

超伝導共振器を用いた広視野電波カメラの開発

新田冬夢, 中井直正, 久野成夫, 永井誠, 今田大皓, 山田淑乃, 久松俊輔 (筑波大学)

関本裕太郎, 三ツ井健司, 岡田則夫, Agnes Dominjon, 野口卓, 松尾宏 (国立天文台)

関根正和, 関口繁之, Shibo Shu (東京大学)

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

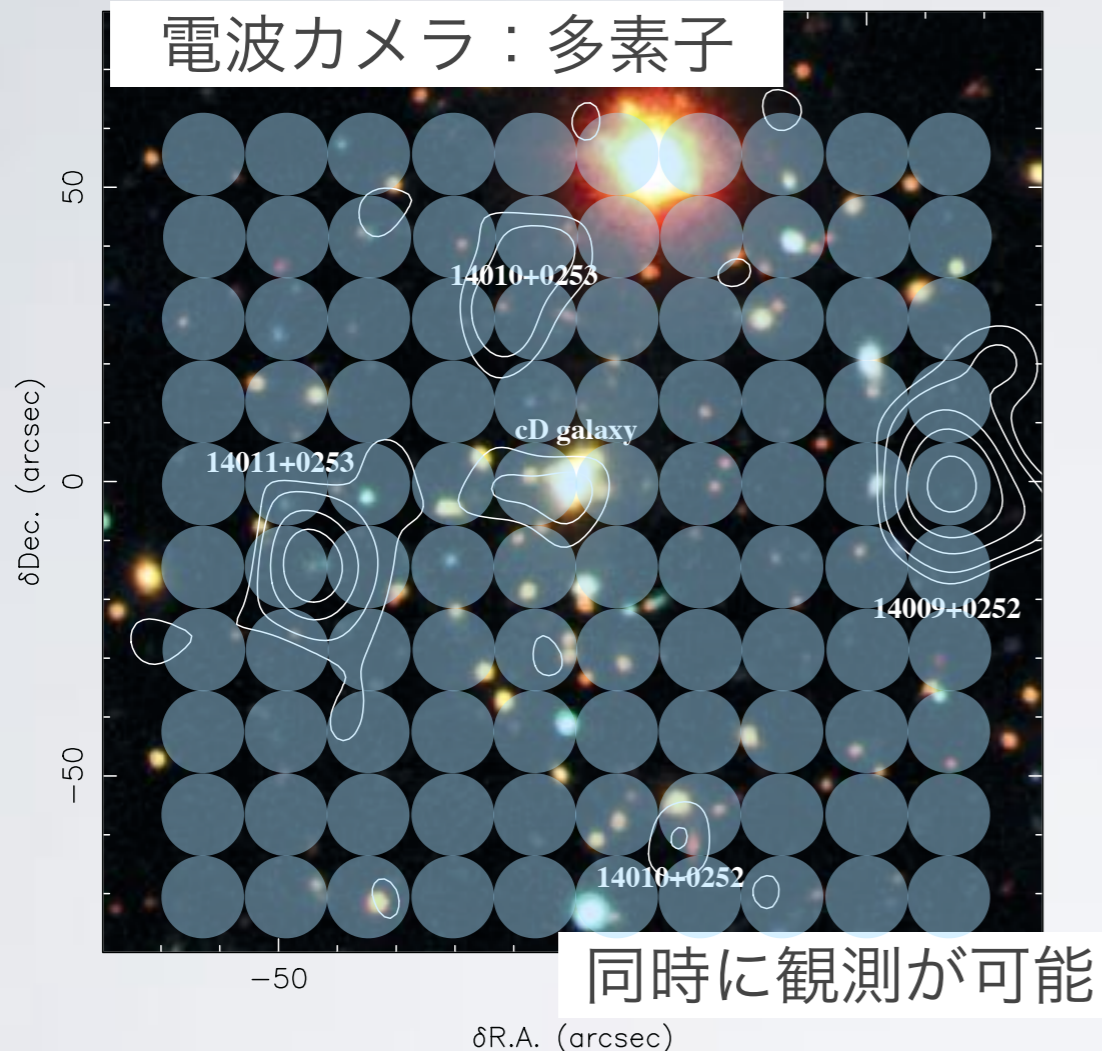
2. 多画素カメラ実現のkey technology

- Microwave Kinetic Inductance Detector
- レンズアレイ & ホーンアレイの開発
- シリコンレンズを用いた冷却光学系
- 極低温における反射防止コーティング
- 0.1 Kへの冷却

3. 南極30m望遠鏡に向けて

4. まとめ

多画素電波カメラの重要性



Blain et al., *Physics Report*, **369**, 111–176, 2002

▶ ALMA, TMT etc

発見した銀河の詳細観測



▶ 遠方宇宙の暗黒銀河の大規模サーベイ観測
→ 多画素電波カメラが必須

▶ 広視野観測

= 広視野大口径望遠鏡 + 多画素電波カメラ

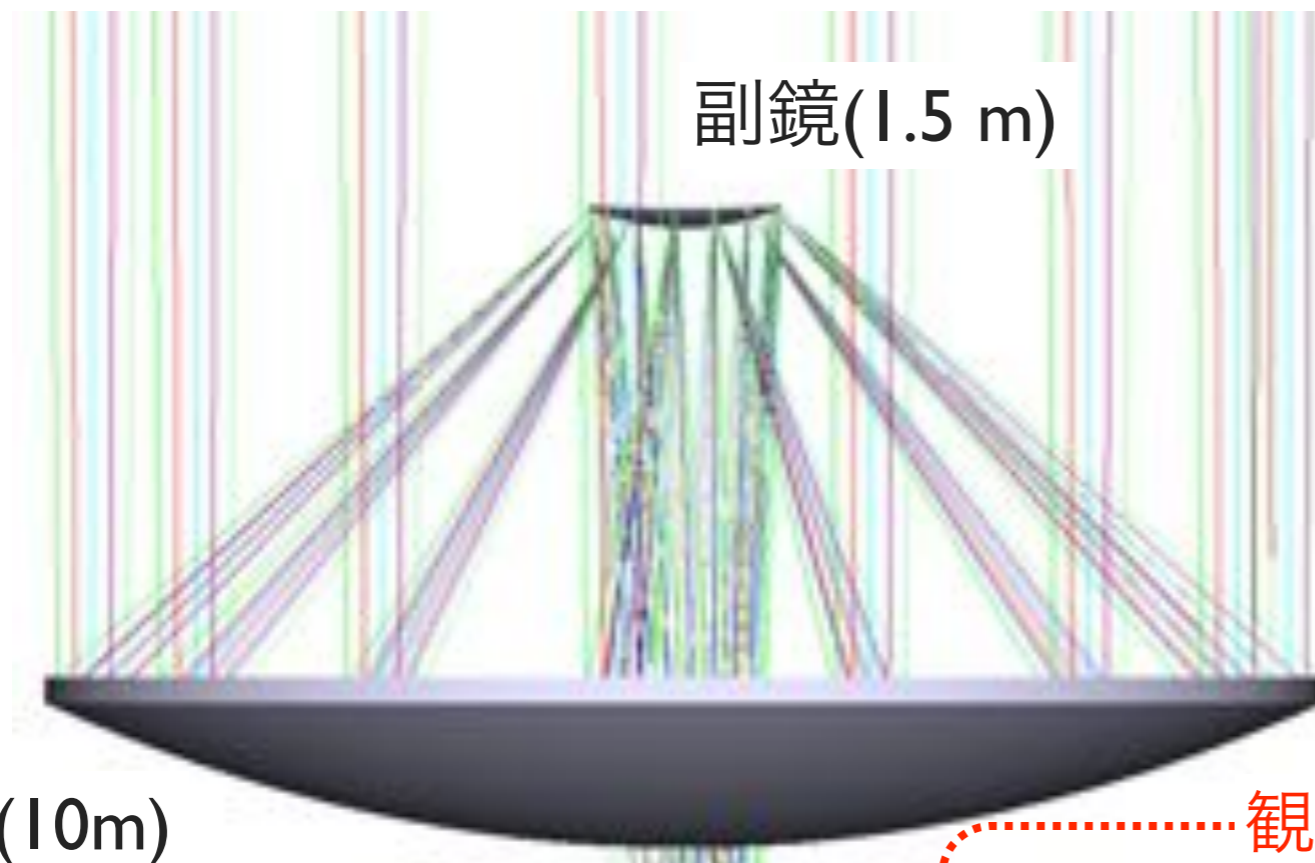
南極10m望遠鏡：全体光学系

▶ 視野： 1° @ F/6 focus

→ 広域サーベイ観測

▶ 観測周波数

・ 400 / 850 / 1300 GHz



	400 GHz	850 GHz	1300 GHz
HPBW	18.6"	8.7"	5.8"

Optics design : H. Imada

観測装置：カメラシステム

ヘテロダイン受信機

望遠鏡焦点 (F/6)

(dia. 1m)

冷却光学系
($T < 4K$)

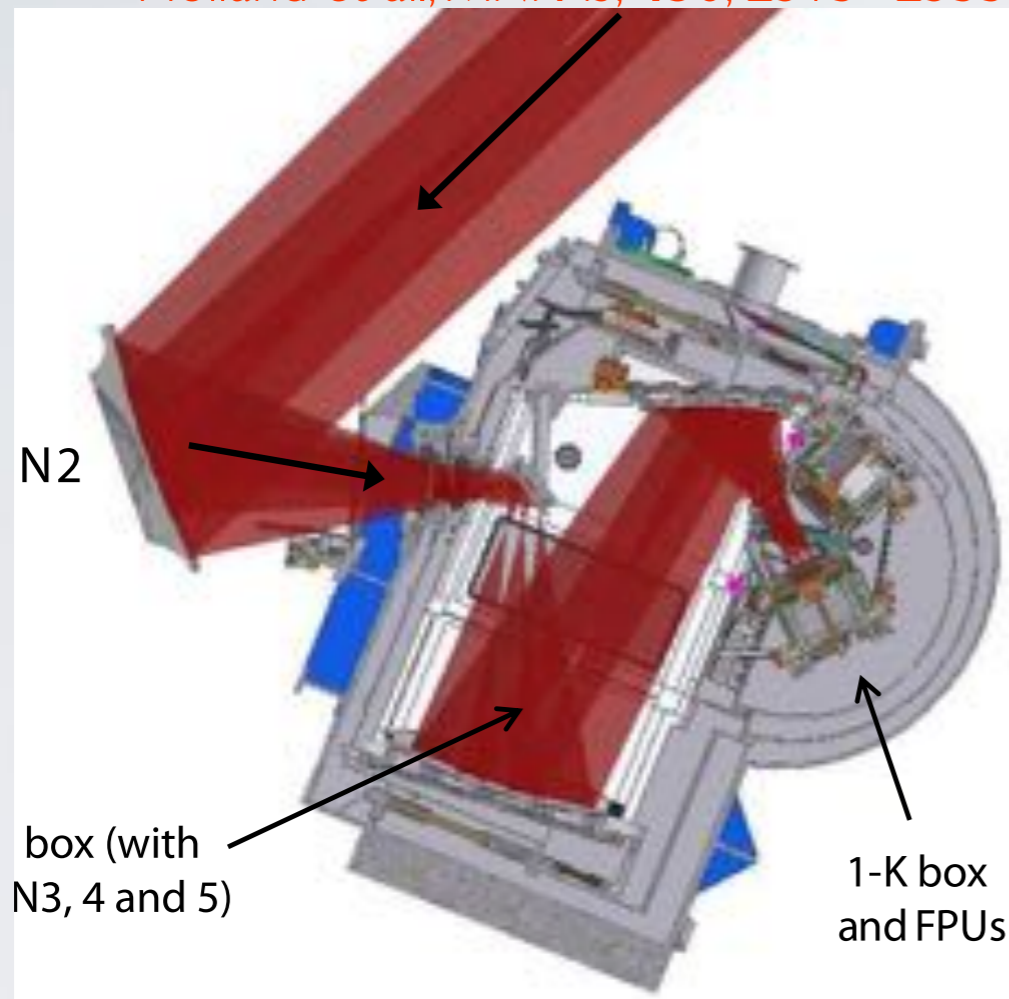
電波カメラ
($T < 0.2K$)

信号の伝送 → 集光系 → 検出器
ミラー or レンズ 信号の結合

カメラシステムの伝送光学系

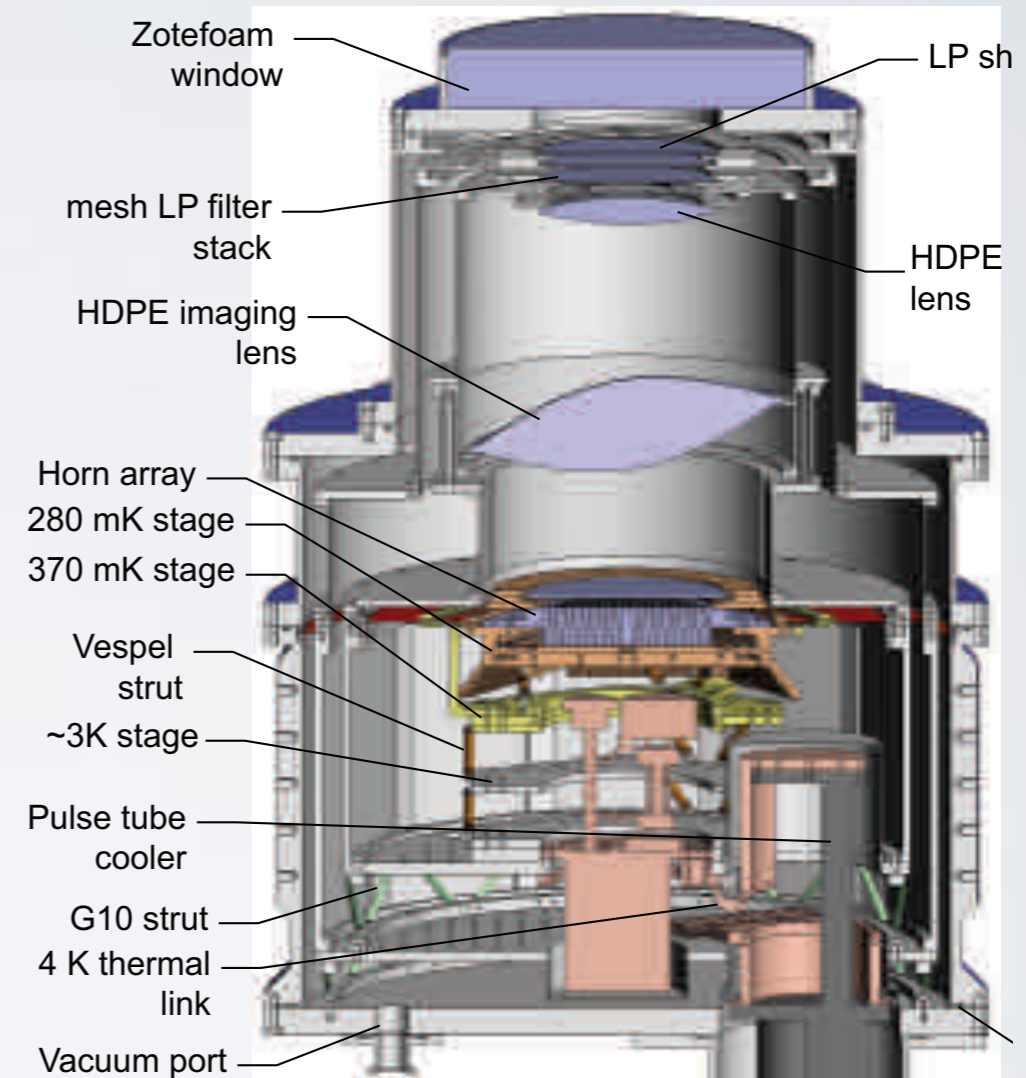
- * ミラーによる反射系 (e.g. SCUBA-2) * レンズによる屈折系 (e.g. APEX-SZ)

Holland et al., *MNRAS*, **430**, 2513–2533, 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

Schwan et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **82**, 091301, 2011



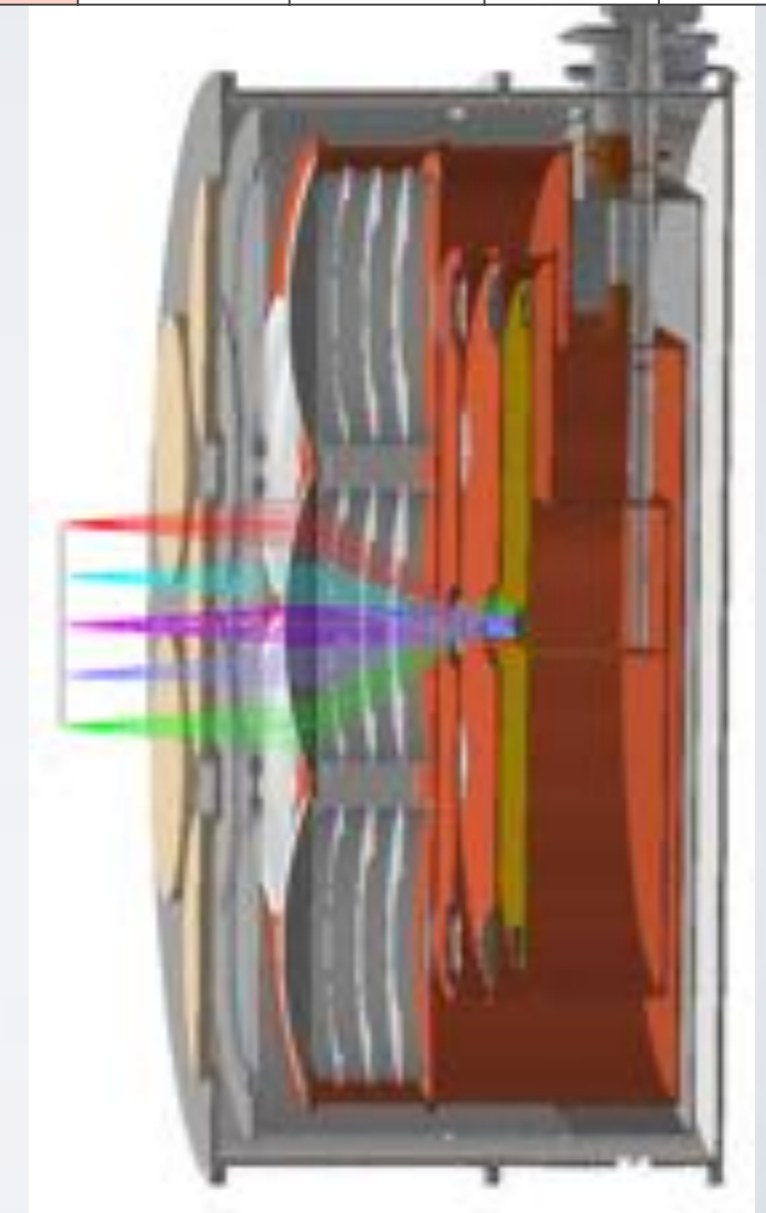
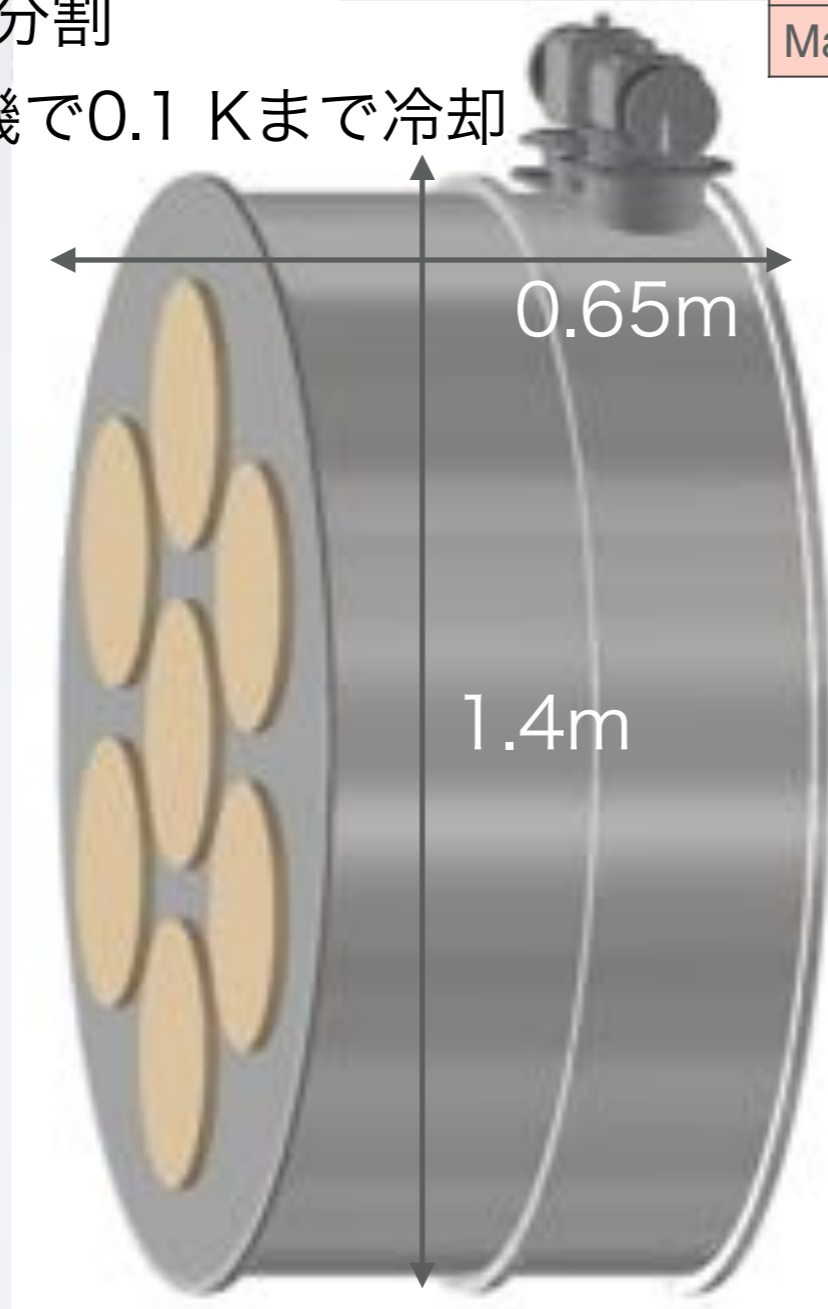
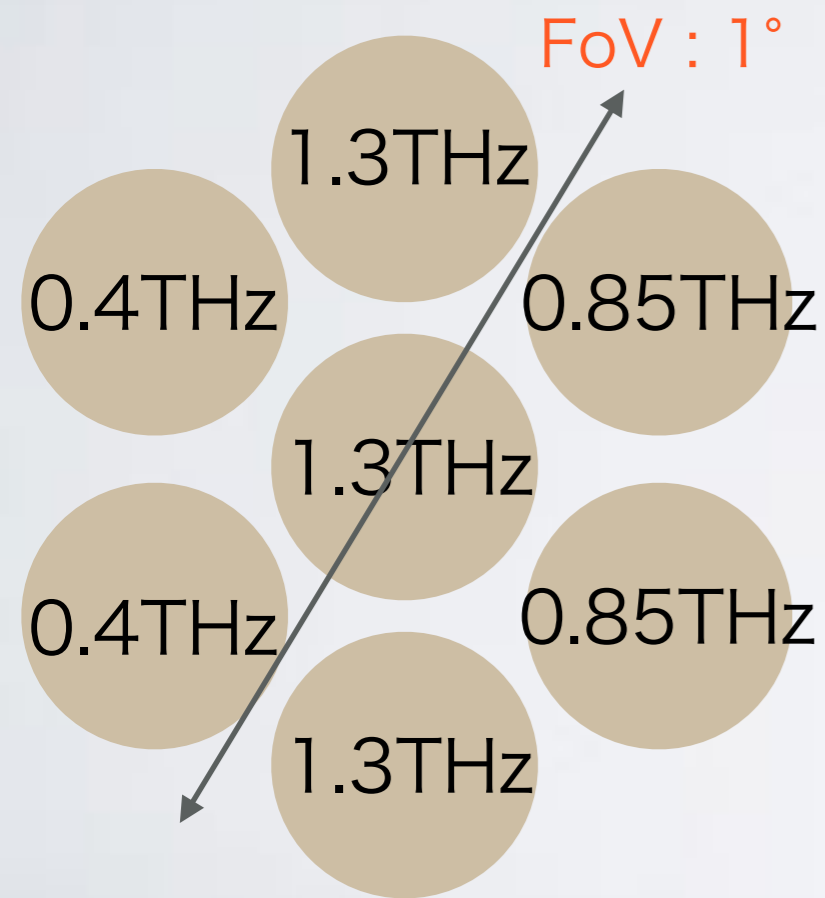
- 屈折率が高いSi等のレンズを用いることで冷却部をコンパクトにできる
- 低温での反射防止対策が必要

光学 / 熱 / 構造設計

Stage	65K	4K	1K	0.1K
	W	mW	mW	uW
Radiation	28.3	410	0.2	1
Conduction	6	100	0.3	3
Dissipation		160		
Dilution	5	500		
Window	44.8	711.3	0.0	7
Total	84.1	1882	0.5	11
Capacity	100	2400	1	20
Margin	16%	22%	46%	45%

光学—熱—構造設計

- 誘電体(Si)レンズを2枚用いたシンプルな冷却光学系
- 1°の視野を7モジュールに分割
- GM冷凍機2台+希釈冷凍機で0.1 Kまで冷却



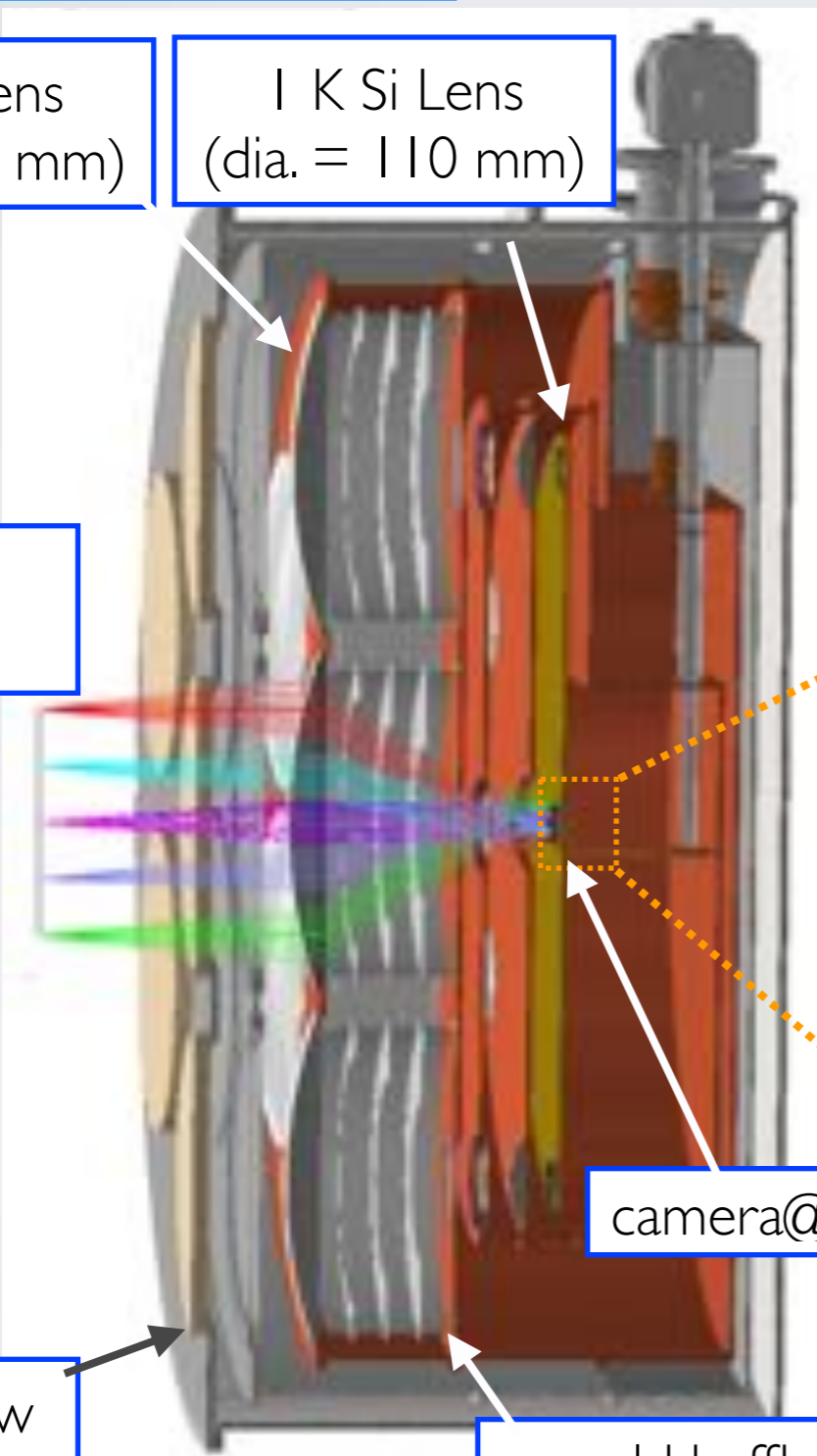
焦点面アレイ

光学—熱—構造設計

4 K Si Lens
(dia. = 400 mm)

1 K Si Lens
(dia. = 110 mm)

telescope
focus@F/6



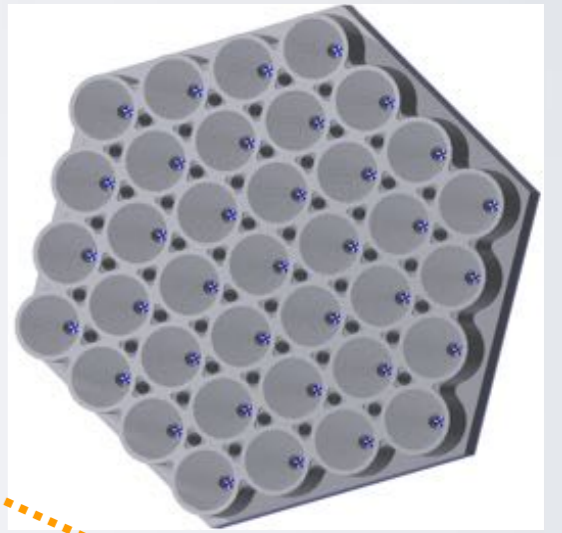
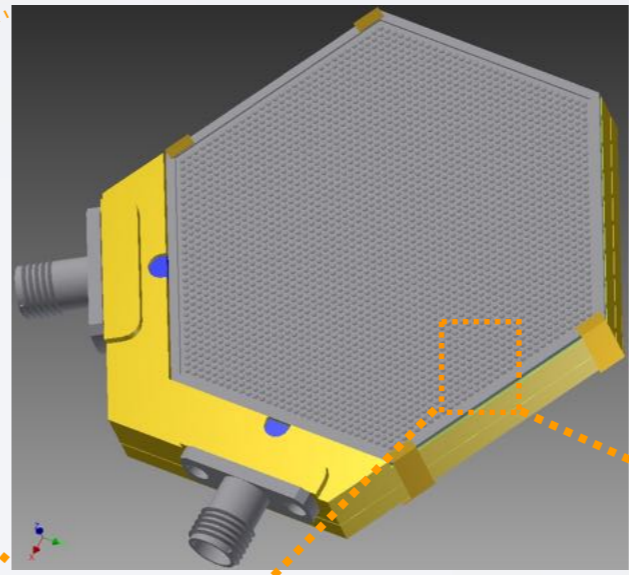
HDPE window
(dia. = 340 mm)

cold baffle

超伝導カメラ

レンズアレイ
(0.4 & 0.85 THz)

ホーンアレイ
(1.3 THz)



camera@F/1 focus



MKID Array

感度予想

	400 GHz	850 GHz	1300 GHz
coupling	Lens	Lens	Horn
No. of module	2	2	3
total beam	1800	5600	9000
Field of View	total : 1 degree		
bandwidth [GHz]	40	85	90
HPBW ["]	18.6	8.7	5.8
sky transparency	0.9	0.8	0.38
cold optics efficiency	0.8	0.65	0.6
detector quantum efficiency	0.6	0.6	0.6
detector sensitivity (NEP [W/Hz ^{0.5}], Trx [K])	10 ⁻¹⁸ , ~ 0.3 K	10 ⁻¹⁸ , ~ 0.3 K	10 ⁻¹⁸ , ~ 0.3 K
photon noise NEP [W/Hz ^{0.5}]	4.3 × 10 ⁻¹⁶	5.5 × 10 ⁻¹⁶	5.5 × 10 ⁻¹⁶
single beam NEFD [mJy · Hz ^{0.5}]	41.8	43.2	137.5
Sensitivity (5σ, Tint = 1h) [mJy/beam]	3.48	3.6	11.5
Sensitivity (5σ, Tint = 10h) [mJy/beam]	1.10	1.14	3.62
confusion limit [mJy/beam]	~ 2	1.45	0.26

- 850 GHz以下：観測限界はconfusion limit
- 850 GHz以上：観測限界は大気雑音

南極観測におけるKey Technology

南極という極限の環境で広視野観測を実現する多画素カメラを開発する

* 重要となる開発技術

(1) 多画素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画素を効率良く配置

- 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

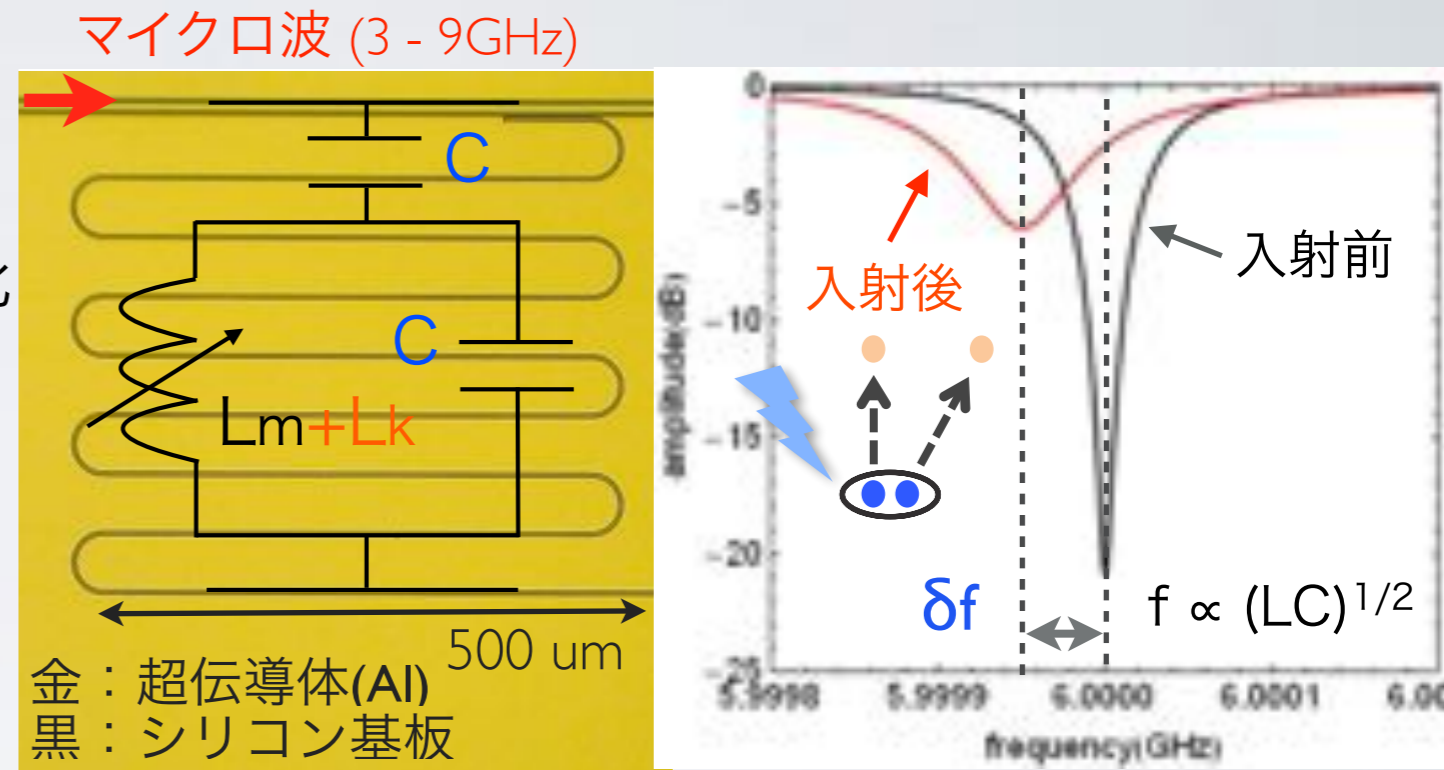
Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)

* 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

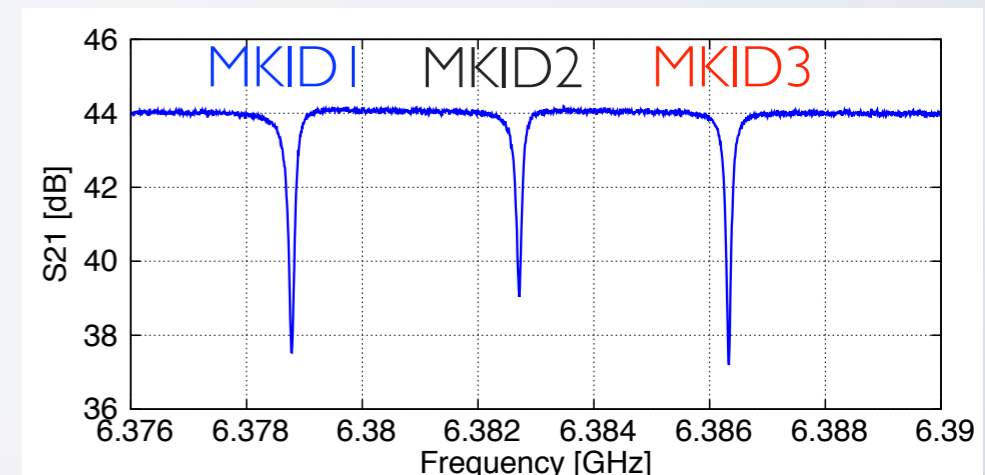
超伝導ギャップエネルギー以上の光子を検出

ex) Al : > 90 GHz



* 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



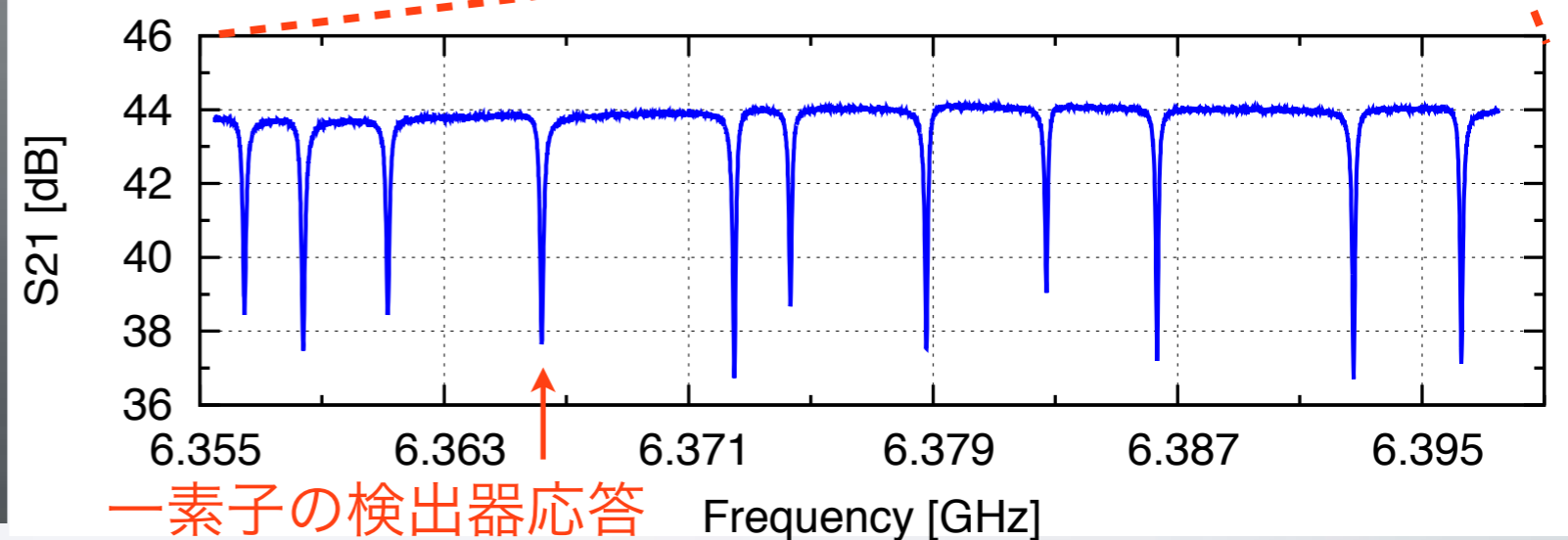
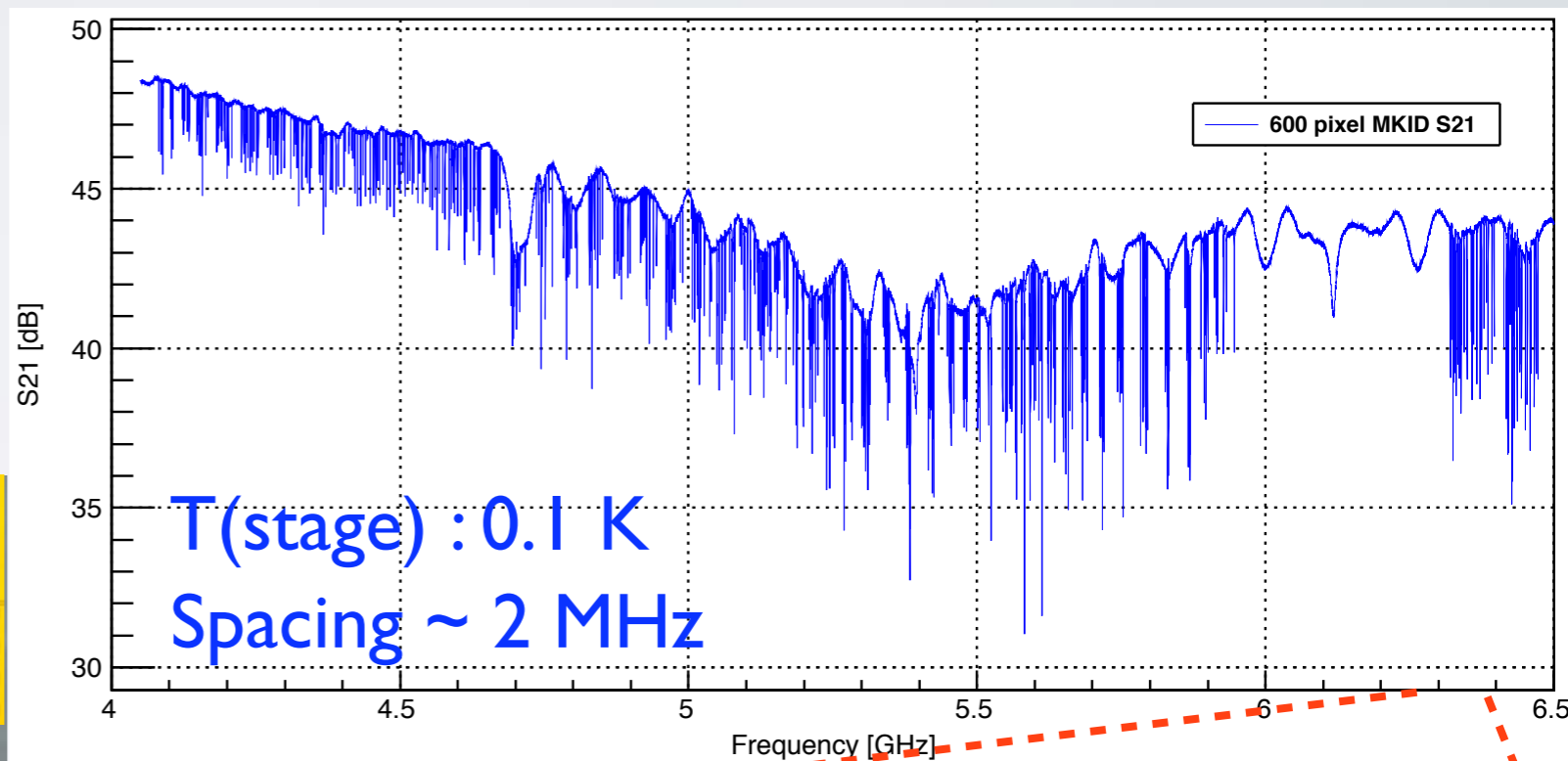
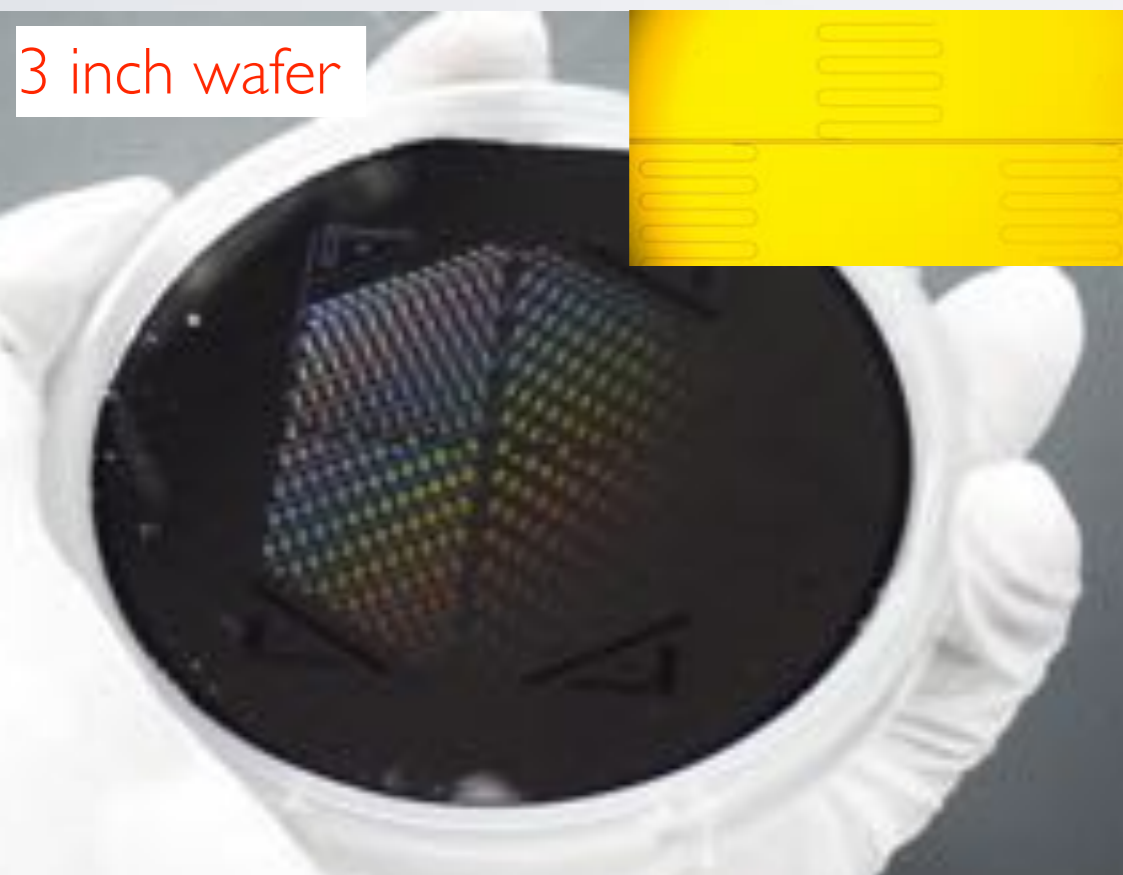
608素子MKIDアレイの評価

- ・ 国立天文台クリーンルームにて素子を製作

* 検出器歩留まり

584 / 608 (~ 96%)

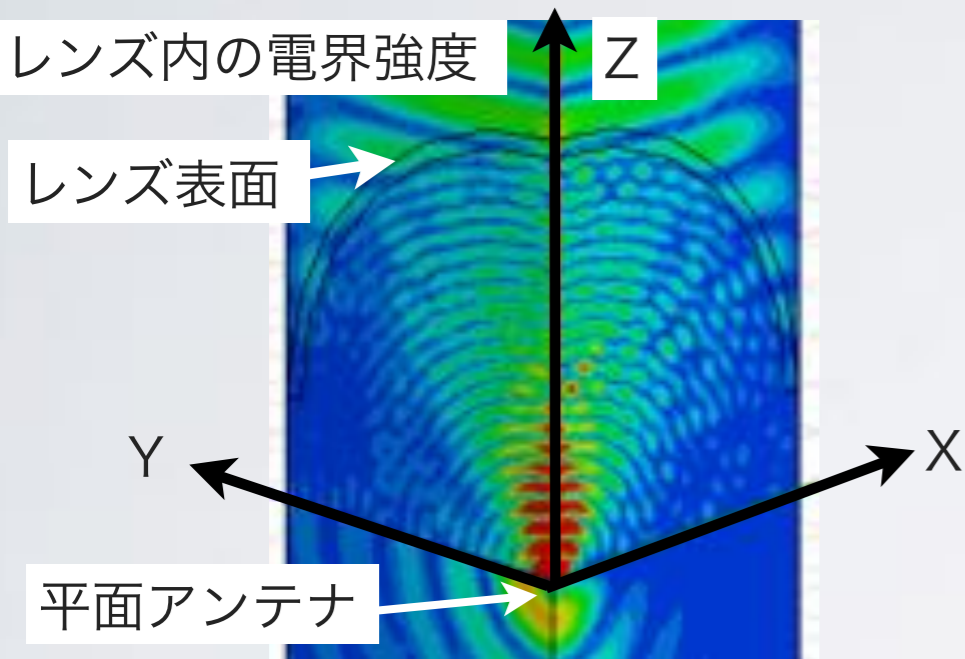
- ほぼ100%の非常に高い歩留まりを達成



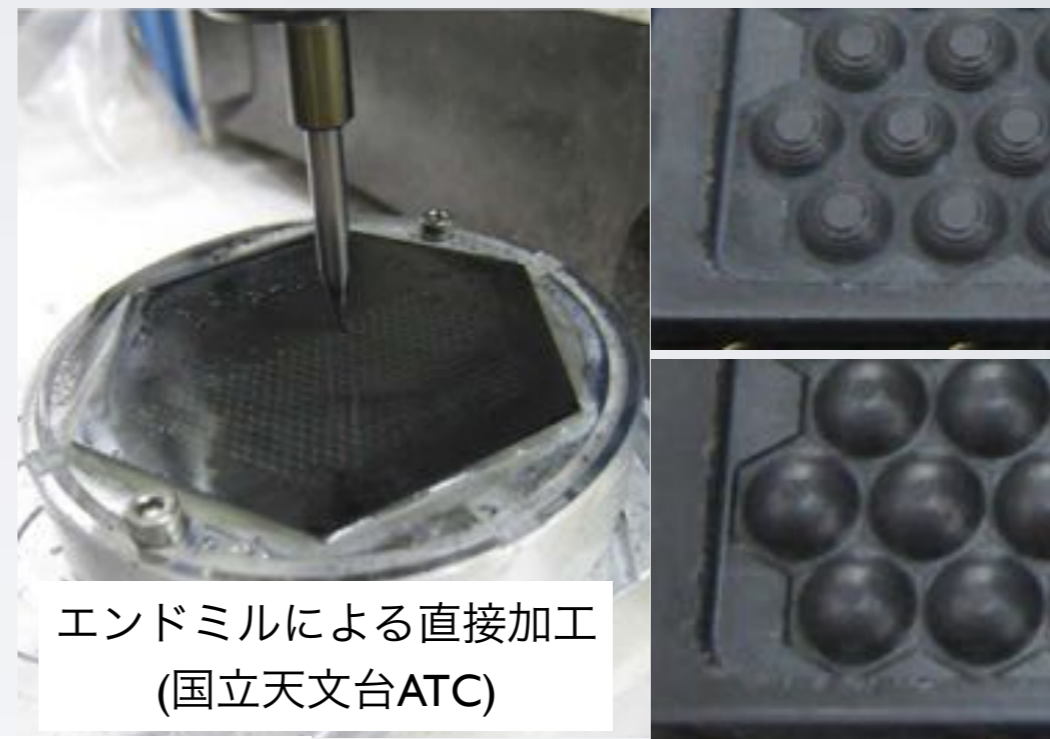
レンズアレイの集積化設計

* 高い集積度を持つレンズアレイ

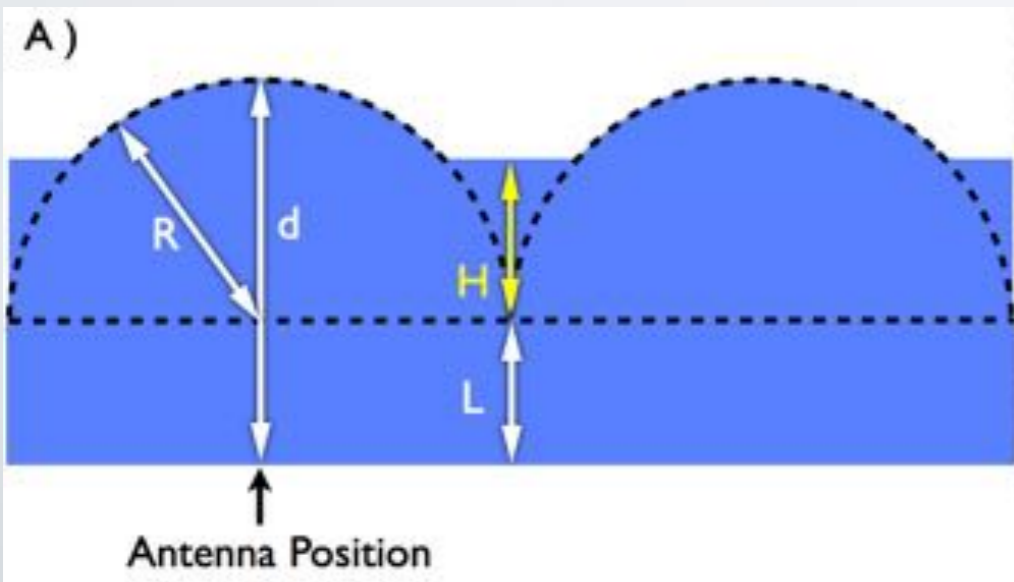
→ 望遠鏡焦点面の大きさには制限があるため、集積度の向上が重要



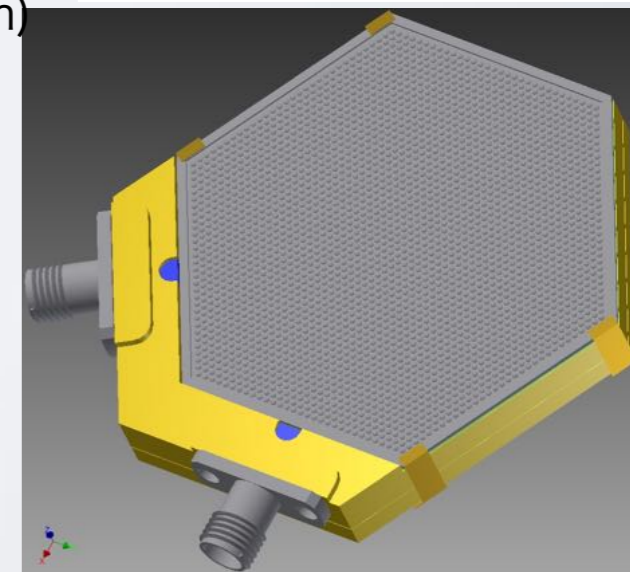
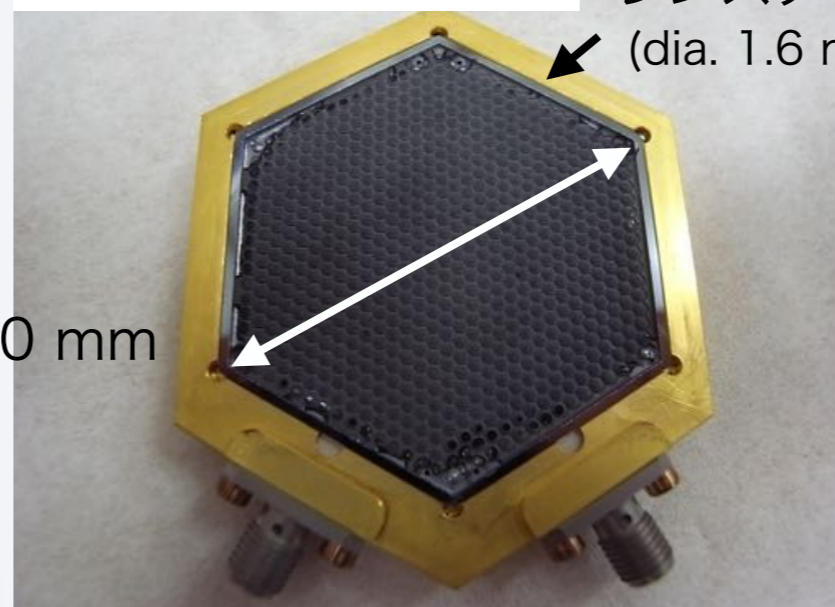
- ・ 電界が集中するのはレンズ上部
- レンズの上部のみを使用



608画素220-GHzカメラ レンズアレイ (dia. 1.6 mm) 850GHz用3000画素へ



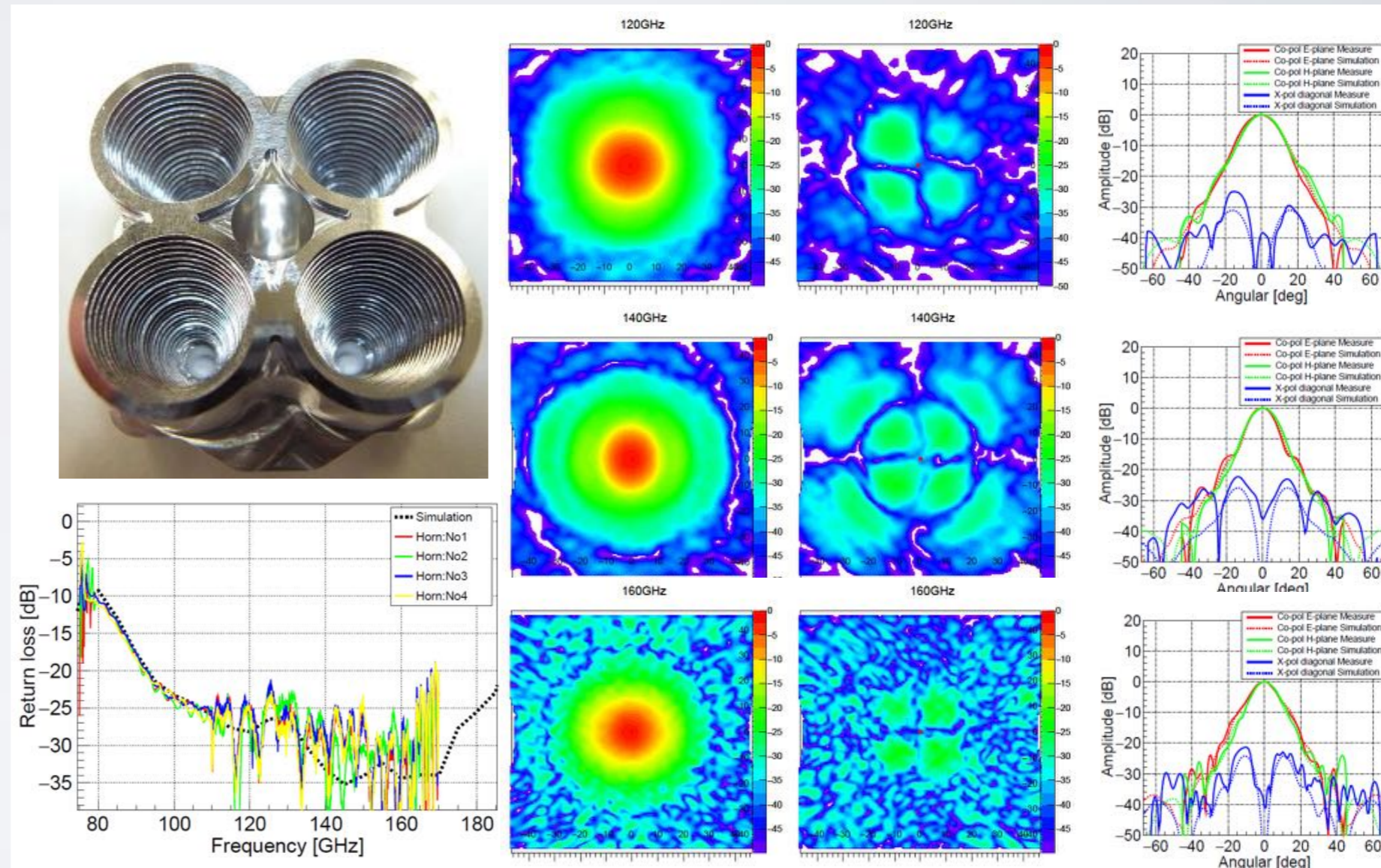
~ 50 mm



ホーンアレイの開発

* 広帯域ホーンアレイ

- コルゲーションを工夫することで広帯域を実現
- レンズアレイ同様、高速スピンドルを用いて直接AIブロックを加工



- 80 – 180 GHzの広帯域をカバー

レンズを用いた冷却光学系

* レンズ材料の比較

✓ HDPE ($n \sim 1.5$): 屈折率が低くレンズが巨大化

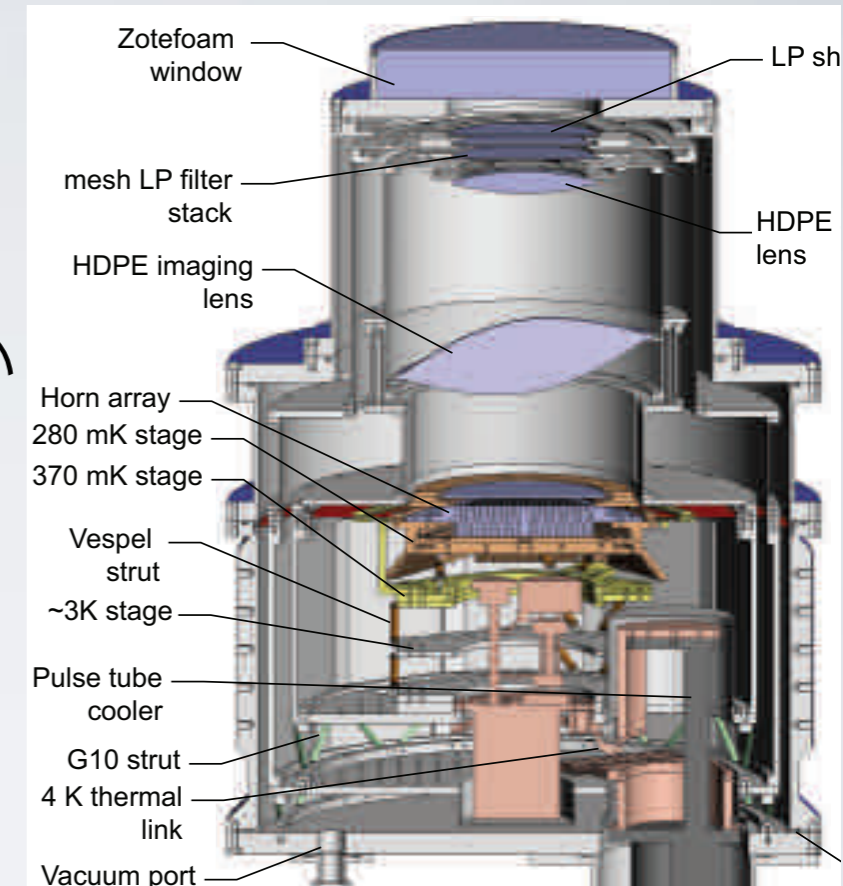
→ 熱容量大、損失大、製作困難なため広視野化に向かない

✓ Silicon ($n \sim 3.4$) or Alumina ($n \sim 3.1$)

→ 屈折率が大きいいためHDPEより薄くできる

→ 南極に向けた広視野観測には必須の技術

→ 屈折率が大きいいため、表面で約30%の反射損失がある



Schwan et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **82**, 091301, 2011

* 反射防止コーティング

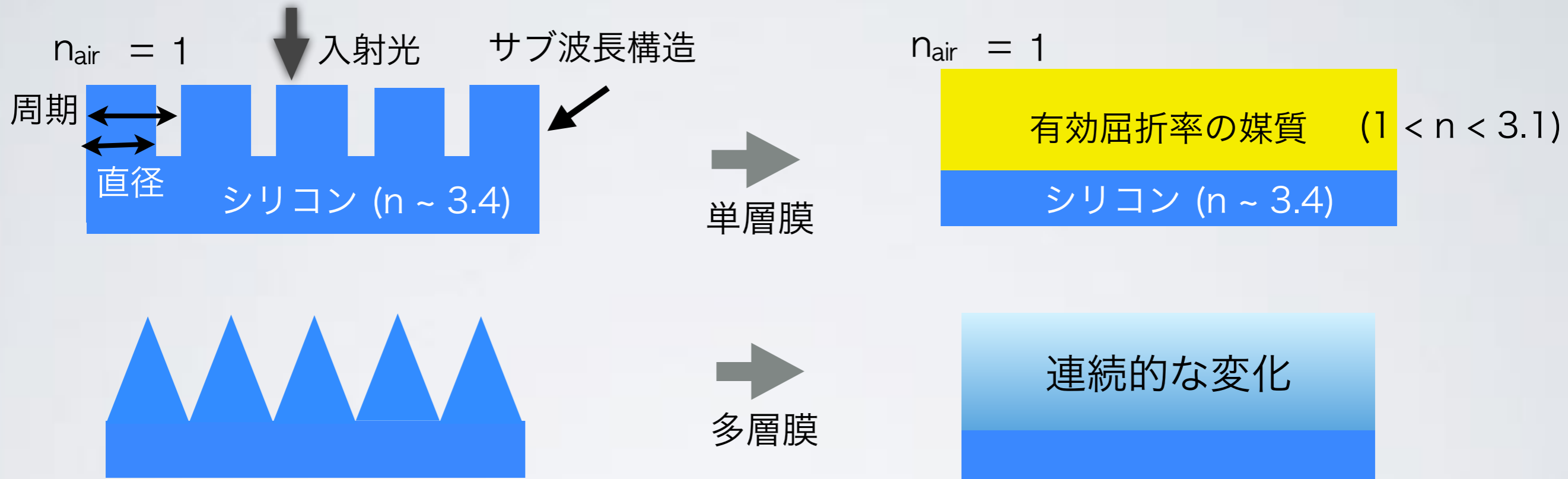
- ・ 無反射の条件

$$n_{AR} = \sqrt{n_{air} \cdot n_{Si}} = 1.84 \quad d = \frac{\lambda}{4 \cdot n_{AR}}$$

- ・ Si, Aluminaと反射防止膜の熱膨張係数が異なるため、冷却時に剥がれる可能性がある
- ・ 反射防止膜の誘電損失がある

反射防止コーティング：サブ波長構造

*サブ波長構造：対象とする波長より十分小さい構造を表面に形成



→ 入射光は空間構造を捉える事が出来ない：空気とアルミナの間の屈折率を持つ媒質

*誘電体膜に対するメリット

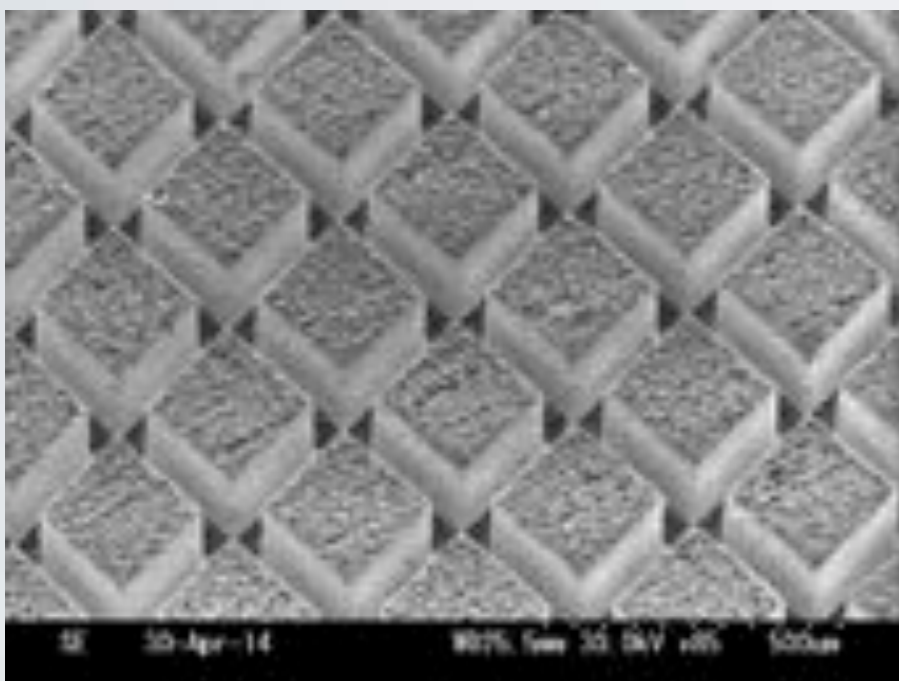
1. 単一の物質で反射防止対策が可能
2. 冷却サイクルに強い
3. 膜による余分な誘電損失がない

大口径レンズには必須の技術

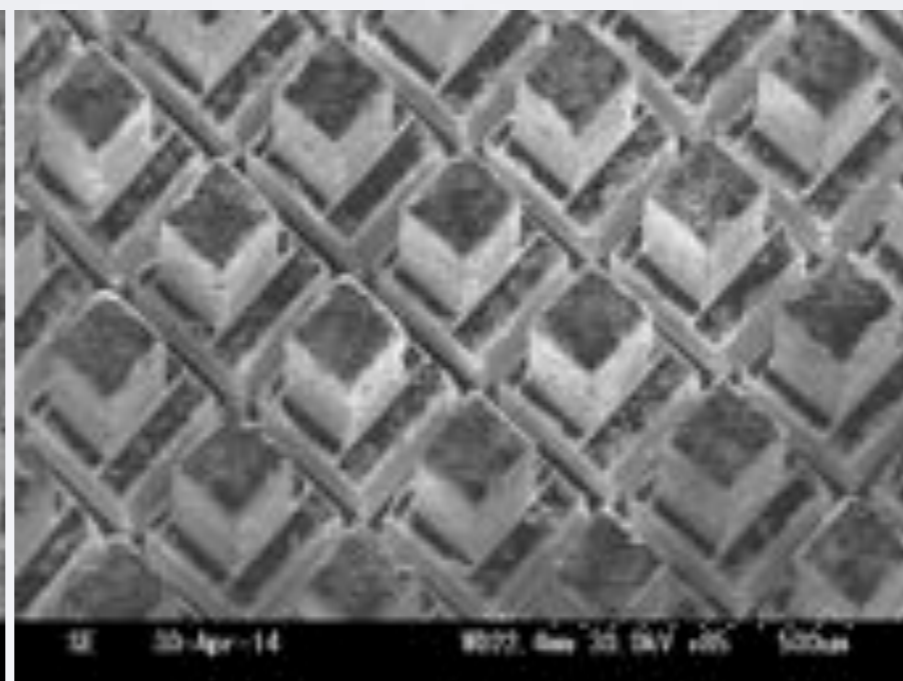
広帯域サブ波長構造の開発

Nitta + in prep

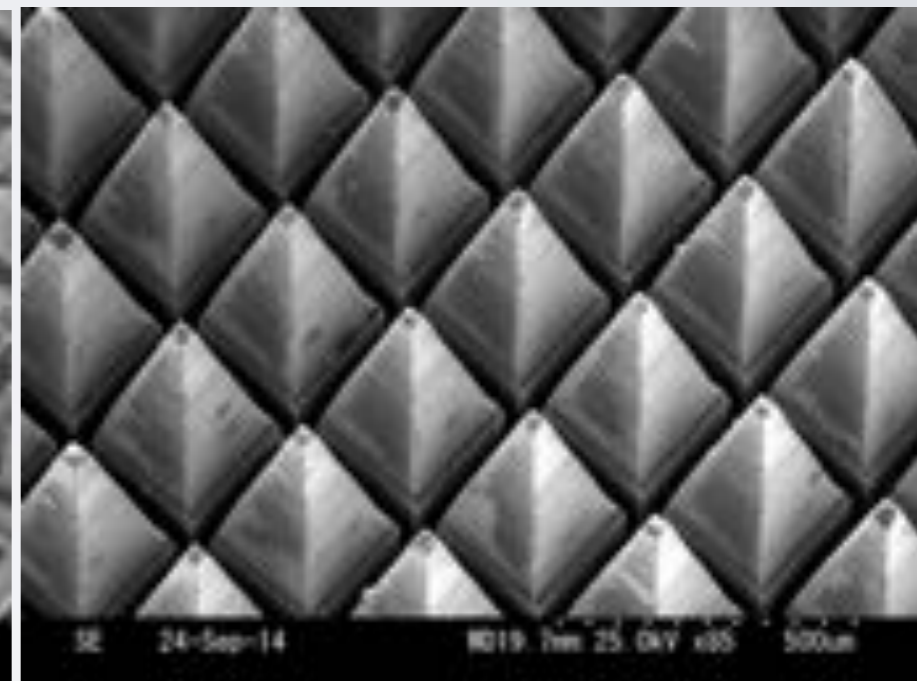
one-layer structure



two-layer structure

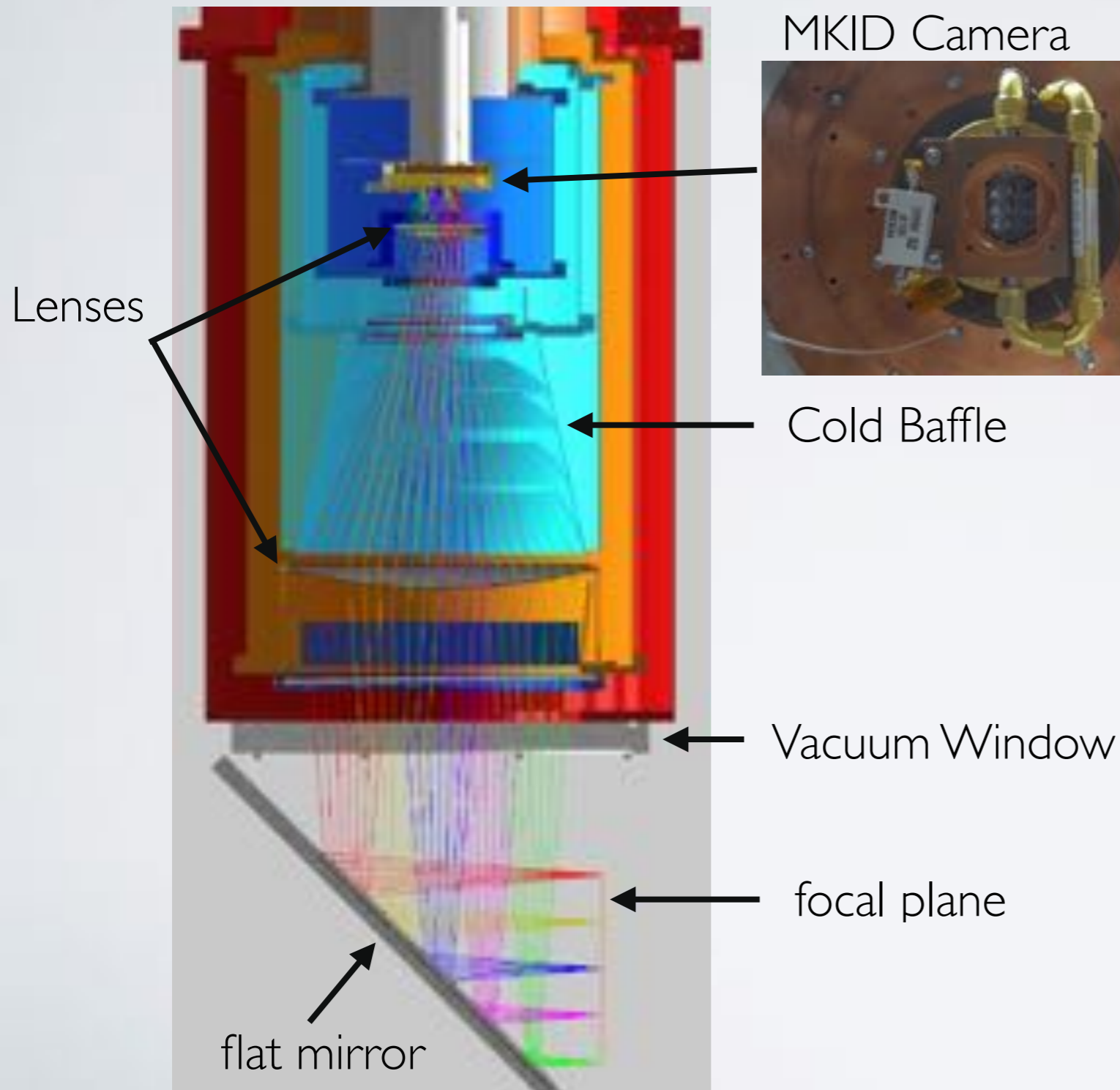


taper structure

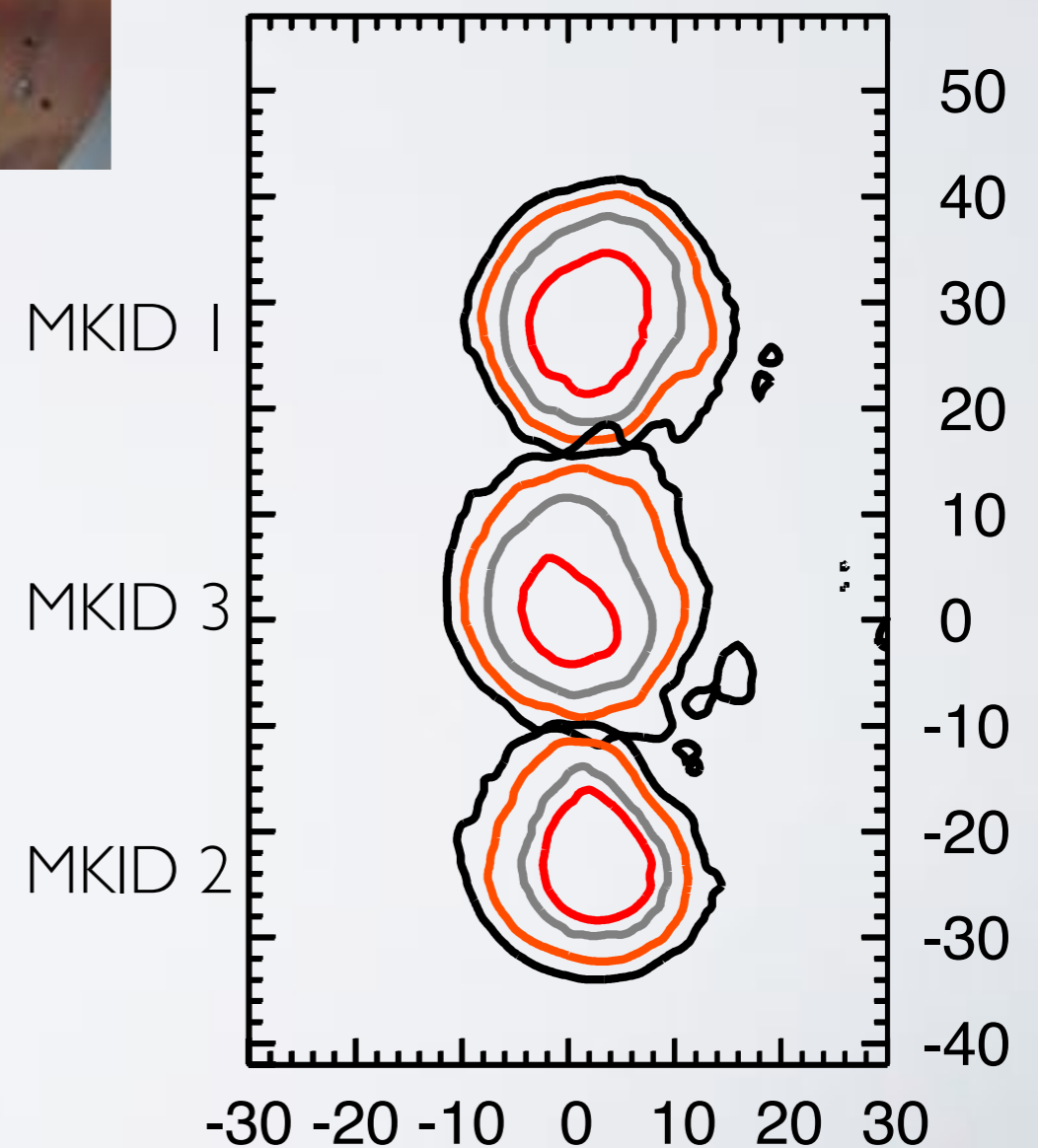


ビームパターン測定

* レンズアレイ+冷却光学系のシステム



・焦点面におけるビームパターン

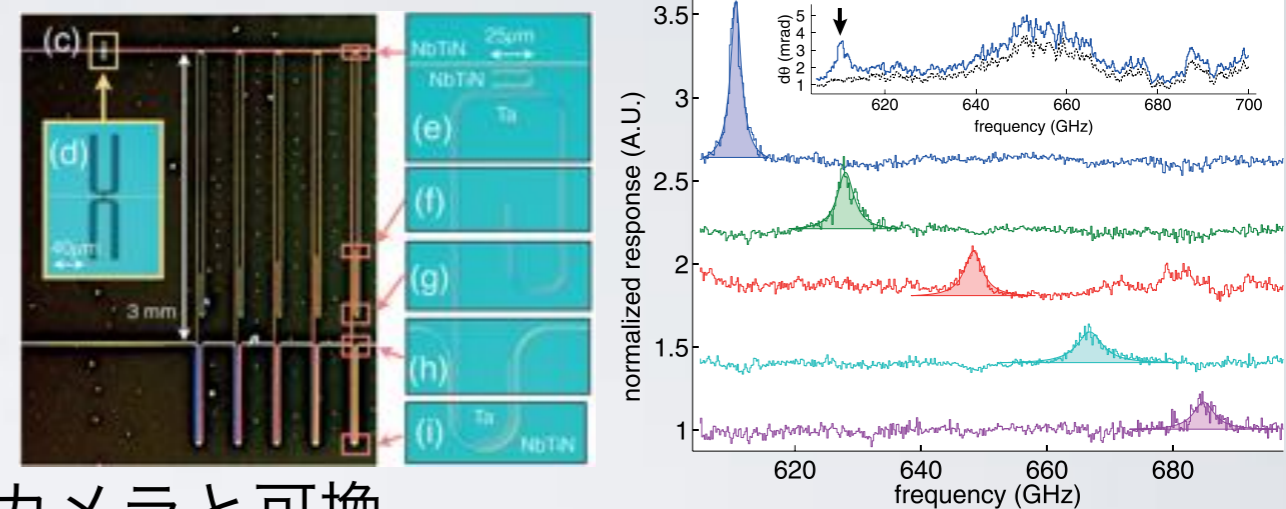


30 mテラヘルツ望遠鏡に向けて

* MKIDを用いた面分光測定

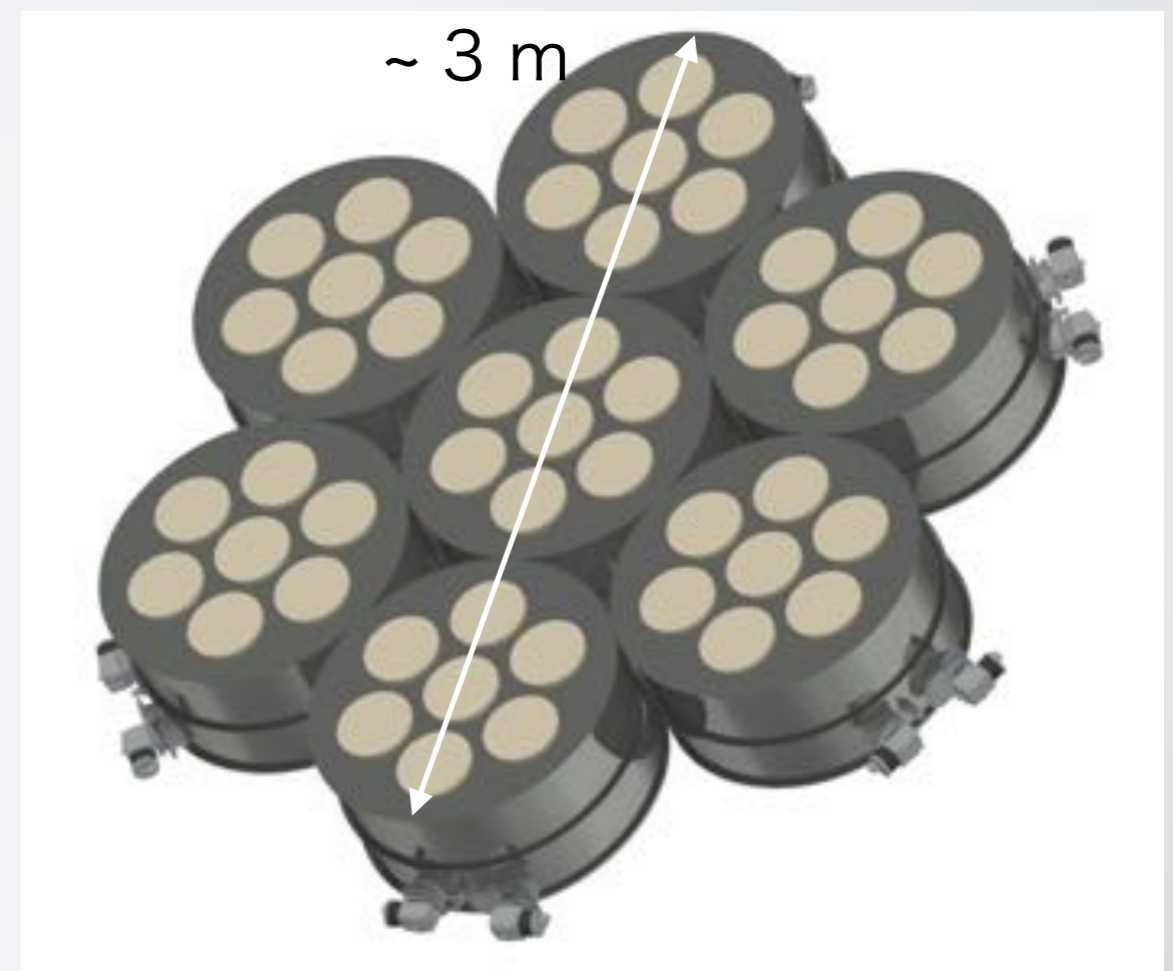
- MKID + narrow band filterを用いた on-chip上での分光
- FTS等比べてコンパクト
- 焦点面に搭載しているイメージング用のカメラと可換
- $R = f_0/\Delta f \sim 1000$

Endo et al., *Appl. Phys. Lett.*, **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. ~ 1m)
- 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

- Siレンズを用いた冷却光学系
- 400GHz&850GHz：レンズ+MKID array
- 1300GHz：ホーン+MKID array
- 合計7モジュールで視野1度をカバー

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