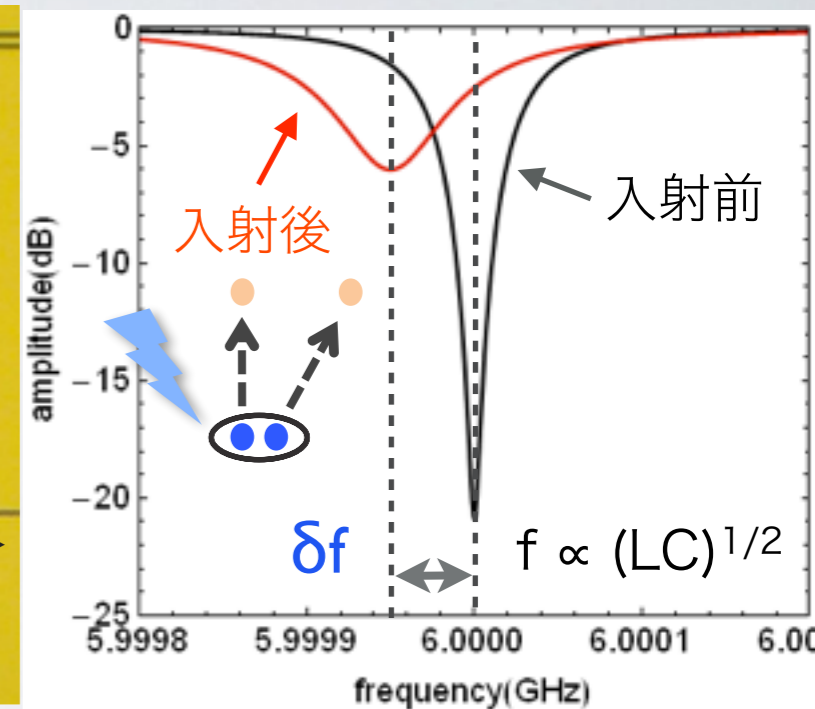
- ・ マイクロ波帯で動作する超伝導共振器
- ・ 入射光子によりクーパ対が解離
  - 超伝導に由来する力学インダクタンスが変化
  - 共振周波数 ( $f_0$ ) が変化
  - $f_0$  の変化量 = 入射光子の強度に対応

超伝導ギャップエネルギー以上の光子を検出

ex ) Al : > 90 GHz

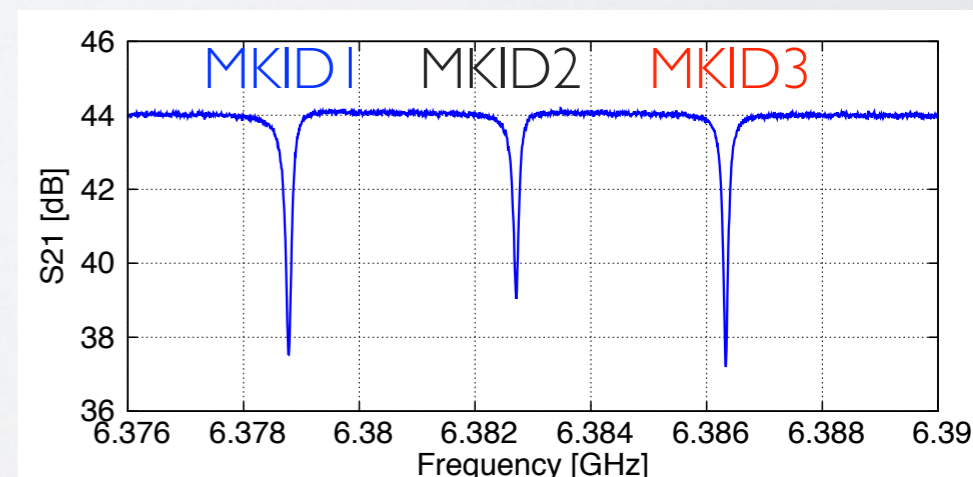


Day et al., Nature, 2003



## \* MKIDの利点

- ・ 共振器の長さをわずかに変えることで共振周波数が変化し、周波数方向に多重化が可能
- ・ 1つのアンプで1000素子程度を読み出せる → 他の超伝導検出器にはない特徴





# Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)

Day et al., Nature, 2003

## \* 高感度検出器

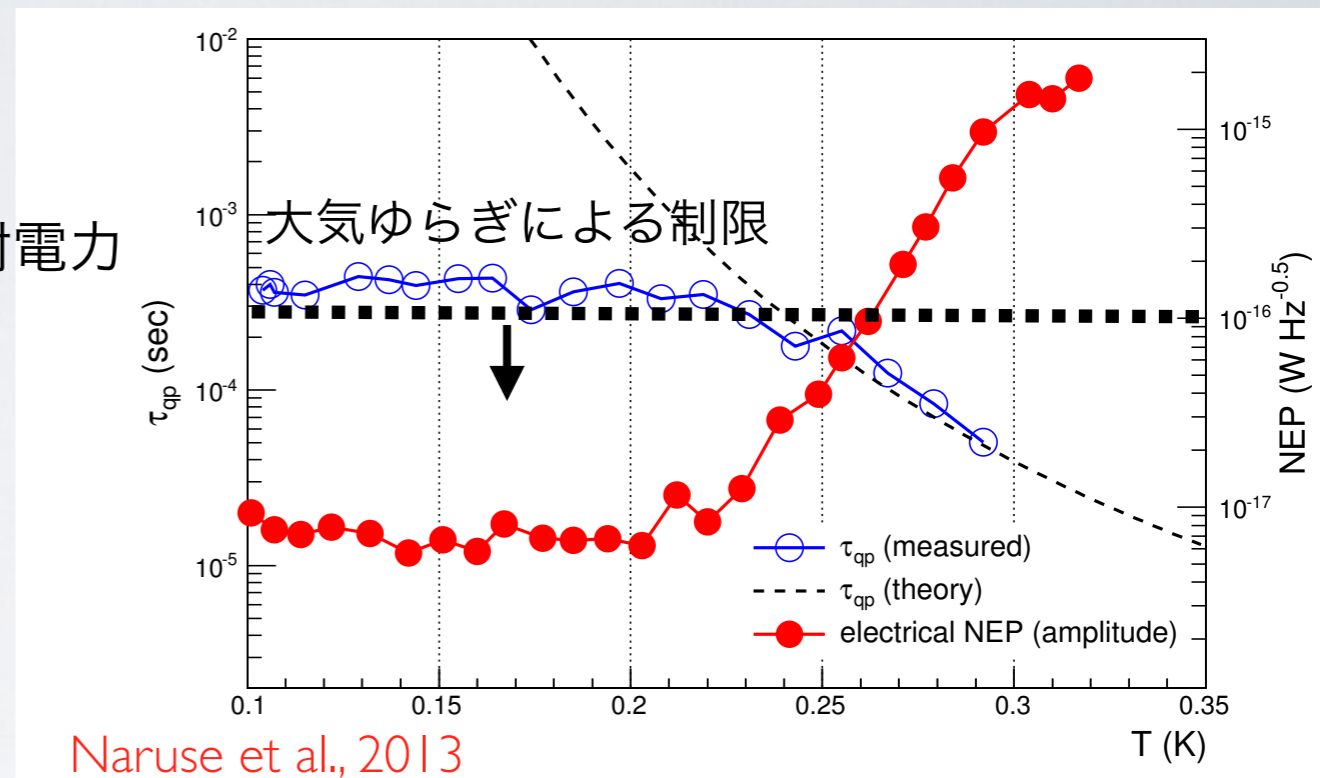
▶ 感度を表す指標 : 雑音等価電力 (NEP)

雑音帯域 1 Hz で信号対雑音比 (S/N) が 1 となる入射電力

• electrical NEP :  $6 \times 10^{-18}$  [W/Hz<sup>1/2</sup>]

雑音を温度換算 :  $T_{rx} \sim 1$  [K]

高感度検出のためには、 $T < 0.2$  K が必要



## \* 高いダイナミックレンジ

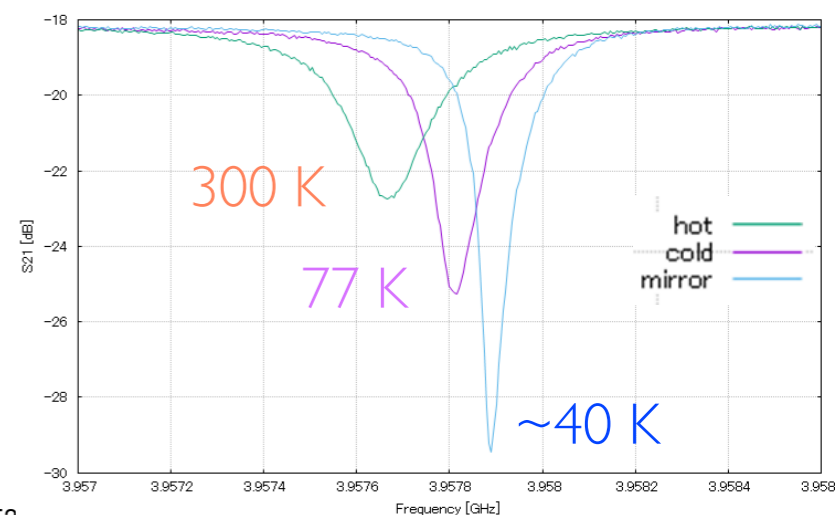
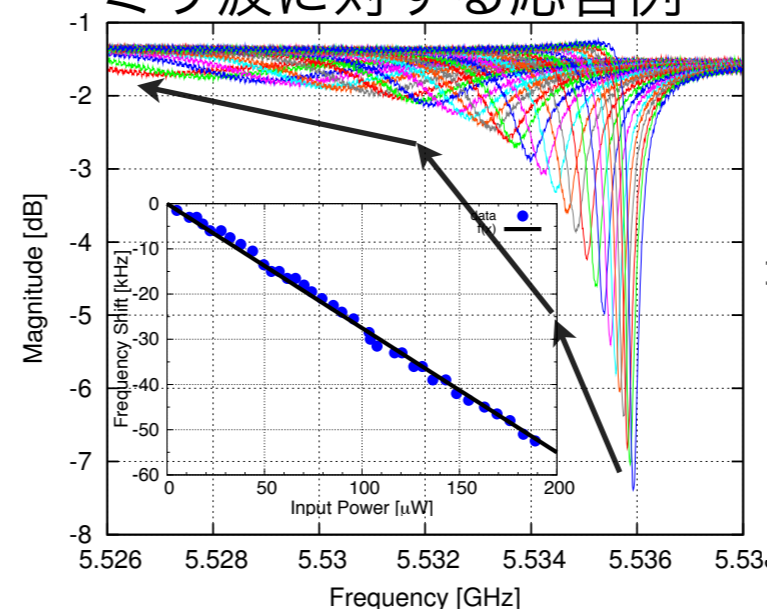
• ダイナミックレンジが高い

:  $> 10^5$

• 300 K load でもサチュレーションしない

→ hot load を用いた強度較正が可能

### ミリ波に対する応答例

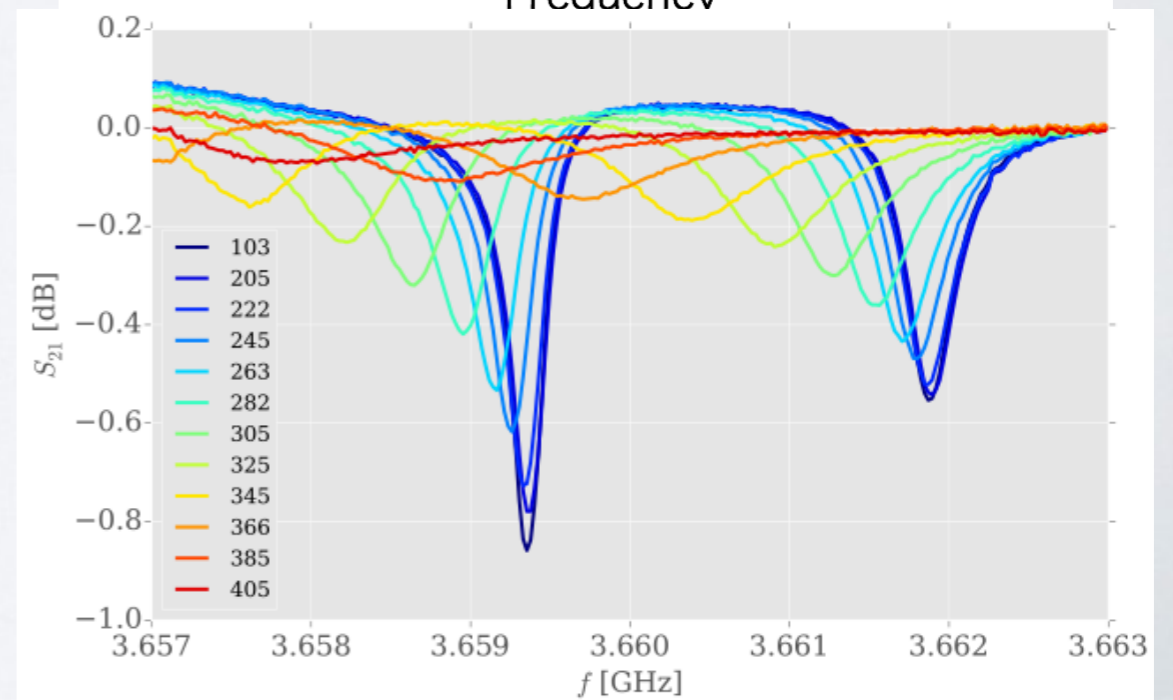
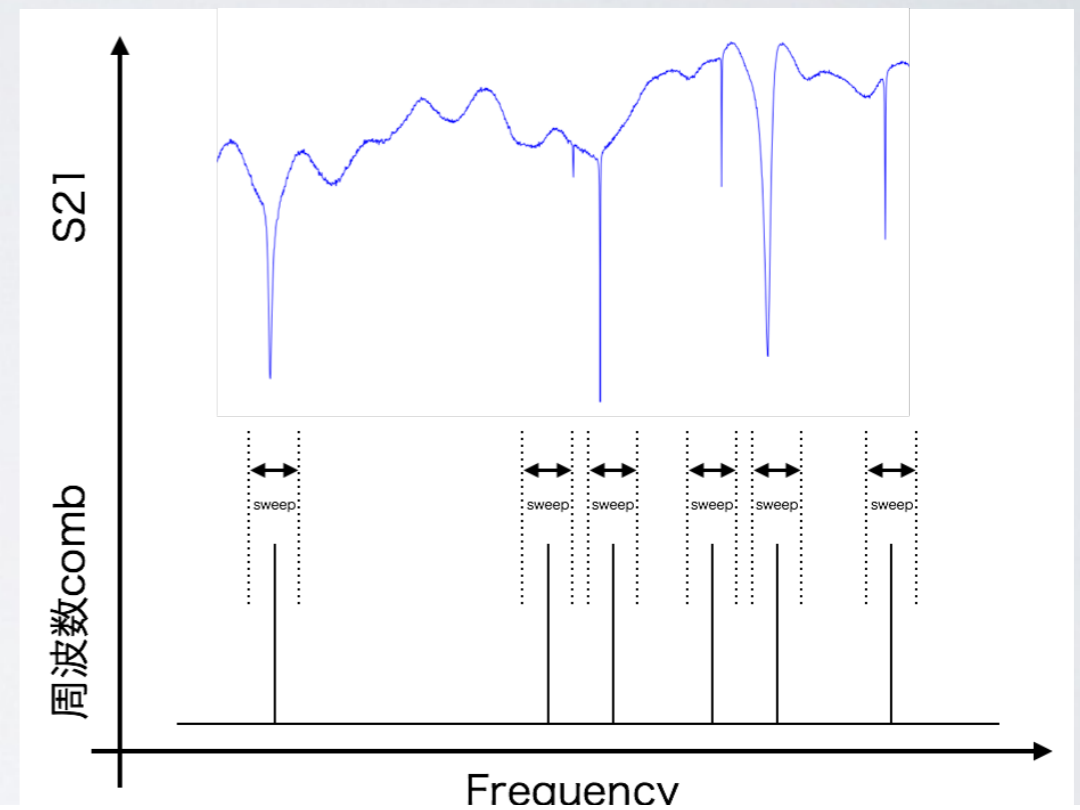
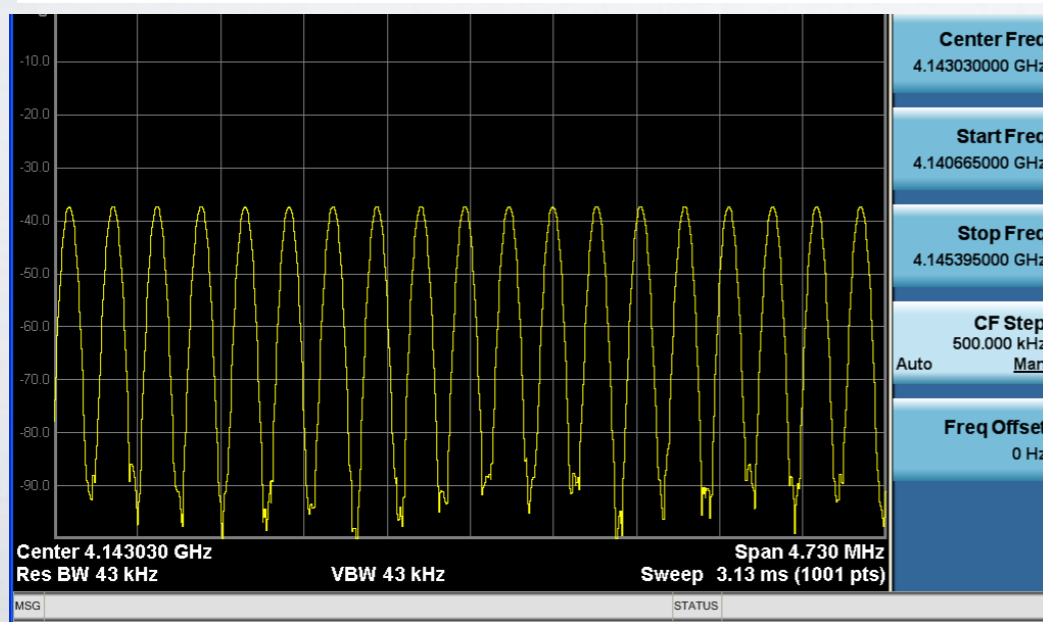
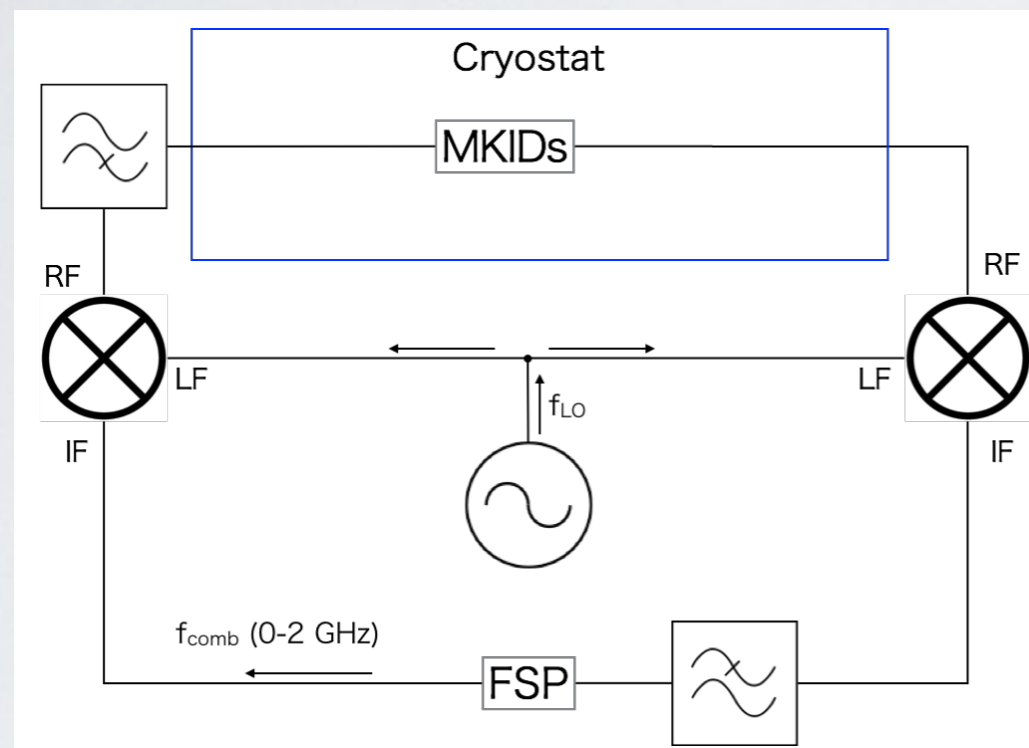


入力パワーを増加 = 共振周波数がシフト

# MKIDの読み出し

Kiuchi et al., IEEE TST, 2015  
also developed by M. Nagai

- 各素子を同時に、独立して読み出しを行うことが可能
- 1 GHz の帯域内に周波数 comb 信号を発生し変調・復調することにより、高周波数分解能・広帯域測定が可能

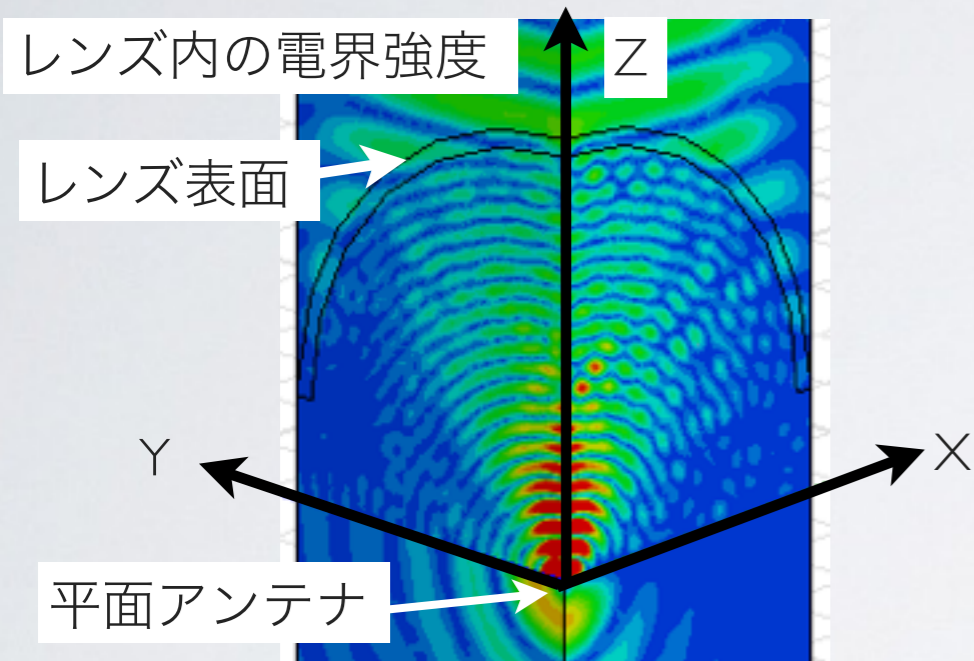




# Lens-coupled MKID

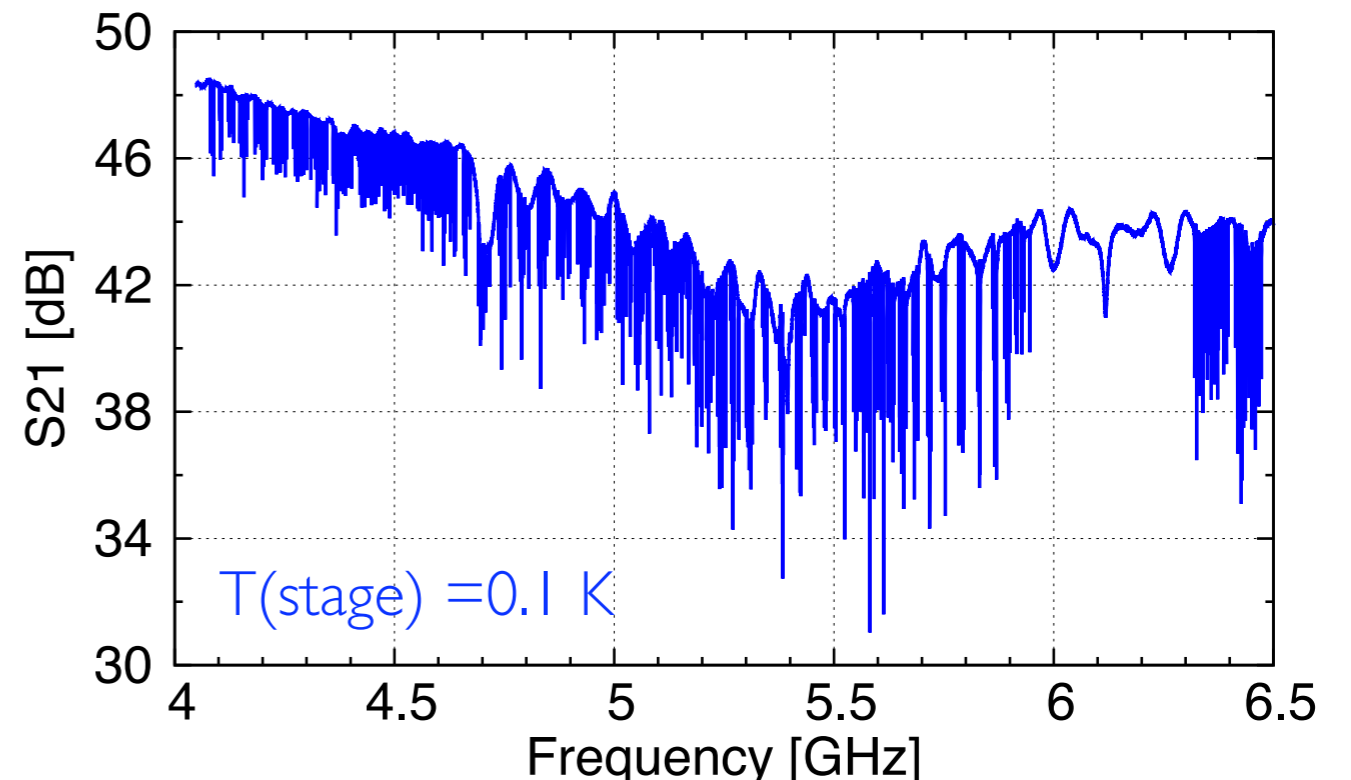
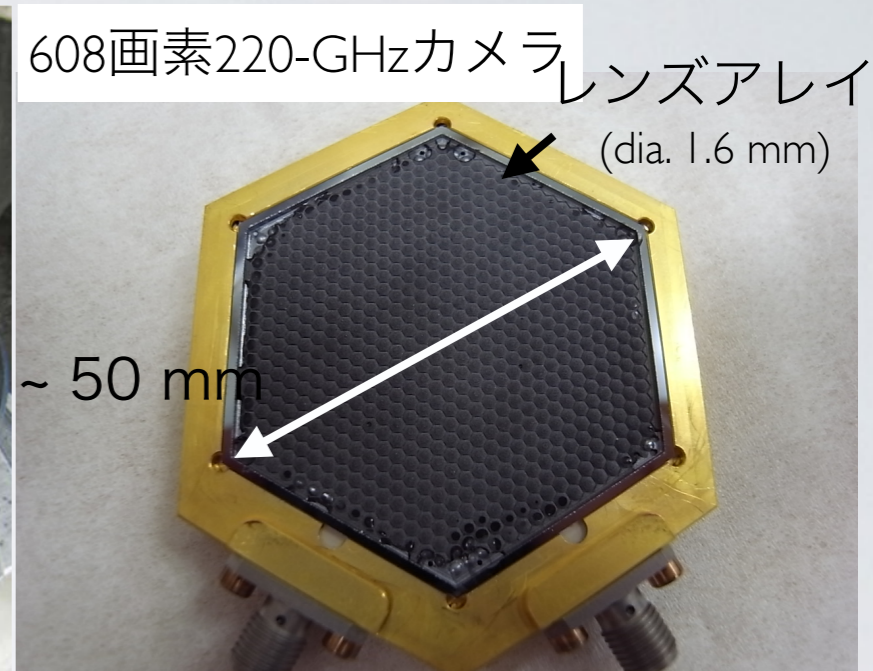
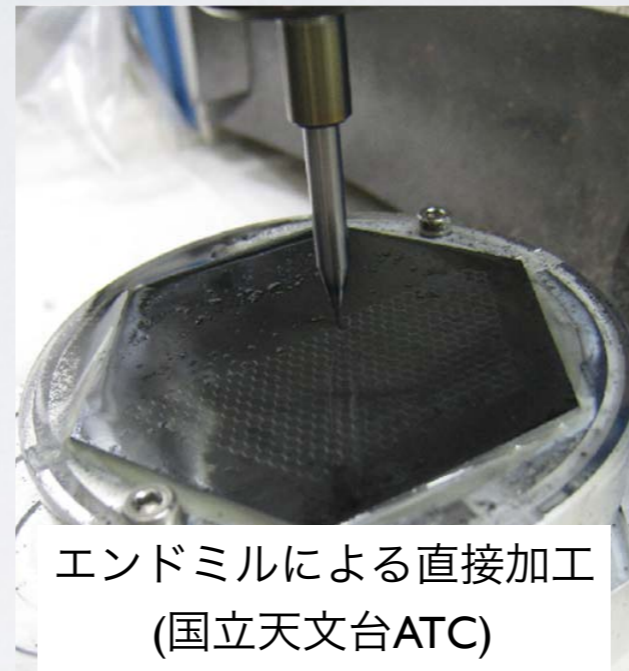
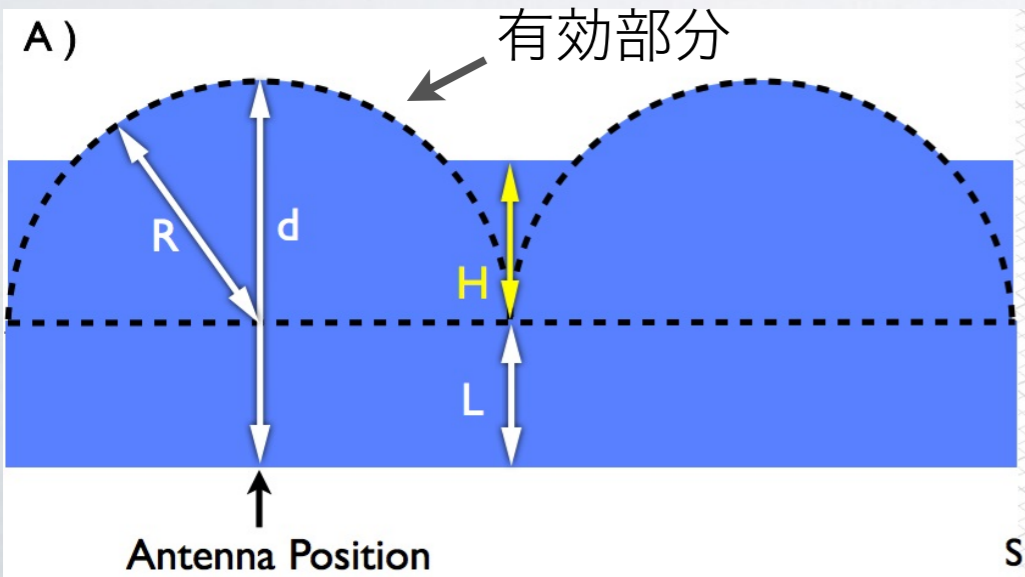
## \* 高い集積度を持つレンズアレイ

→ 望遠鏡焦点面の大きさには制限があるため、集積度の向上が重要



・ 電界が集中するのはレンズ上部

→ レンズの上部のみを使用  
有効部分



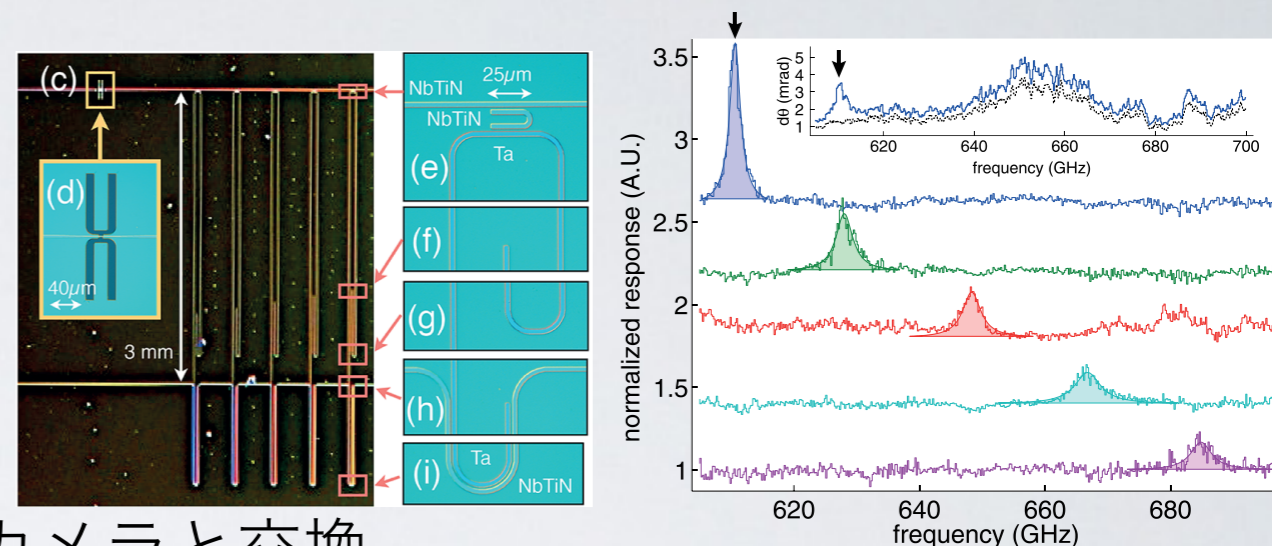
・ 0.4 / 0.85 THz で検討 (レンズ直径~1mm)



# 30 mテラヘルツ望遠鏡に向けて

## \* MKIDを用いた面分光測定

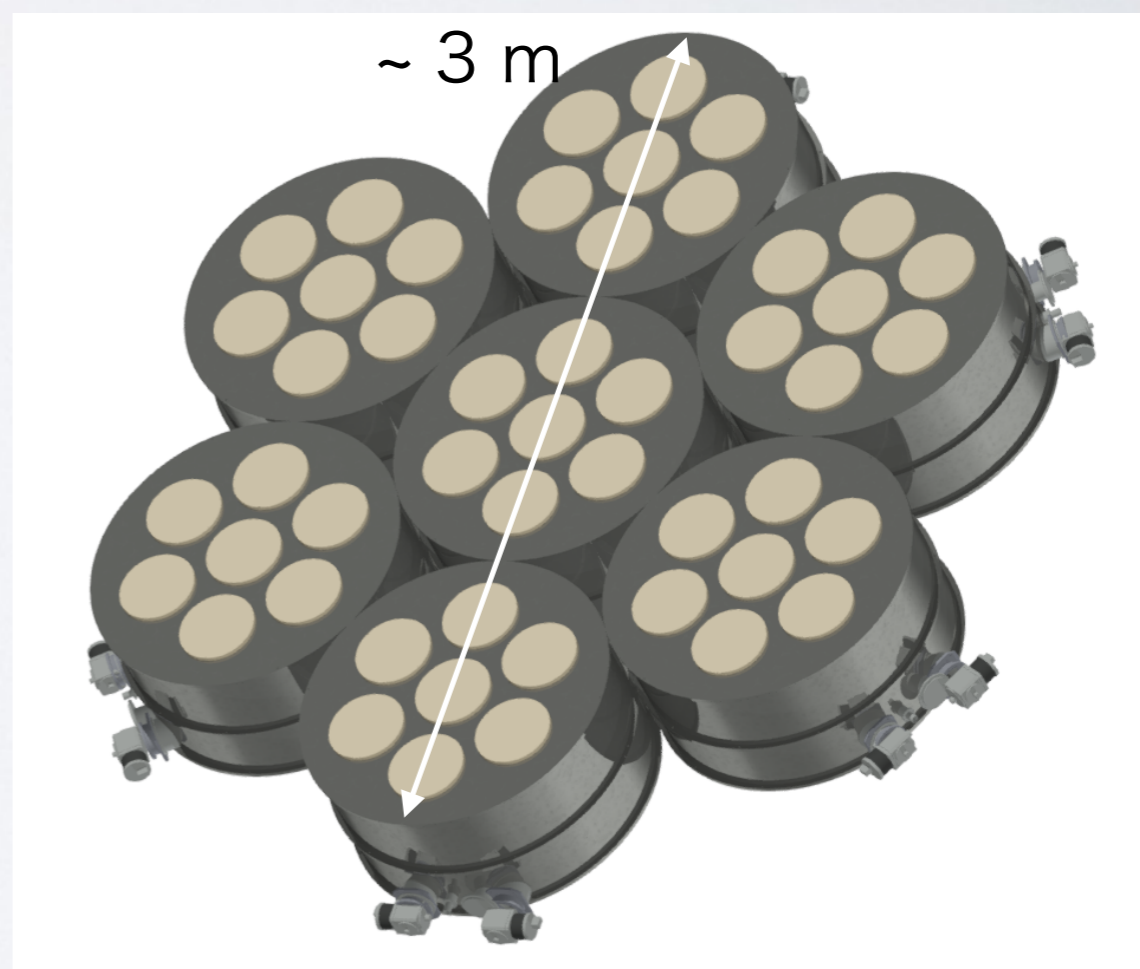
- MKID + narrow band filterを用いた on-chip上での分光
- FTS等比べてコンパクト
- 焦点面に搭載しているイメージング用のカメラと交換
- $R = f_0/\Delta f \sim 1000$



Endo et al., APL, **103**, 032601, 2013

## \* 30m望遠鏡に向けた電波カメラ

- 10 mテラヘルツ望遠鏡の焦点面
  - F/6 focus (dia.  $\sim 1$  m)
- 30 mテラヘルツ望遠鏡の焦点面
  - 同じF値の場合、焦点面面積は約3 m
  - 10m望遠鏡で開発したクライオスタットを更にモジュール化



# まとめ

## 1. 南極10m望遠鏡搭載に向けた超伝導カメラの開発

- Microwave Kinetic Inductance Detector
- シリコンレンズをもちた屈折式光学系
- レンズアレイ & ホーンアレイの開発
- 極低温における反射防止コーティング
- 野辺山45m望遠鏡搭載に向けたMKIDカメラ

## 2. 南極30m望遠鏡に向けて

- MKID + on-chip filterを用いた面分光観測
- 10m望遠鏡用に開発したカメラを更にモジュール化