

# 南極テラヘルツ望遠鏡計画に向けた 広視野電波カメラの開発

新田冬夢（筑波大学）

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

関本裕太郎, 長谷部孝（宇宙航空研究開発機構）

永井誠, 野口卓, 松尾宏, 福嶋美津広, 三ツ井健司, 都築俊宏 (国立天文台)

瀬田益道（関西学院大学）

成瀬雅人 (埼玉大学)

# 発表概要

## 1. イントロダクション

- 南極テラヘルツ望遠鏡のカメラシステムの概要
- 光学設計, 機械設計など

## 2. 多素子カメラ実現に向けた技術開発

- Microwave Kinetic Inductance Detector
- シリコンレンズを用いた冷却光学系の開発
- 野辺山45m望遠鏡搭載に向けたMKIDカメラ

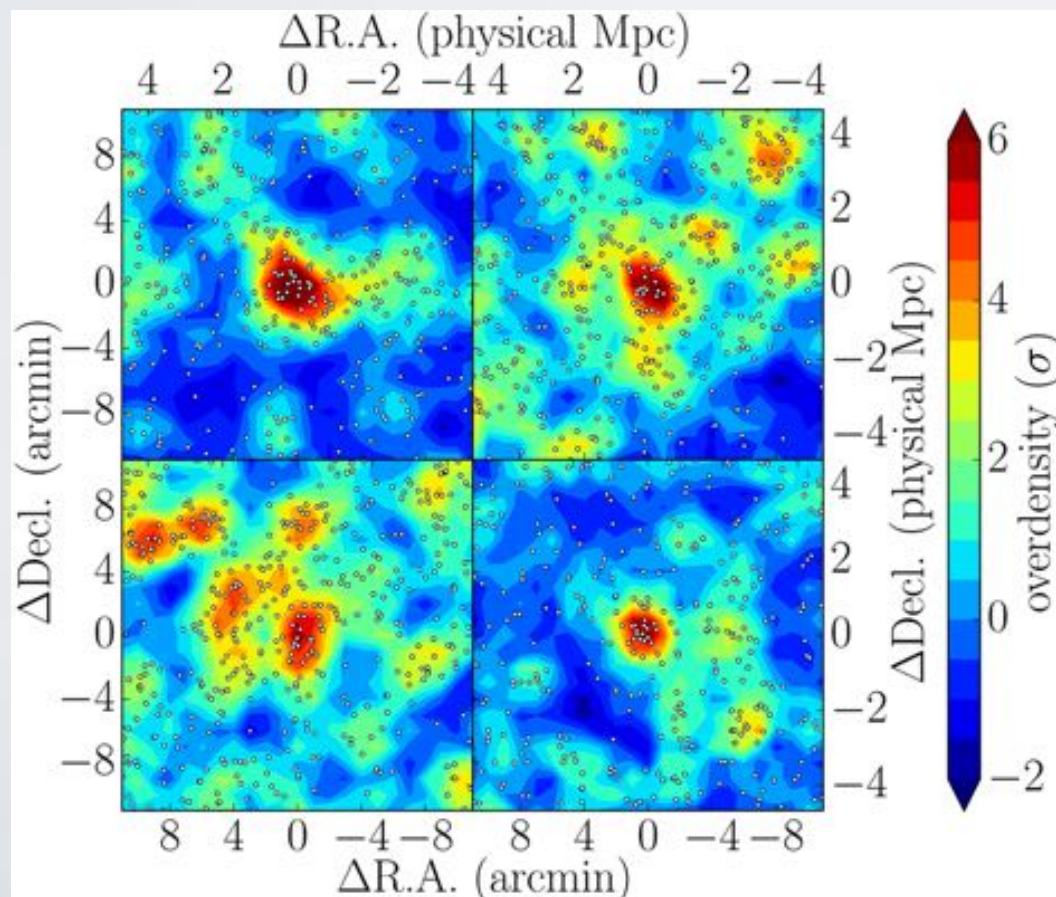
## 3. まとめと今後の展望

# 広視野天文学

## \* カメラを用いた広域サーベイ観測

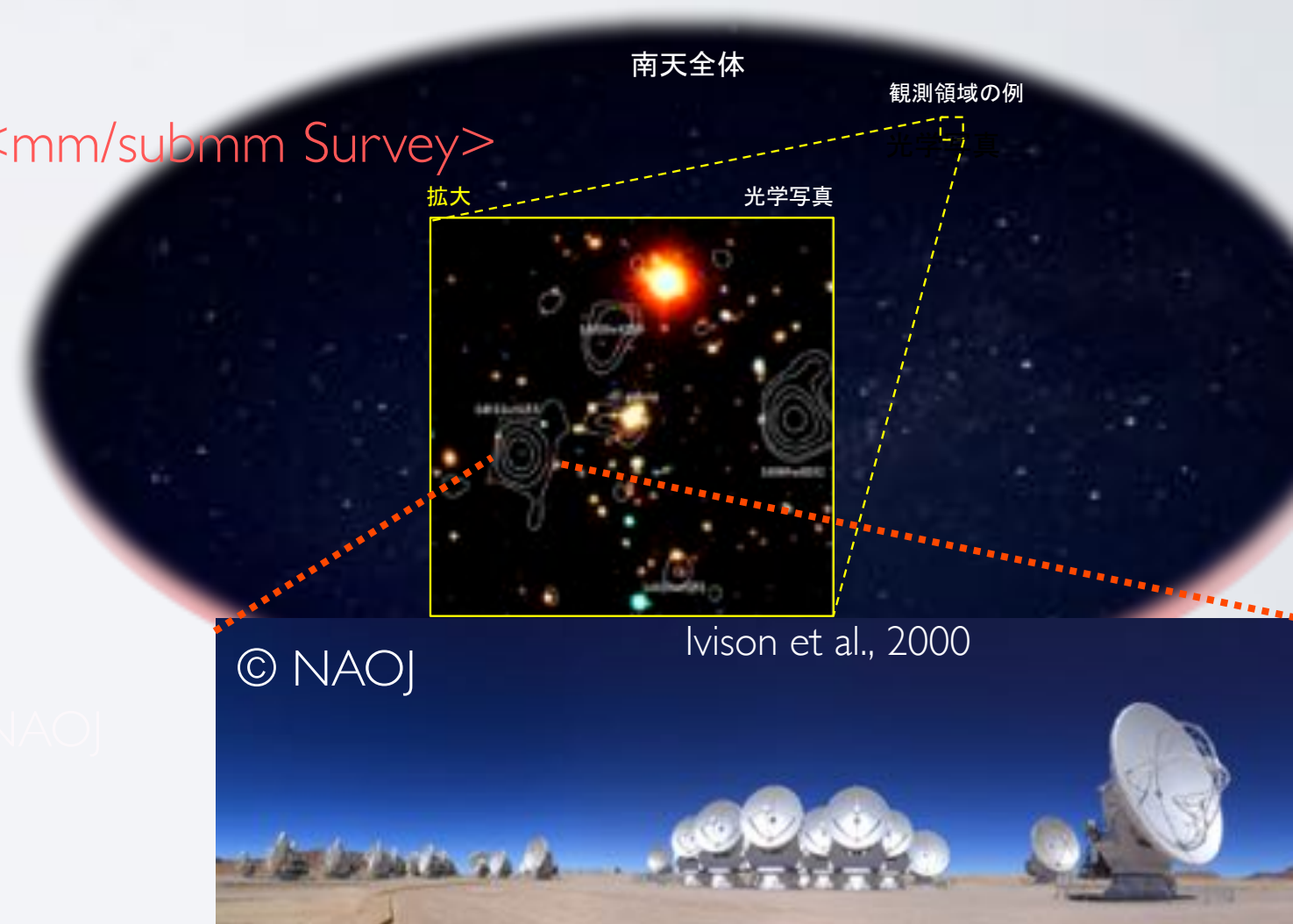
- ・ 可視光領域ではHSCを用いた広域サーベイ観測により遠方での銀河／銀河団の分布が明らかになってきた
- ・ 電波領域でも同様にCCDのように検出器を敷き詰め、カメラによるサーベイから冷たい宇宙の広視野観測が重要

### <HSC Survey>



Toshikawa et al., 2018

### <mm/submm Survey>



詳細構造などはALMAを用いてフォローアップ観測

(カメラとALMAは相補的な役割)



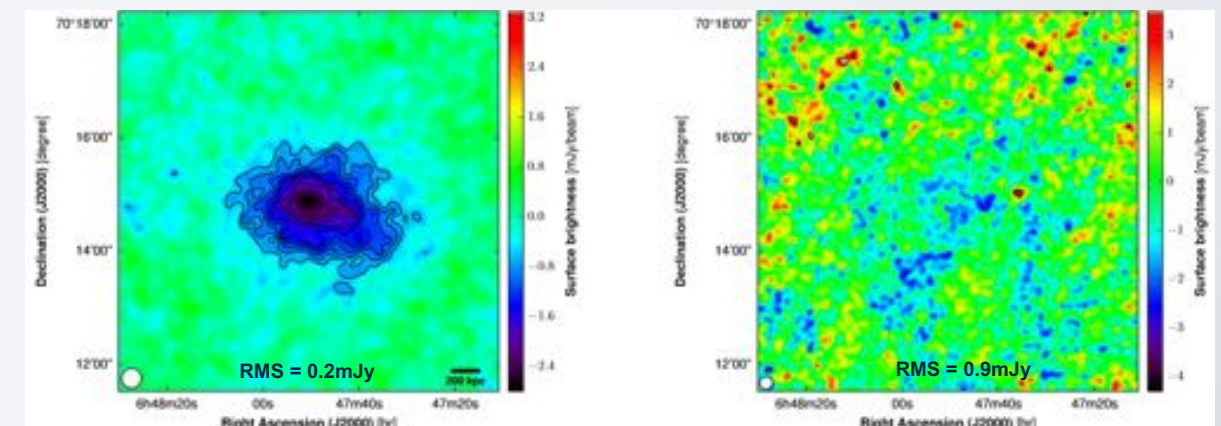
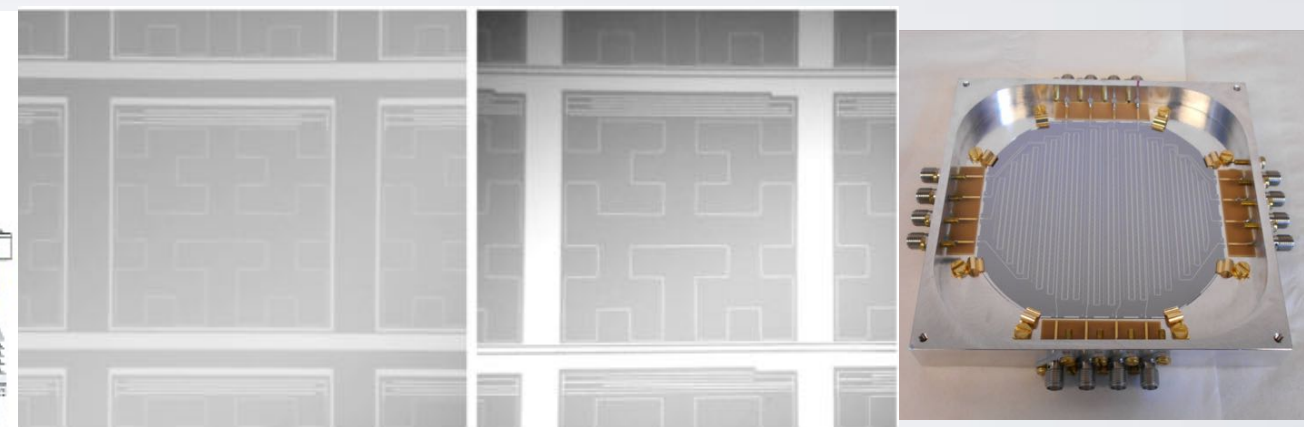
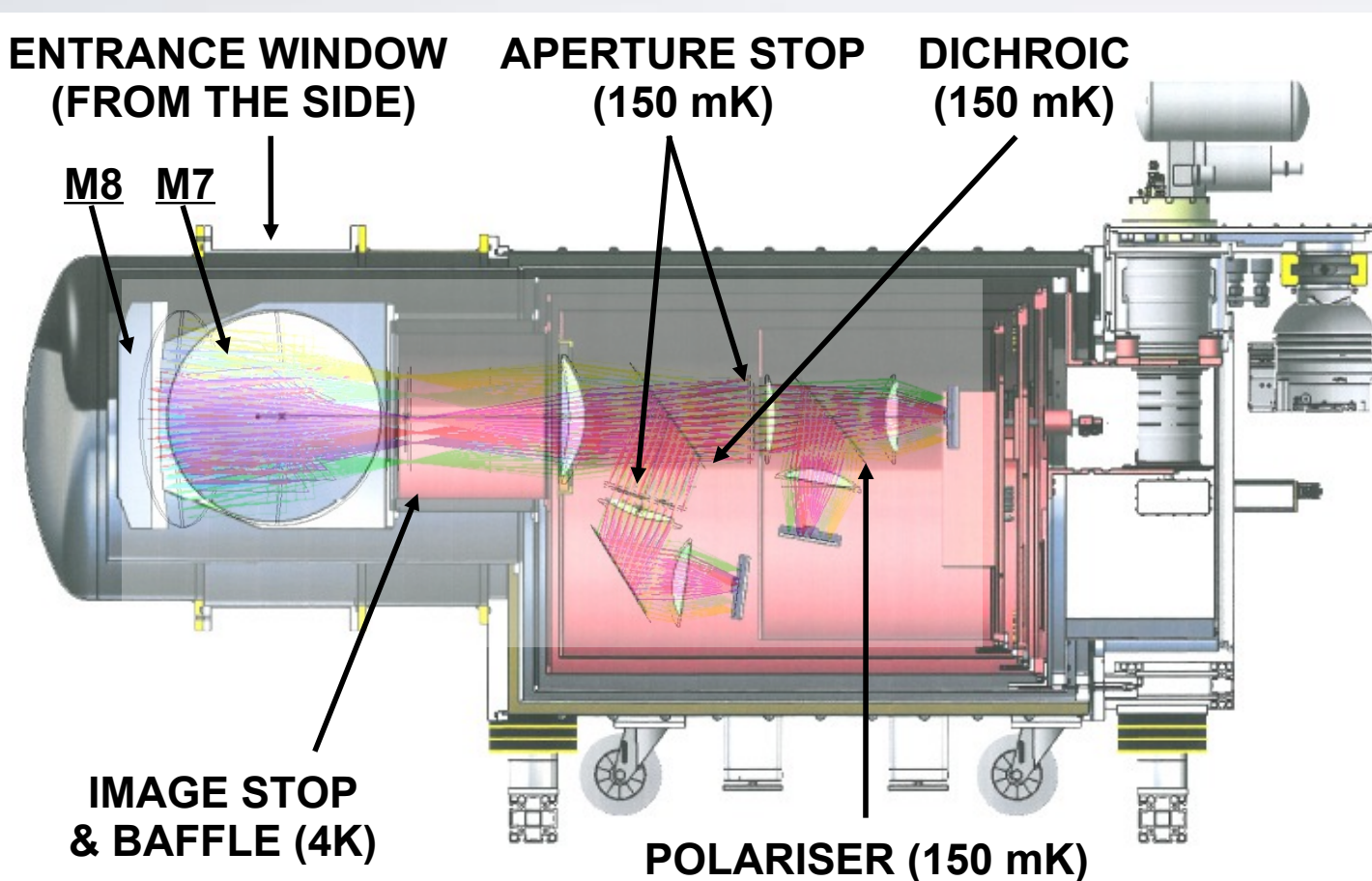
# 多素子電波カメラ

## \* 大規模アレイ検出器

- ・ 広視野サーベイ観測実現のため、大規模アレイ検出器の開発が重要
  - \* 近年開発されているものでは1000 ~ 10000素子規模
    - KID, TESを中心に
  - \* 将来的にはさらに多素子で $10^5$ 素子規模

ex) <NIKA 2>

Adam et al., A&A, 2018



# 南極テラヘルツ望遠鏡：全体光学系

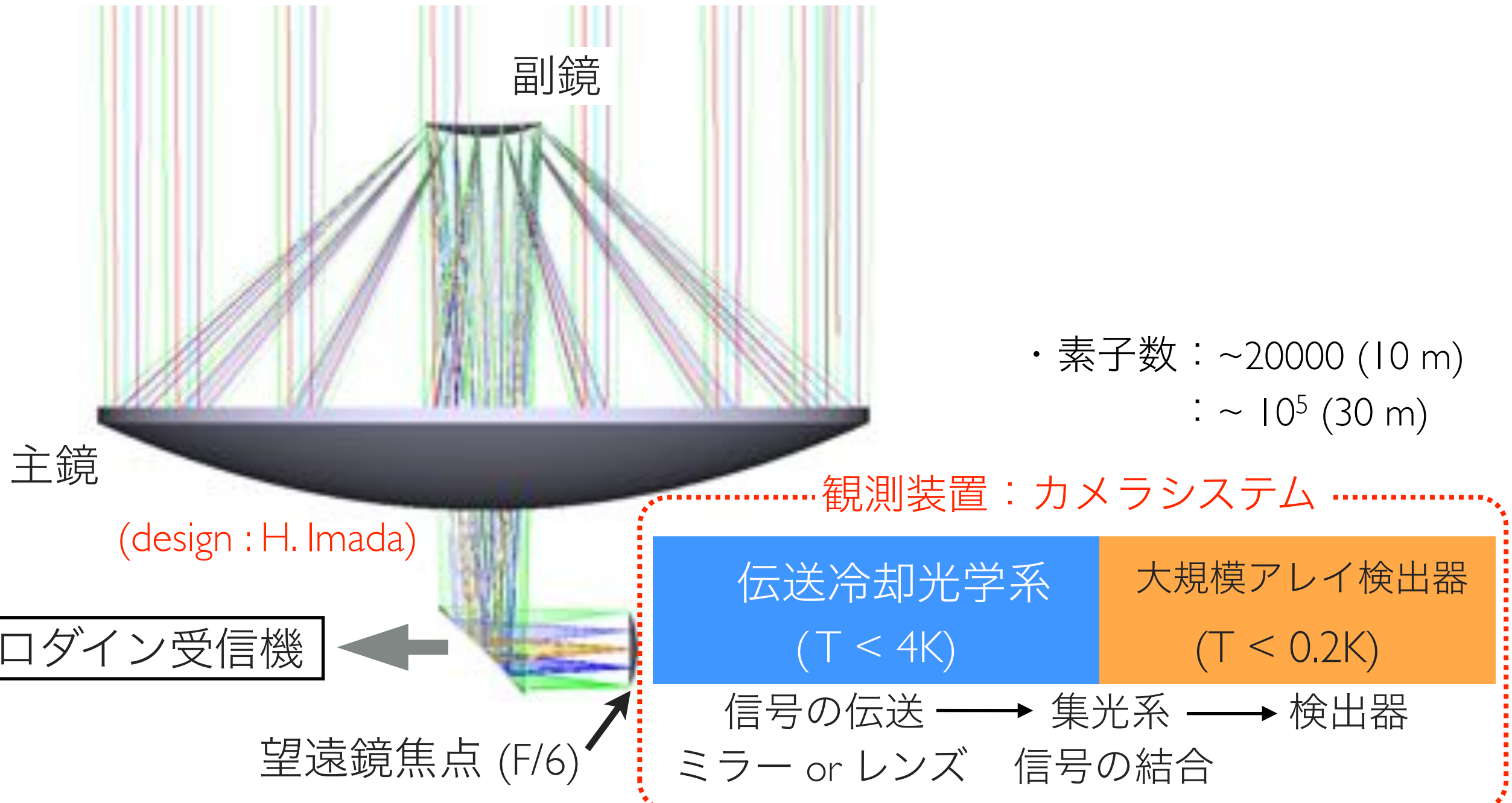
\* 視野： $1^\circ$  @ F/6 focus

→ 広域サーベイ観測

\* 観測周波数

• 400 / 850 / 1300 GHz (10 m)

• 230 / 400 / 650 / 850 / 1300 / 1500 GHz (30 m)

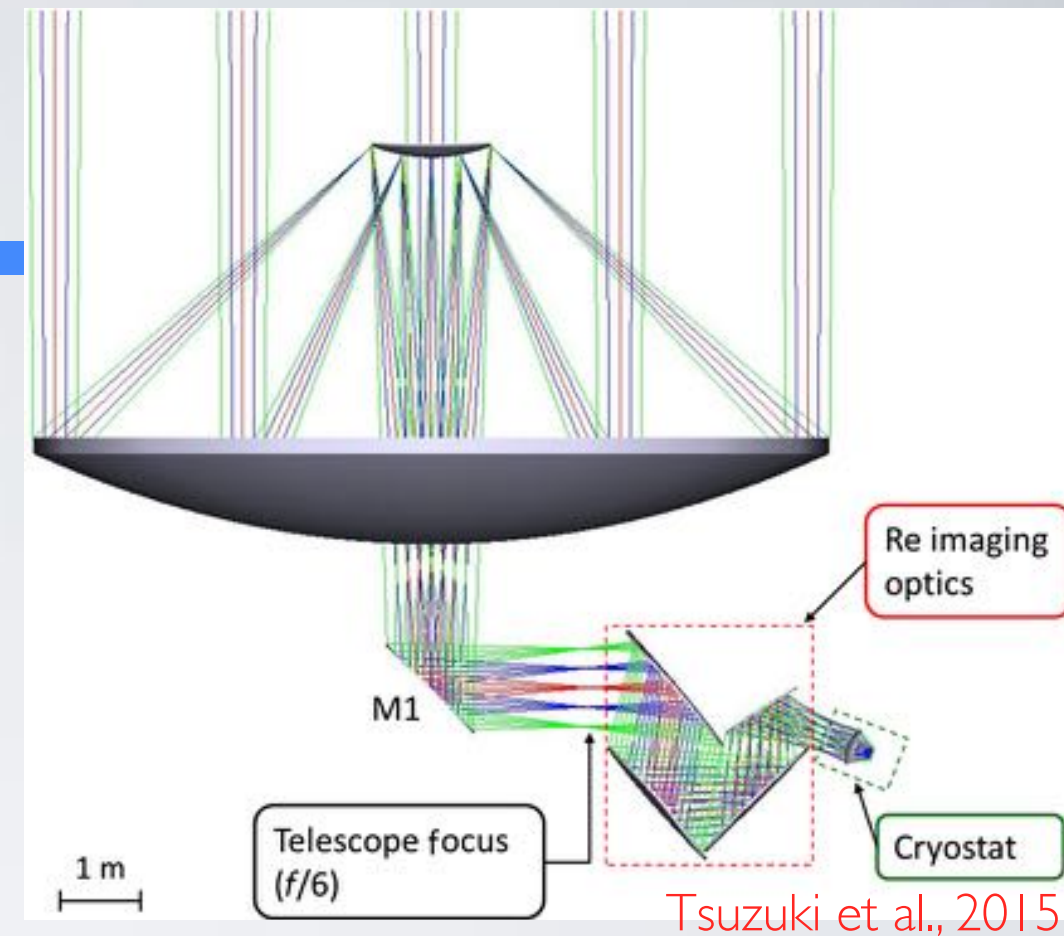




# カメラの伝送光学系

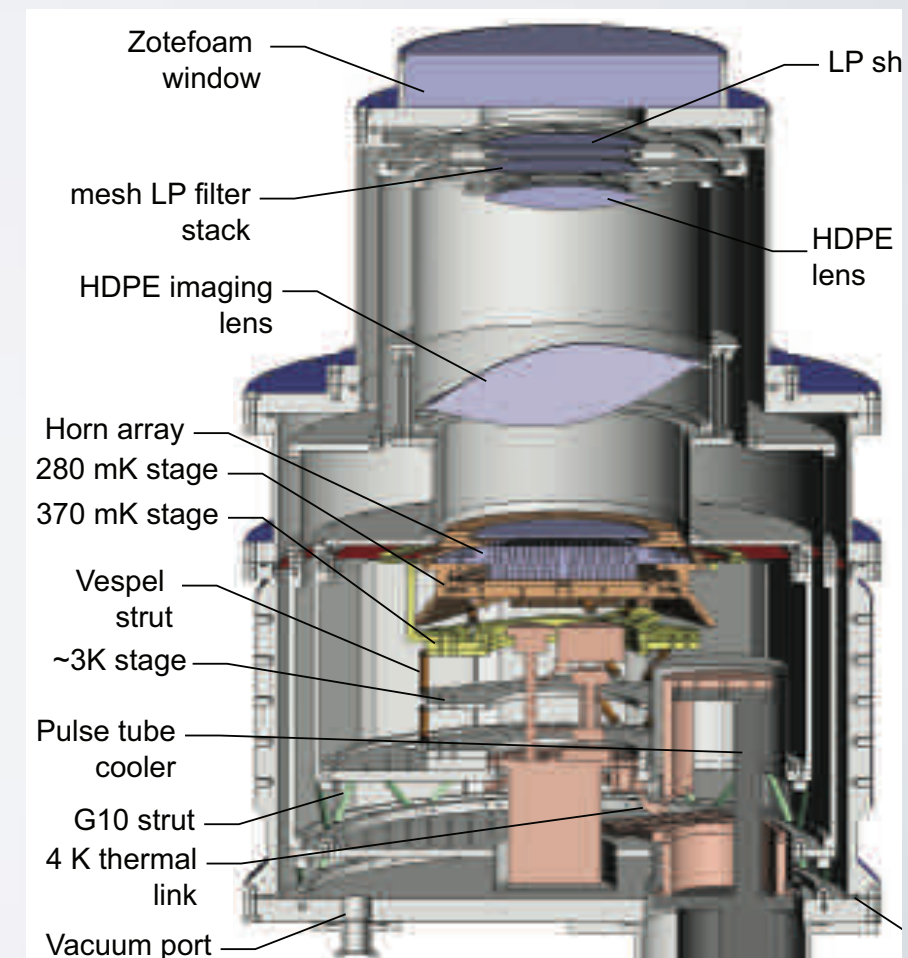
## \* ミラーによる反射系

- ・ 視野1度で伝送するとミラーが巨大化
- ・ 自由曲面鏡により視野1度でSR > 0.9
- ・ 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

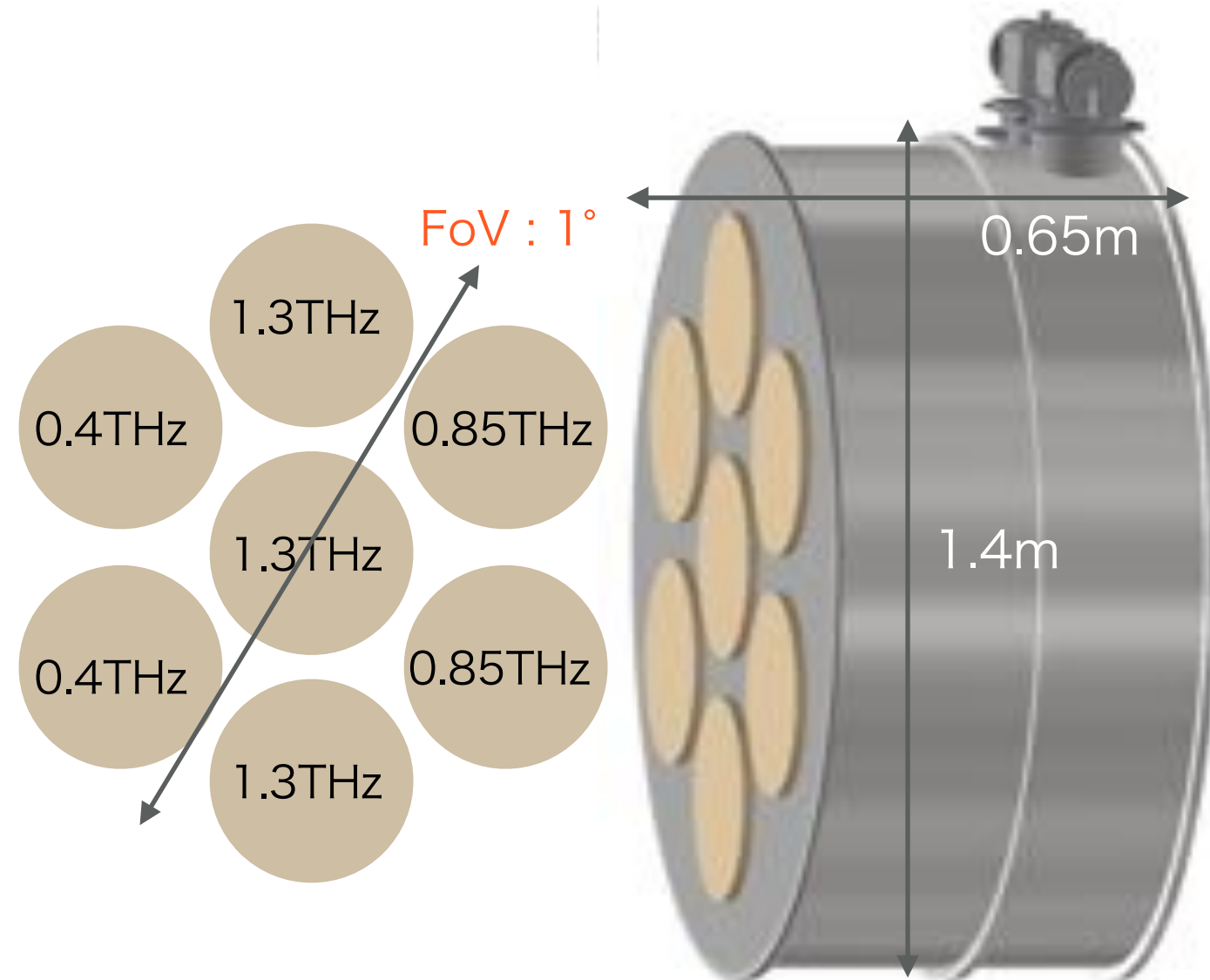
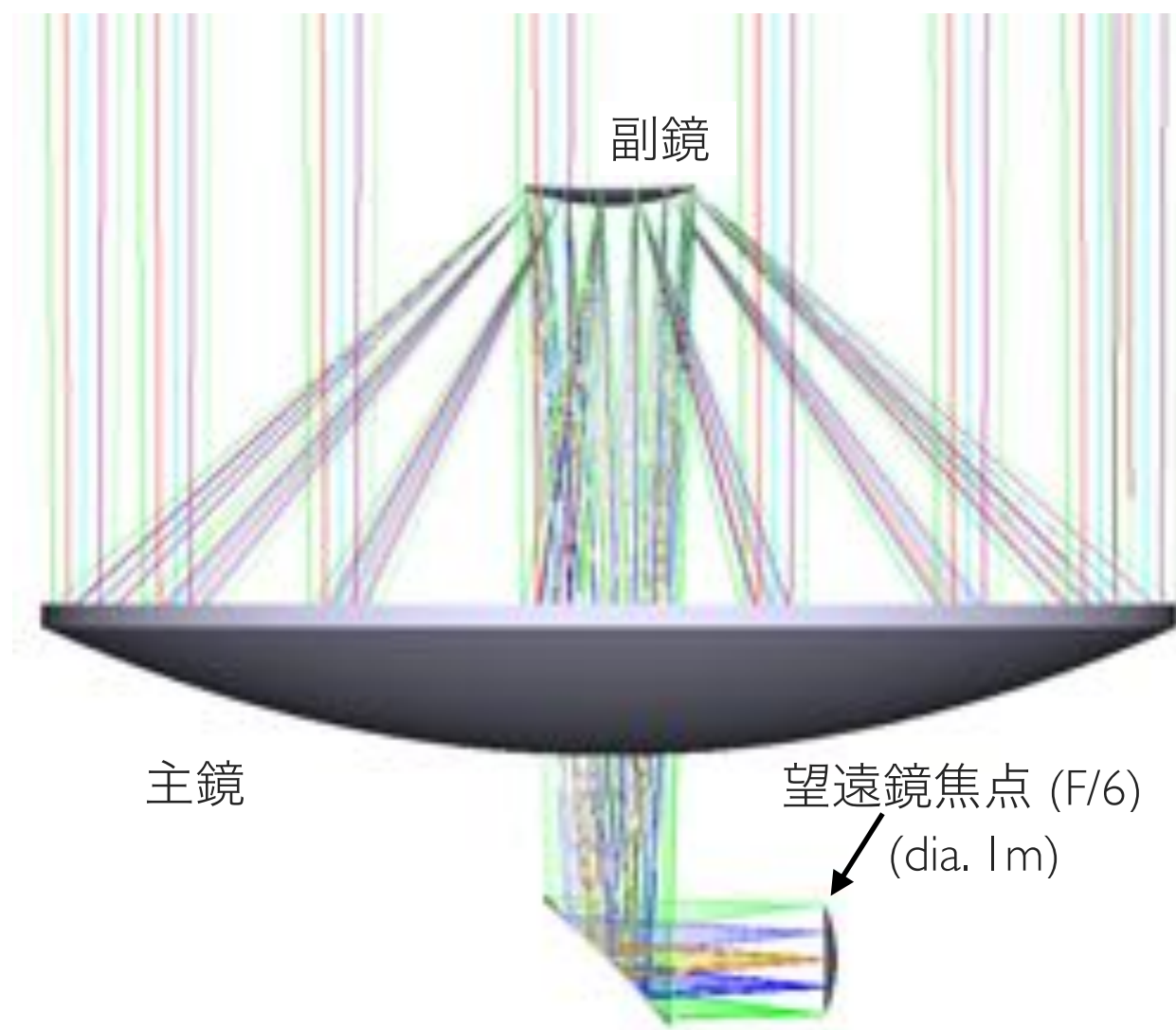
- ・ HDPE ( $n \sim 1.5$ ): 屈折率が低くレンズが巨大化  
→ 熱容量大、損失大: 広視野化に向かない
- ・ Silicon ( $n \sim 3.4$ ) or Alumina ( $n \sim 3.1$ )  
→ 屈折率が大きいためHDPEより薄くできる  
→ 屈折率が大きく、表面で約30%の反射損失があるため  
反射防止コーティングが必須



# 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
- GM冷凍機+dilutionで0.1 Kまで冷却
- 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

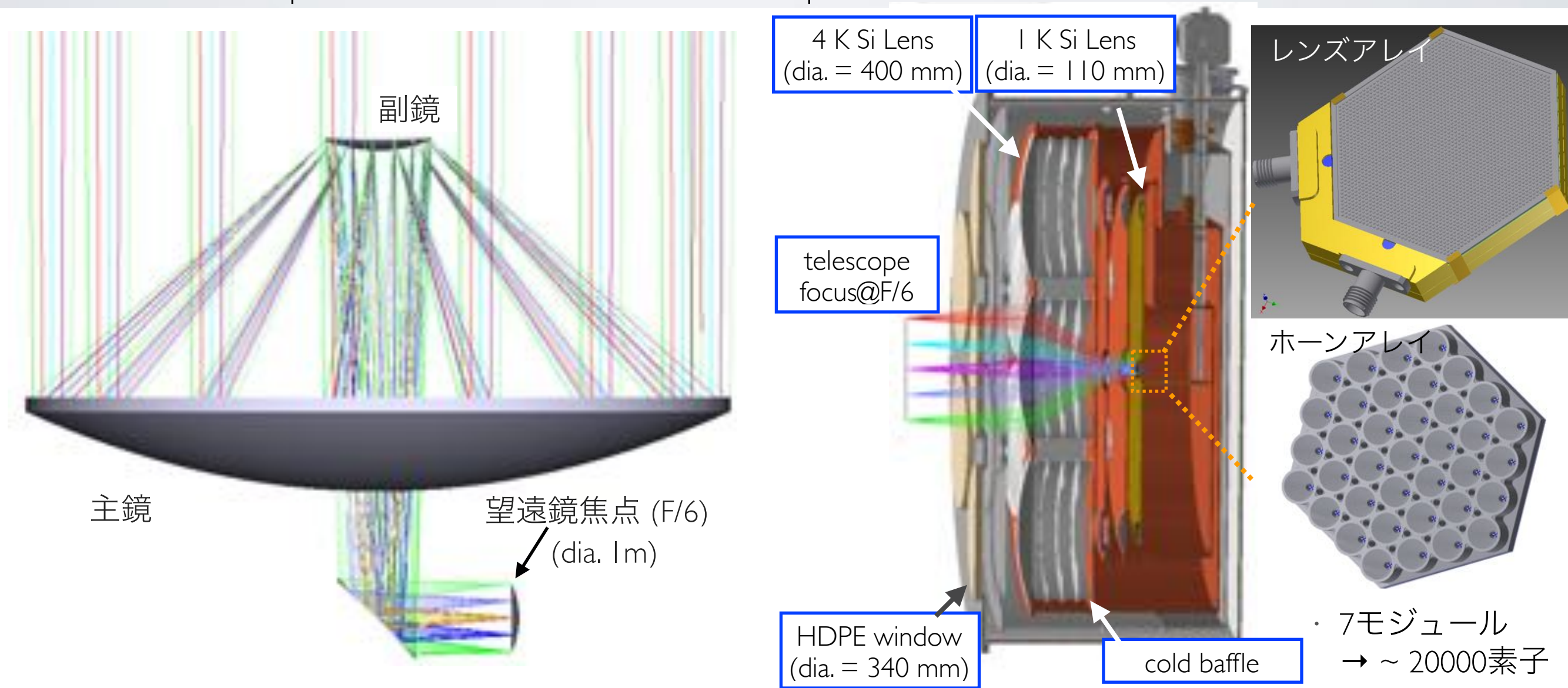




# 10mカメラ：クライオスタット

## \* 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
- GM冷凍機+dilutionで0.1 Kまで冷却
- 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



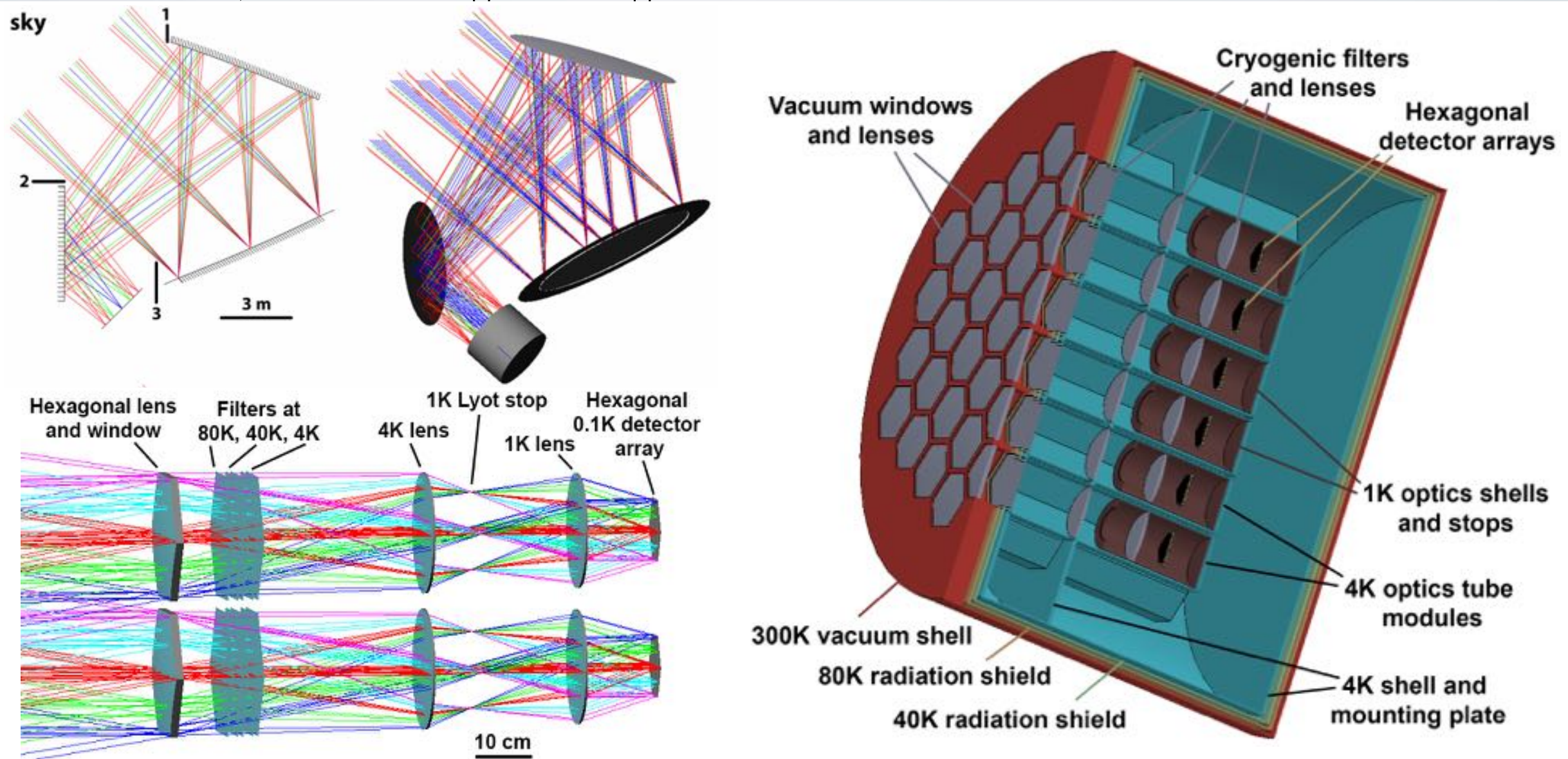


# CCAT-Prime

## \* 光学系

M. Niemack, Applied Optics, 2016

- 主鏡：6 m, Crossed-Dragone design



- 素子数： $>10^5$
- Siレンズを用いたoptics tubeをモジュール型に  
→広視野化にはレンズ開発とモジュール化も重要

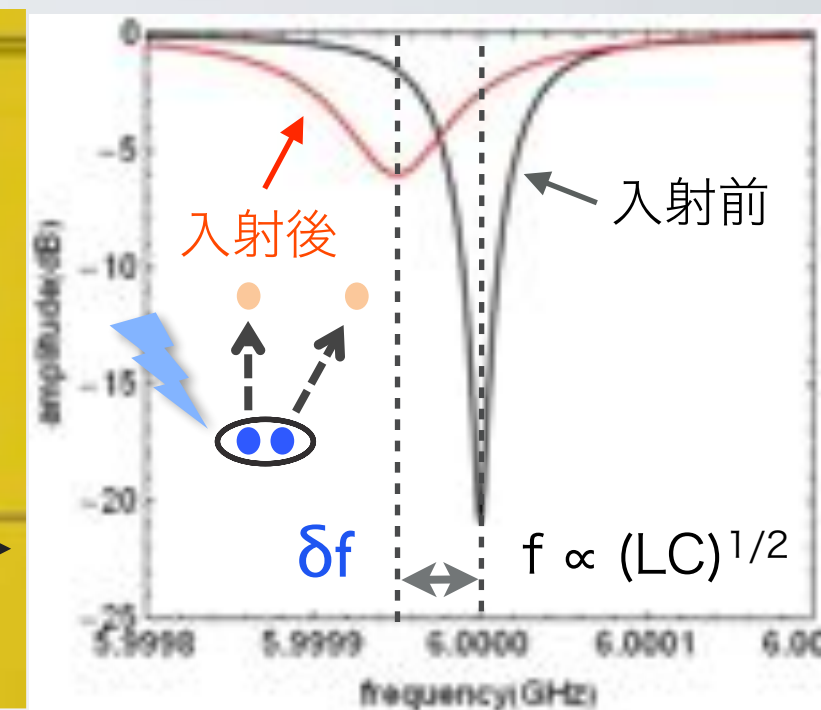
# Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)

Day et al., Nature, 2003

## \* MKID

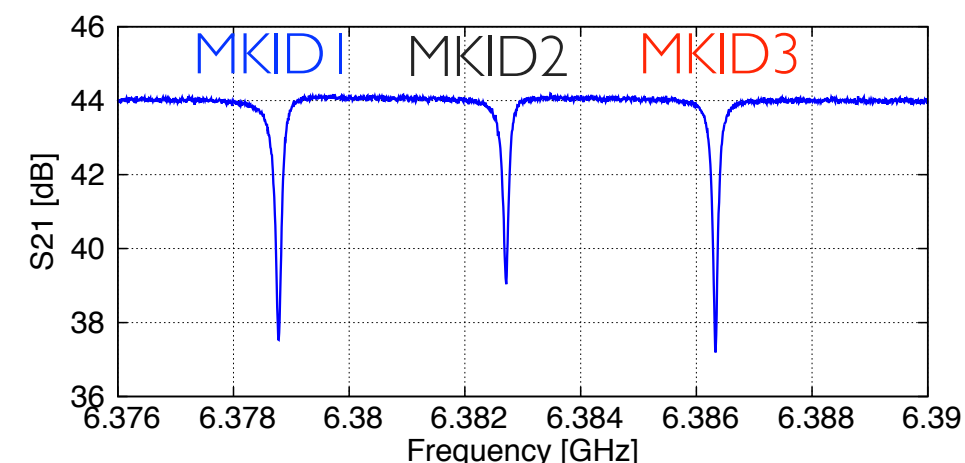
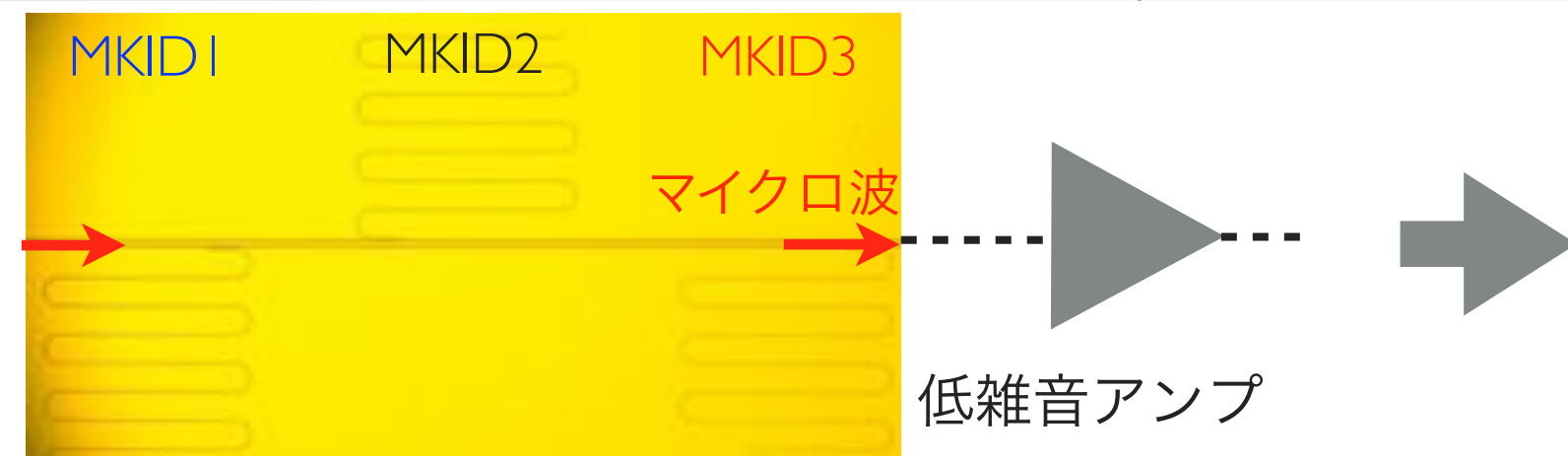
- ・ マイクロ波帯で動作する超伝導共振器
- ・ 入射光子によりクーパ対が解離
  - 力学インダクタンスが変化
  - 共振周波数 ( $f_0$ ) が変化

超伝導ギャップエネルギー以上の光子を検出



## \* MKIDの利点

- ・ 構造がシンプルなため、高い歩留まりが期待出来る
- ・ 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



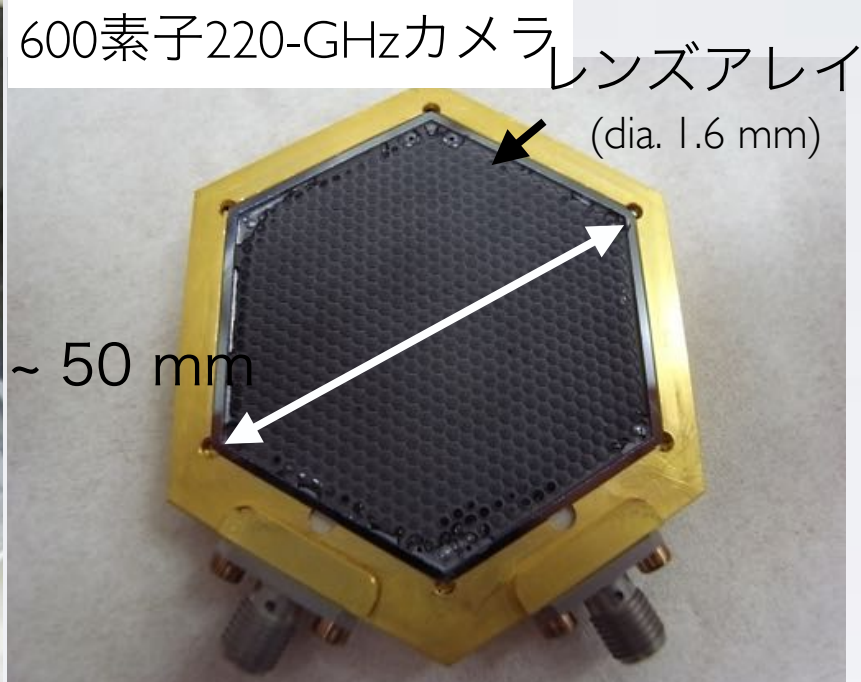
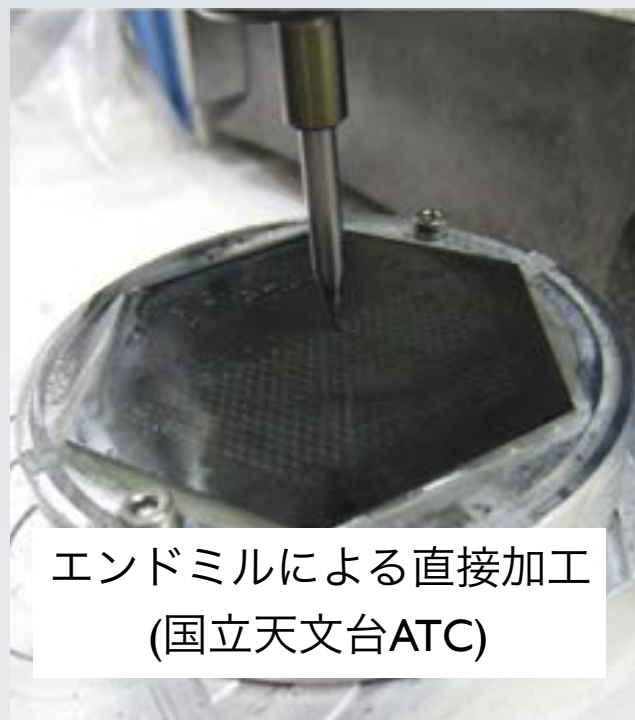


# MKIDアレイ

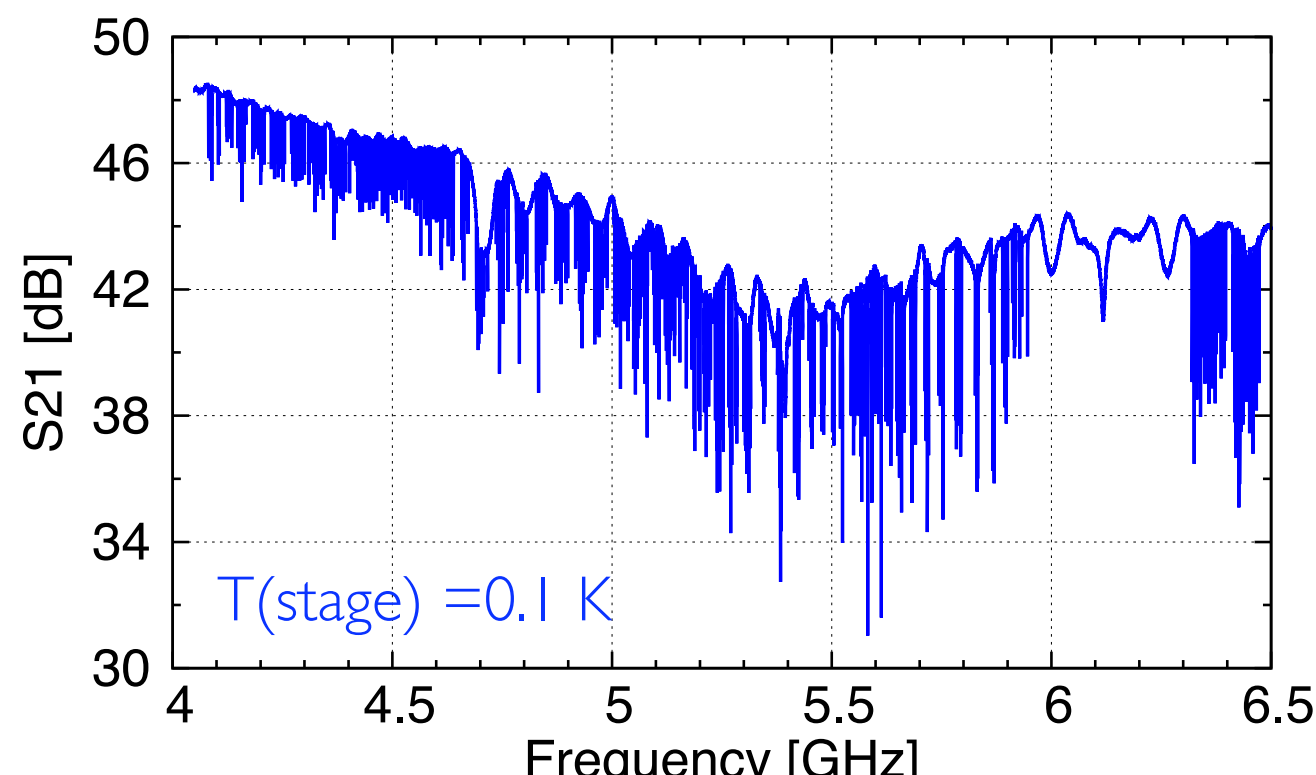
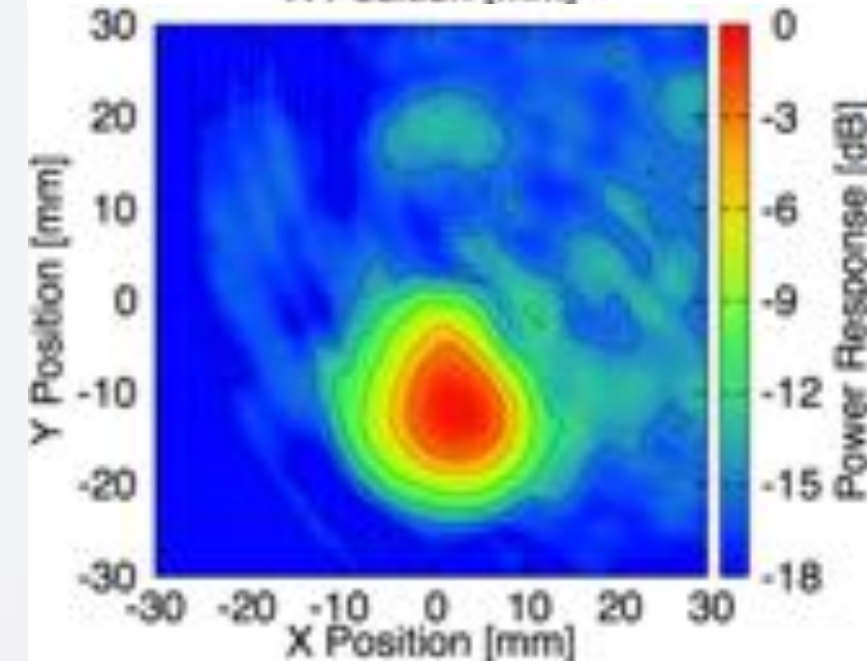
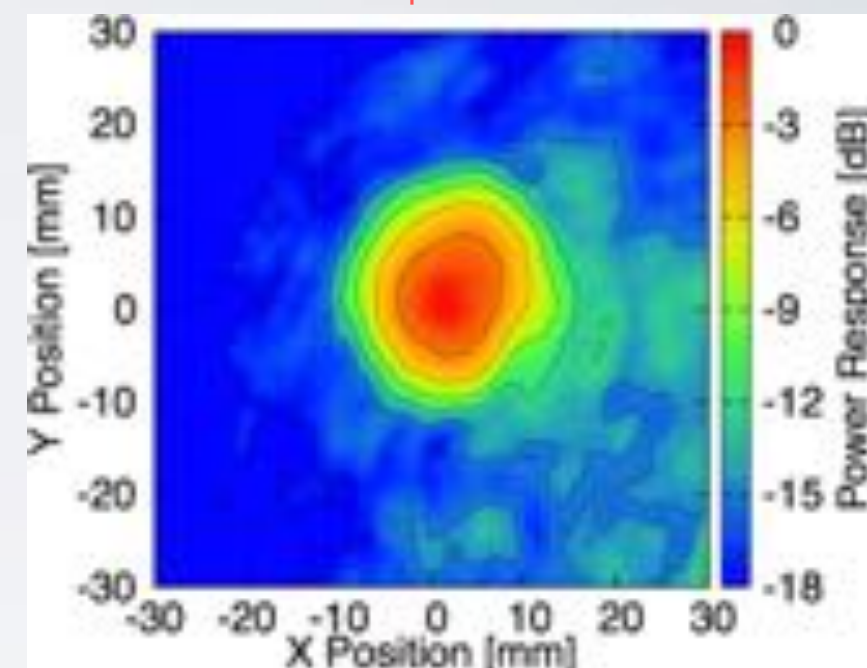
Sekimoto et al., SPIE, 2014

Okada, M-thesis, 2015

- \* レンズアレイの開発 → 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



<Beam Map@220 GHz>

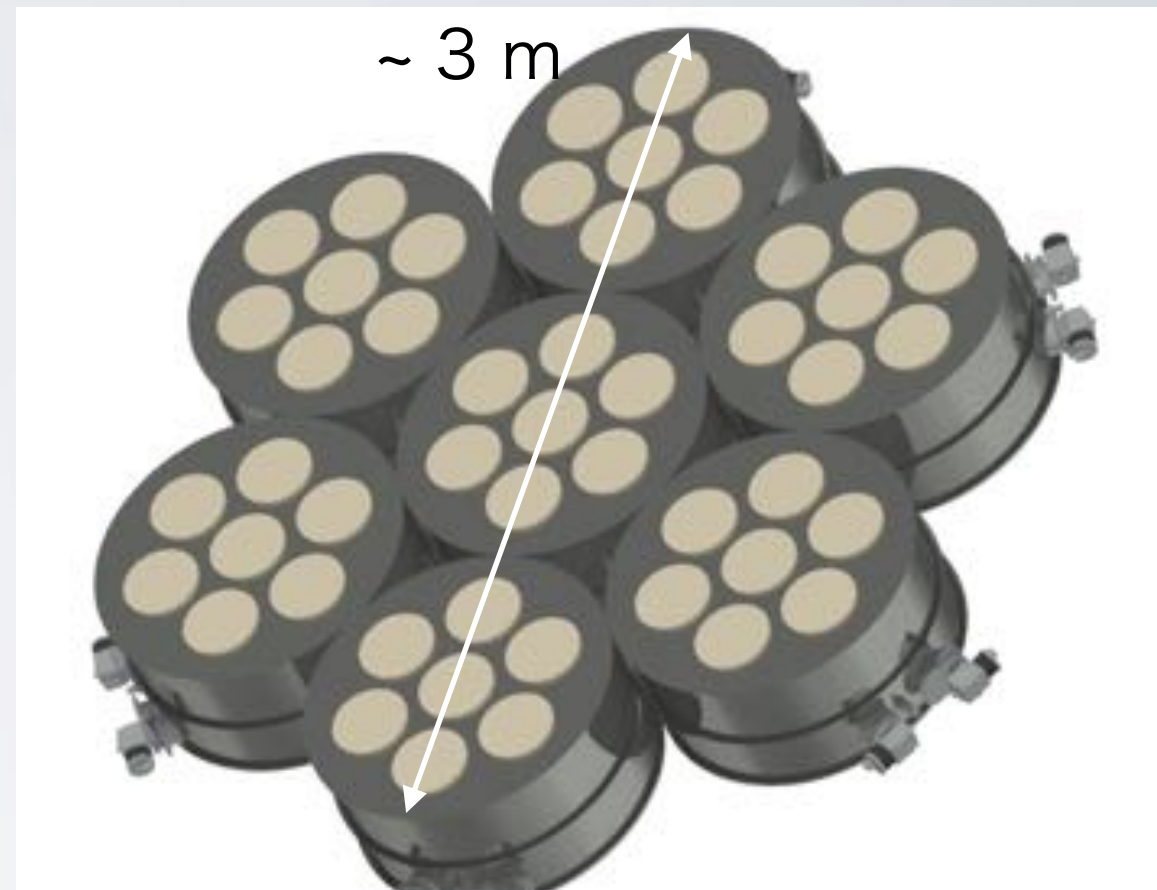




# 30 mテラヘルツ望遠鏡に向けて

## \* 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



周波数 [GHz]	感度 [mJy] ( $5\sigma_{rms}$ , $\tau =$ 積分時間)				角分解能 ["]	素子数 N	Mapping speed [deg <sup>2</sup> hr <sup>-1</sup> mJy <sup>-2</sup> ]
	$\tau = 60$ s	$\tau = 1$ hour	$\tau = 10$ hours	Confusion			
230	0.67	0.087	0.027	0.19	11	4000 × 2	128 × 2
400	1.12	0.15	0.046	0.22	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	0.48	0.00035	1.9	10800 × 2	0.024 × 2
1500	46.4	6.00	1.89	0.00009	1.7	14400 × 3	0.0022 × 3

## \* オンチップ分光計 (遠藤さんグループ)

# まとめ

## 1. 南極テラヘルツ望遠鏡搭載に向けた電波カメラの開発

- Microwave Kinetic Inductance Detector
  - アレイ化の容易さから、 $10^4 - 10^5$ 素子の大規模アレイ化を実現可能
- 誘電体レンズを用いた屈折式光学系
  - シリコンレンズの開発は広視野化を目指した冷却光学系で重要
  - 極低温で破損しない反射防止コーティングが必須
- レンズアレイ & ホーンアレイの開発
- 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

- 10m望遠鏡用に開発したカメラを更にモジュール化
- クライオスタット機械設計の工夫から更なる冷凍機の消費電力低減が必要