

# Development of the 109-pixel NbTiN-Al hybrid MKID array for 100-GHz band astronomical observations

---

国立天文台 先端技術センター

村山洋佑

2022/11/28

宇宙史研究センター構成員会議・成果報告&交流会

# 目次

---

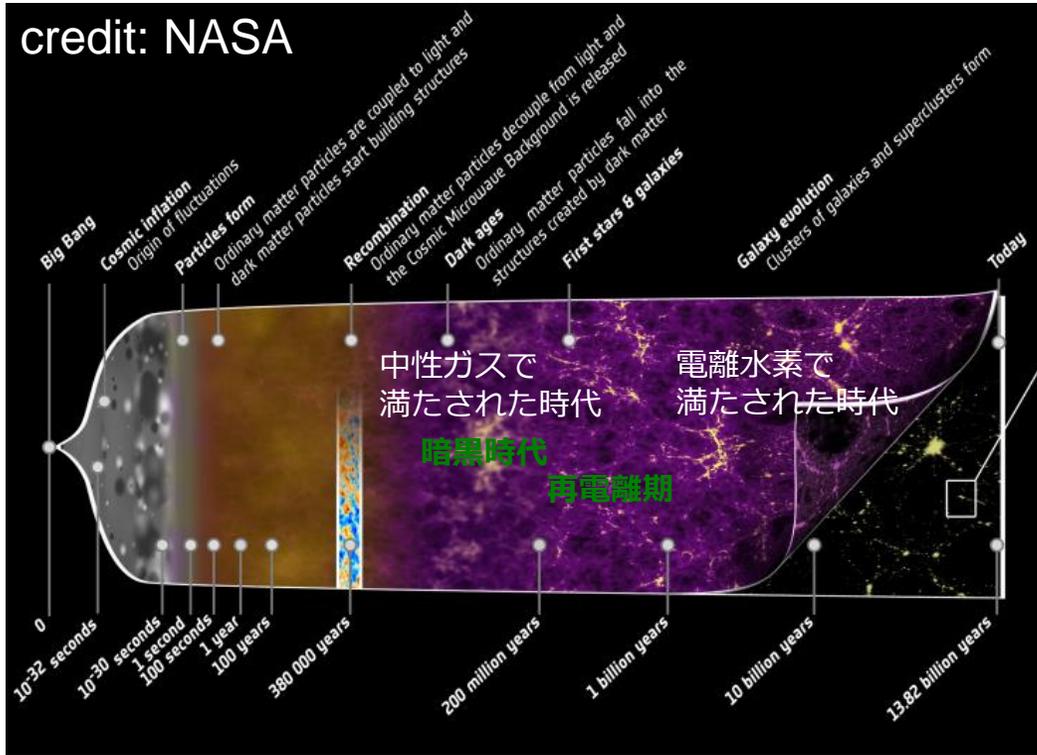
- 研究背景
- MKIDの概要と課題
- NbTiN-Al ハイブリッド型MKIDアレイの設計と製作
- ハイブリッド型MKIDを用いた100-GHz帯カメラの評価
- 望遠鏡での搭載試験 in 2021—2022
- まとめ

# 目次

---

- 研究背景
- MKIDの概要と課題
- NbTiN-Al ハイブリッド型MKIDアレイの設計と製作
- ハイブリッド型MKIDを用いた100-GHz帯カメラの評価
- 望遠鏡での搭載試験 in 2021—2022
- まとめ

# 遠方の星形成銀河の観測



宇宙年齢: 38万年  
宇宙の晴れ上がり

～9億年(z=6)  
再電離完了?

138億年 (z=0)  
現在

## ◆ ダストで覆われた星形成銀河

遠方(赤方偏移  $z = 6\sim7$ )から現在の宇宙にかけて広く存在

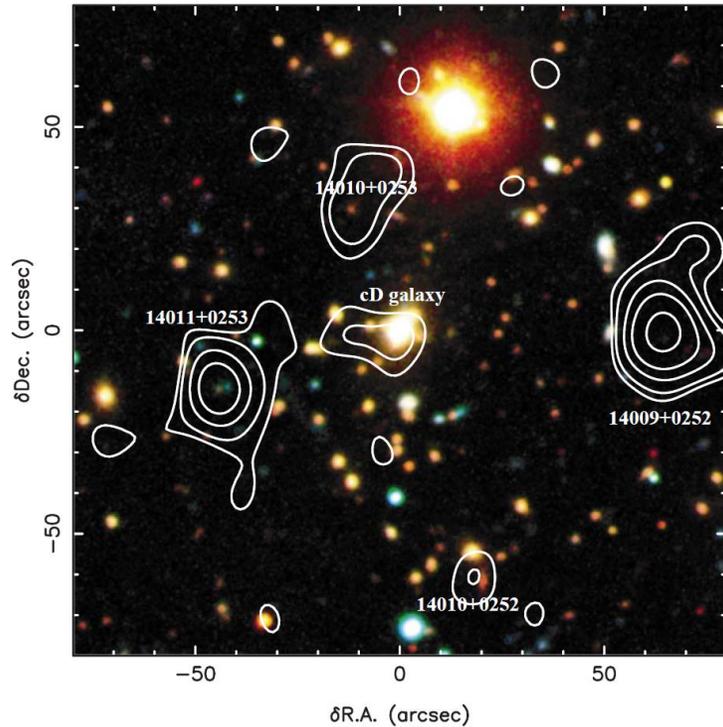
## ◆ 初期宇宙での星形成銀河の形成シナリオ?

初代星の形成→重元素量の増加→ダスト形成  
→ダスト放射する銀河

## ◆ 再電離期(z~6~15?)における星形成銀河の観測

⇒ 銀河形成・進化や宇宙再電離の理解へ

# サブミリ波帯での星形成銀河の探査



可視光の観測では見つからなかった  
サブミリ波銀河 [Ivison+2000]  
(color : 可視・赤外, contour : 850 μm帯)

## ◆ 可視光・近赤外の観測で未検出の銀河

- サブミリ波帯観測装置の発展によりダストに埋もれた銀河として、爆発的星形成を行うサブミリ波銀河の観測
  - 可視光・近赤外で見落とされてきた銀河の存在
- 再電離期におけるダストに覆われた銀河の多様性？
  - “普通”(星形成率や星質量などが数多く存在する平均的な性質)の銀河も見つかっている( $z \sim 7$ , Fudamoto+2021)

## ◆ 広域の遠方銀河探査 in ミリ波・サブミリ波帯

サーベイ観測の効率化には

- 広い視野を持つ望遠鏡
  - 高感度な多素子の撮像装置(= **電波カメラ**)
- の開発が重要となる

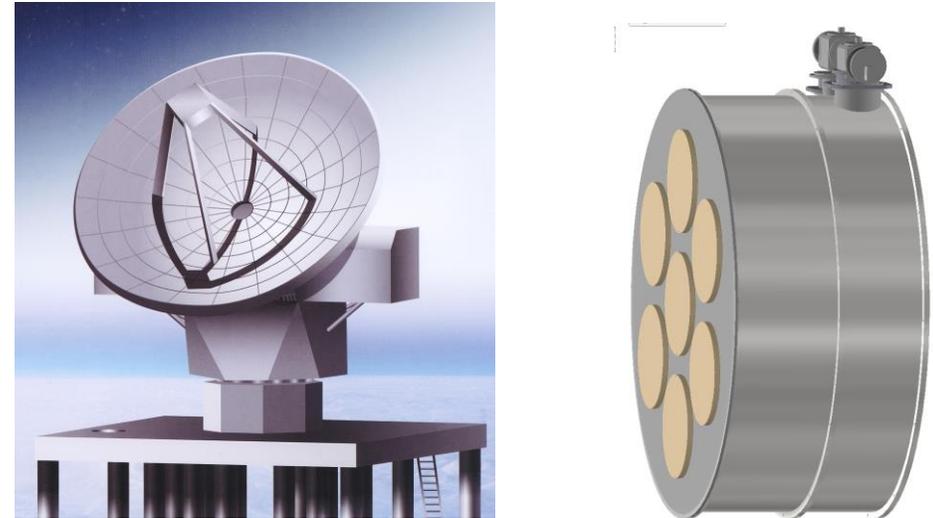
# 筑波大学が開発を進める電波カメラ開発計画

## NRO45m + 100-GHz帯カメラ



- 野辺山45m電波望遠鏡; 視野3'
- 100-GHz帯109素子連続波カメラ
- 焦点面アレイ: Siレンズ+検出器MKID
- 大質量星形成過程の理解

## 将来計画 (TCHoU南極天文学研究部門) 南極望遠鏡 + サブミリ波帯カメラ



- 南極テラヘルツ望遠鏡(10m級); 視野1°
- 300/400/500/850 GHz帯連続波カメラ
- 初期宇宙(再電離期)のダストに覆われた星形成銀河の探査
- 検出器MKIDの高感度化と多素子化の技術は  
100-GHz帯カメラと共通な開発項目

### 100-GHz帯電波カメラの開発技術

・・・サブミリ波・テラヘルツ波帯電波カメラに繋がる重要な基礎開発

# 100-GHz帯連続波カメラの開発目的

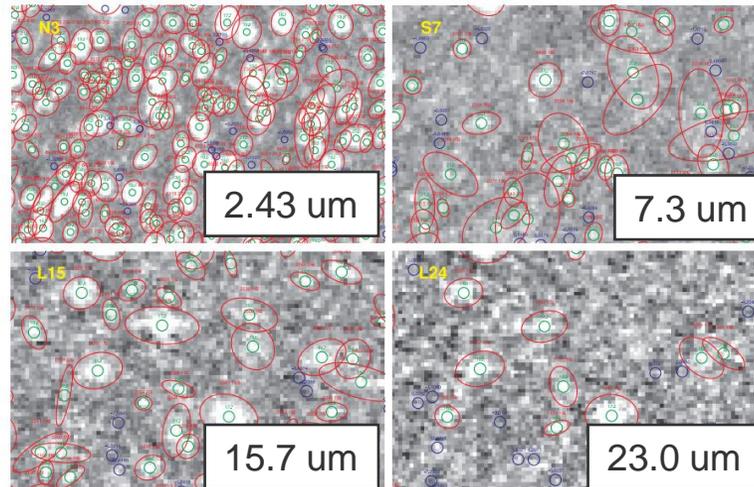
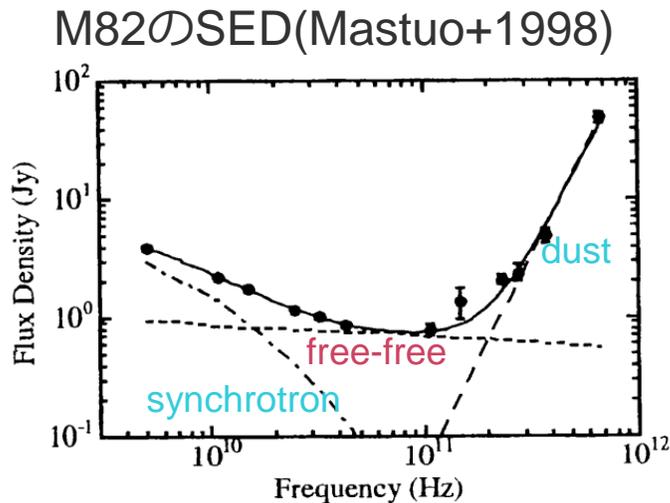
## 1. 大質量星形成領域( $H_{II}$ 領域)の探査 (銀河面サーベイ)

- 100-GHz帯 :  $H_{II}$ 領域からのfree-free放射が卓越→大質量星形成過程の理解へ

## 2. 遠方銀河の広域探査

- 赤外天文衛星あかりで見つかった遠方の銀河候補天体
  - => 100-GHzカメラ + 他のミリ波, サブミリ波, 赤外線観測装置と合わせた多色観測
  - => 赤方偏移やダスト温度などの同定、銀河の形成・進化の理解へ

あかり北黄極(NEP) deep survey (Wada+2008)



あかりによって検出された銀河候補天体  
(数字は各バンドの帯域中心波長)

カ学インダクタンズ検出器MKIDにより  
100GHz帯焦点面アレイの実現を目指す

# 検出器の感度目標

- 地上の電波望遠鏡のバックグラウンド限界：大気放射(光子)によって制限
- 検出器の感度の指標として**雑音等価電力(Noise Equivalent Power; NEP)**が用いられる
- 検出器MKIDがバックグラウンド限界に達している場合にNEPは次式で表される：

$$\text{NEP}_{\text{BLIP}} = \sqrt{\frac{2h\nu P_{\text{rad}}(1 + \eta_{\text{inst}}\bar{n}) + 4\Delta_0 P_{\text{rad}}/\eta_{\text{pb}}}{\eta_{\text{inst}}}}, \quad P_{\text{rad}} : \text{放射パワー}, \eta_{\text{inst}} : \text{装置の光学効率}$$

$$\bar{n} = \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_{\text{B}}T}\right) - 1}.$$

- 超過雑音がある場合には、 $\text{NEP}^2 = \text{NEP}_{\text{BLIP}}^2 + \text{NEP}_{\text{excess}}^2$
- $\text{NEP}_{\text{BLIP}}$ の見積もり：大気の放射を50 K, 周波数 $\nu = 100$  GHz, 装置の光学効率 $\eta_{\text{inst}} = 0.3$ のとき、  
=>  $\text{NEP}_{\text{BLIP}} \sim 2 \times 10^{-16} \text{ W/Hz}^{1/2}$

検出器で発生する余剰な雑音( $\text{NEP}_{\text{excess}}$ )を抑制し、  
 $\text{NEP}_{\text{BLIP}}$ の感度を得ることが検出器の開発における目標・ゴール

# 観測時間と光学効率の関係

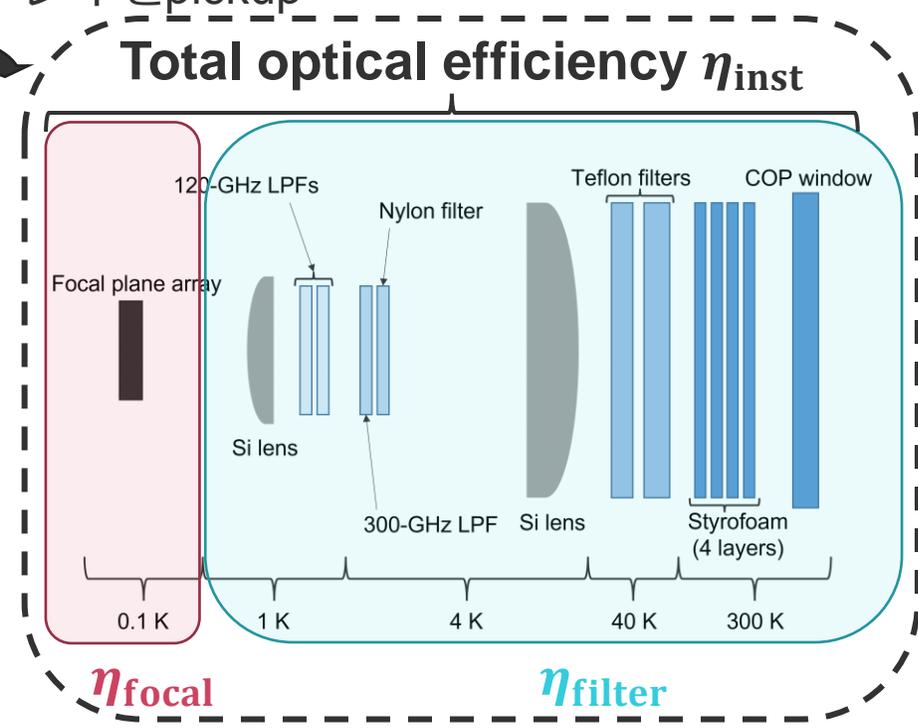
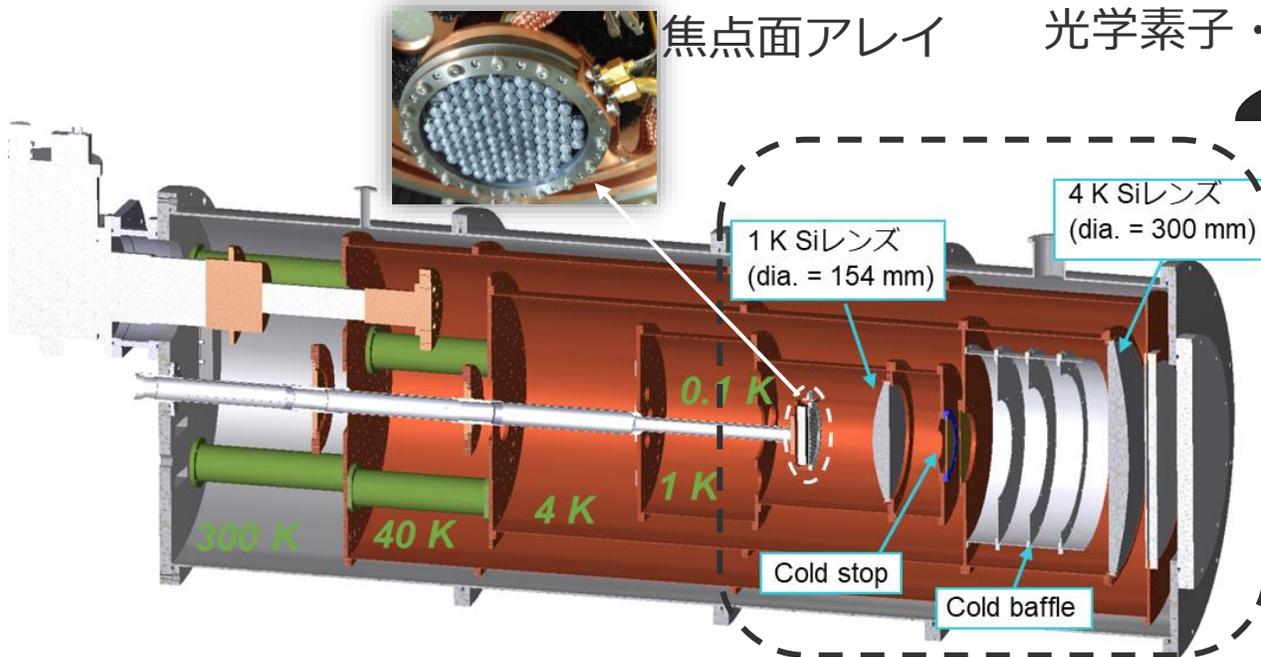
- 雑音標準偏差 $\sigma$ で点源を観測するために要する積分時間 $t_{\text{obs}}$ は

$$t_{\text{obs}} \propto \left( \frac{\text{NEP}}{\eta_{\text{inst}} \sigma} \right)^2 \quad (\text{NEP} \sim \text{NEP}_{\text{excess}} \text{のとき})$$

- 装置の光学効率 $\eta_{\text{inst}}$ はバックグラウンド限界 $\text{NEP}_{\text{BLIP}}$ (前頁)や観測時間 $t_{\text{obs}}$ に直結する重要な量
  - 光学効率 $\eta_{\text{inst}}$ が2倍 $\rightarrow$  観測時間 $t_{\text{obs}}$ が1/4に短縮

**感度の向上、観測時間の短縮には光学効率 $\eta_{\text{inst}}$ を高めることが重要**

# カメラの光学効率 $\eta_{inst}$ の内訳



式で表すと...

$$\eta_{inst} = \eta_{focal} \times \eta_{filter}$$

- $\eta_{inst}$  : カメラ全体の光学効率
- $\eta_{focal}$  : 焦点面アレイの光学効率
  - 焦点面Siレンズ+平面アンテナ+MKIDで構成
- $\eta_{filter}$  : 窓、フィルター、Siレンズの透過率

2018年時点の本カメラ :

- ✓ 装置全体の効率 $\eta_{inst}$ が約3%と低く、感度も×
- ✓ 焦点面アレイの低い光学効率が課題

# 目次

---

- 研究背景
- **MKIDの概要と課題**
- NbTiN-Al ハイブリッド型MKIDアレイの設計と製作
- ハイブリッド型MKIDを用いた100-GHz帯カメラの評価
- 望遠鏡での搭載試験 in 2021—2022
- まとめ

# MKIDでの光子検出

Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID; 工学インダクタンス検出器)  
= マイクロ波帯LC共振器を用いた超伝導検出器 (Day+2003)

◆ 共振周波数  $f_0$  :

$$f_0 = \frac{1}{4l} \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{4l} \frac{1}{\sqrt{(L_m + L_k)C}}$$

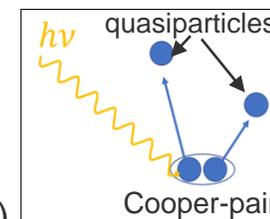
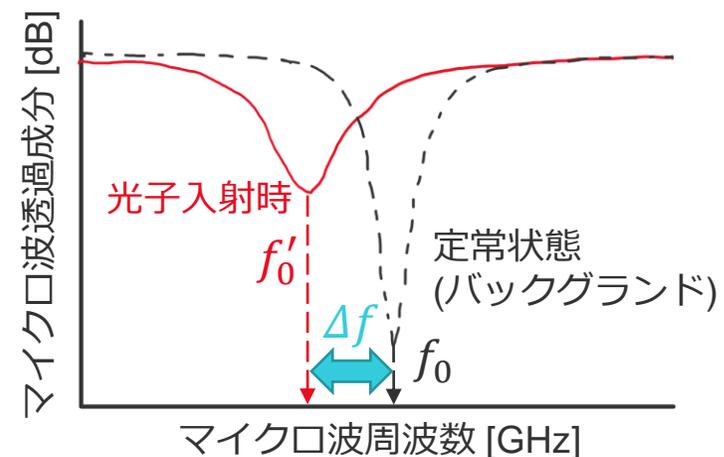
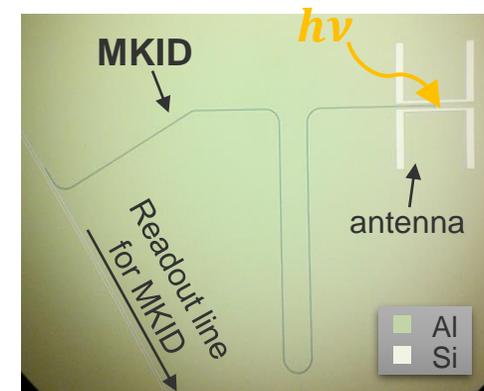
$l$ : 共振器の長さ,  $C$ : キャパシタンス,  $L_m$ : 共振器の形状で決まるインダクタンス,  $L_k$ : 工学インダクタンス(クーパ対密度に依存)

◆ 入射光子に対する応答 :

MKIDが光子のエネルギー( $h\nu > 2\Delta$ )を吸収

⇒ クーパ対の崩壊に伴って工学インダクタンス  $L_k$  が変化

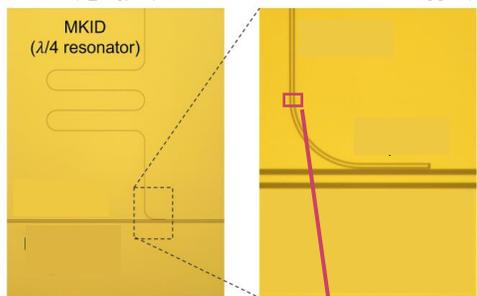
⇒ 共振特性(共振周波数  $f_0$ , 共振の鋭さを表すQ値)が変化



MKIDは共振特性の変化(共振周波数  $f_0$  やQ値)を読み出すことで入射光子を検出する

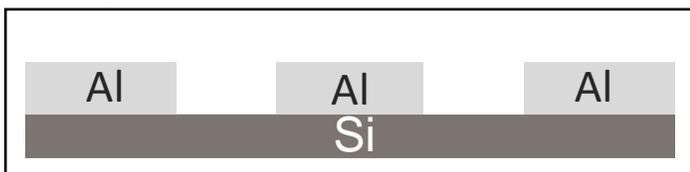
# ハイブリッド型MKIDによる光学効率の改善

超伝導検出器MKIDの構造

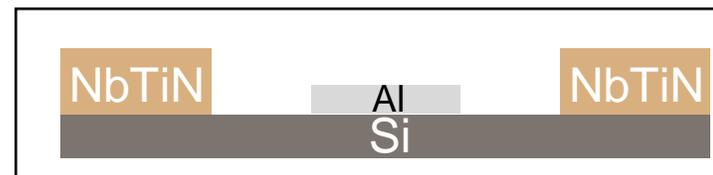


顕微鏡画像

MKIDの断面



従来型のAl単層のMKID



NbTiN+Alによるハイブリッド型MKID

## - [これまで] アルミニウム(Al)膜単層でのMKID

- 良いところ：単層ゆえエッチング1回のみ→製作が容易
- 課題1：GND面での光子散逸に伴う**低い光学効率@100 GHz帯**
- 課題2：誘電体由来とされる周波数依存性を持った1/f likeな雑音の存在(TLS雑音)

## - [現在の開発] Al膜 + 窒化ニオブチタン(NbTiN)膜によるハイブリッド型MKID

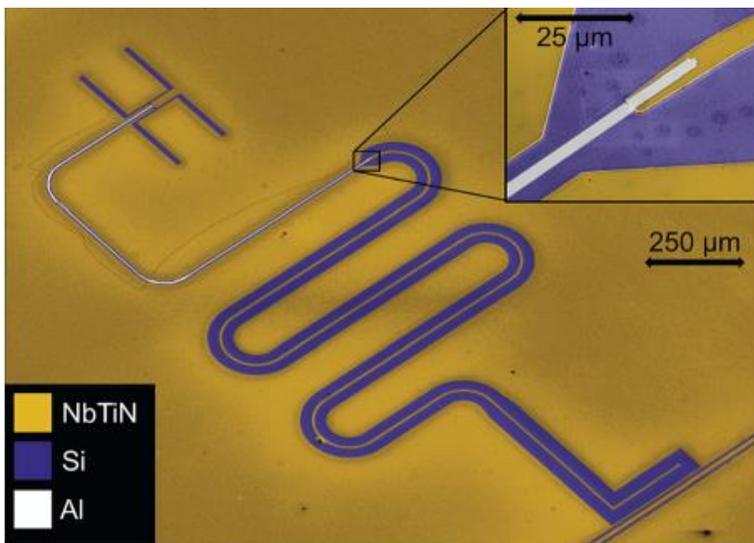
- 良いところ1：NbTiNの高い超伝導転移温度=GND面での光子散逸を抑制  
=> **光学効率(課題1)の改善(村山博士論文)**
- 良いところ2：構造を工夫することでTLS雑音(課題2)の抑制

# 目次

---

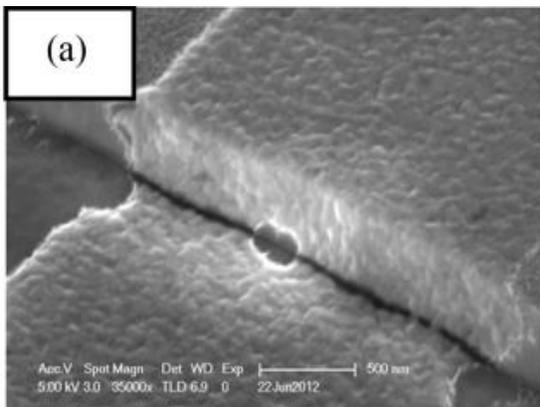
- 研究背景
- MKIDの概要と課題
- NbTiN-AI ハイブリッド型MKIDアレイの設計と製作
- ハイブリッド型MKIDを用いた100-GHz帯カメラの評価
- 望遠鏡での搭載試験 in 2021—2022
- まとめ

# NbTiN-Al Hybrid MKID(Janssen+2013)



Janssen+2013

Ferrari+2019



## ◆ ハイブリッド型MKID(Yates+2011, Janssen+2013)

バックグラウンド限界のMKIDを実証@ $\nu = 350$  GHz

✓ **共振器CPW中心線を2分割** (Al + NbTiN):

=> TLS雑音抑制と高感度な光子( $h\nu > 2\Delta_{\text{Al}}$ )検出へ

✓ **GND面のNbTiN化**: 平面アンテナ周辺での損失低減

- Al: ギャップ周波数 $2\Delta_{\text{Al}}/h \sim 90$  GHz

- NbTiN:  $2\Delta_{\text{NbTiN}}/h \sim 1.1$  THz  $\gg \nu = 350$  GHz

⇒ 高い光学効率 $0.8 \pm 0.2$ を実現(Yates+2011)

## ◆ 製作の課題

↑100 GHz帯でも光学効率の改善に期待!

Al膜の断線@NbTiN-Si界面(Ferrari+2019)

✓ SiとNbTiNの仕事関数の違いがAlの浸食が促進?

比較的製作が容易であろう

GND面→NbTiN & CPW中心線→Al (非2分割)

とした100-GHz帯MKIDを開発し光学効率の向上を目指す

# ハイブリッド型MKIDアレイの設計

## ◆ Al膜単層のMKIDアレイと共通部分

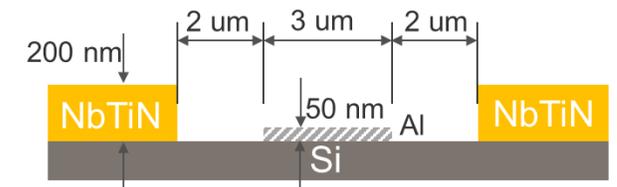
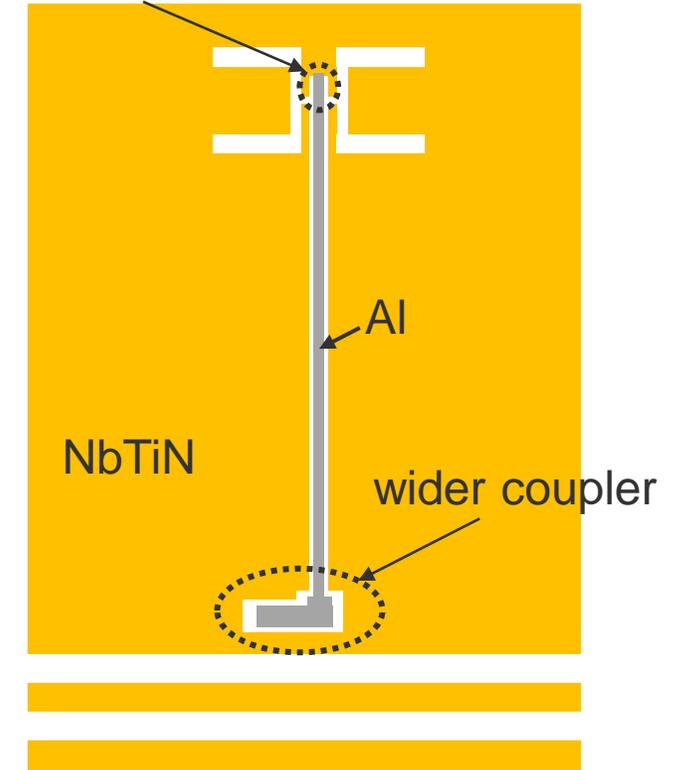
- 基板：高抵抗Siウエハ(3inch,  $>10\text{k}\Omega\text{cm}$ , thickness = 380  $\mu\text{m}$ )
- MKIDs素子数：109素子
  - 焦点面3インチ上の直径 $2\lambda$  ( $\cong 6\text{ mm}$ )の Siレンズアレイの数に対応

## ◆ 変更部分・新たな設計箇所

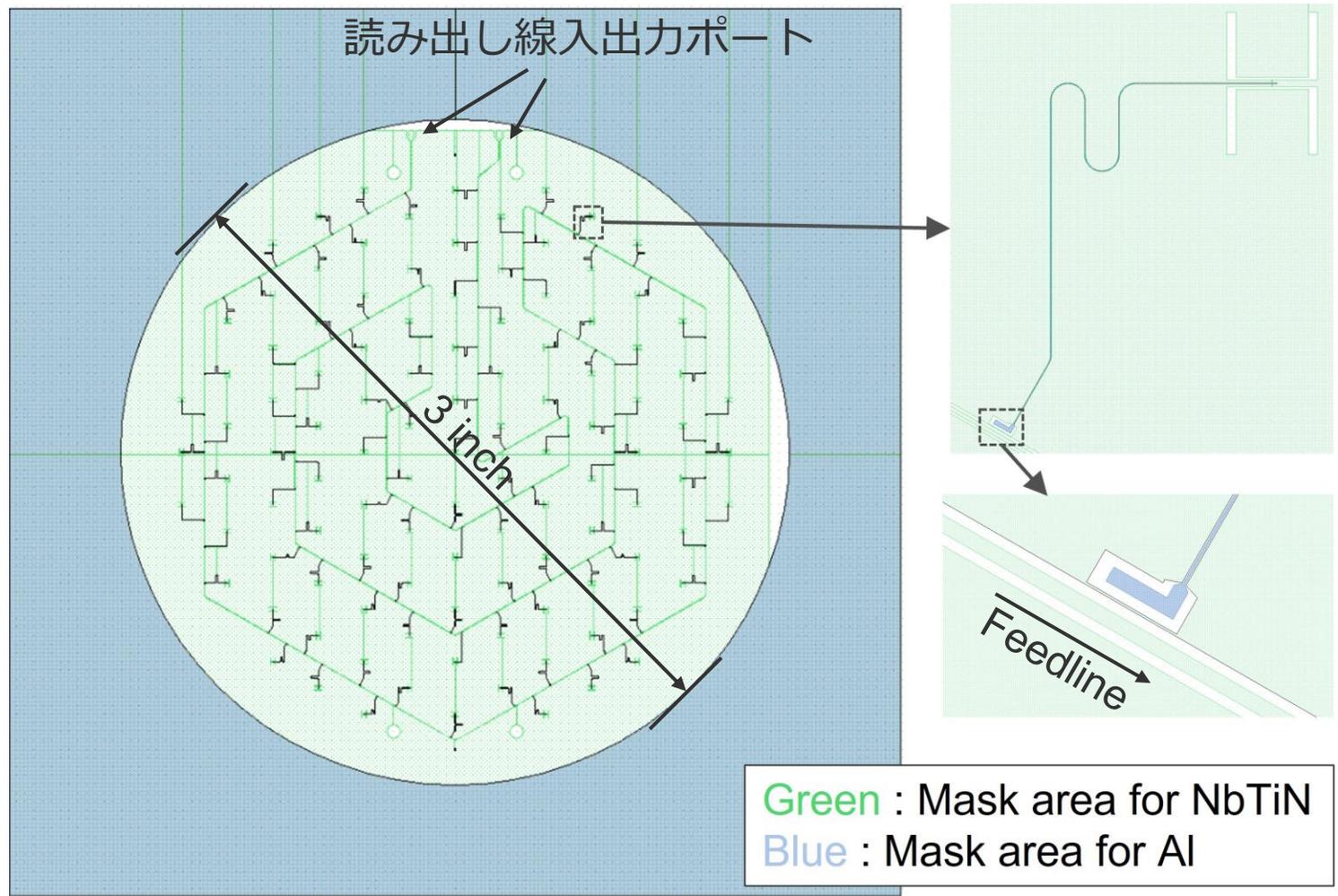
- GND面とfeedline材料：NbTiN
- 共振器CPW材料：Alのみ (製作難度 down)
- 膜厚：200 nm (NbTiN), 50 nm (Al)
- ショートスタブ [Ferrari+2017]:
  - 平面アンテナと共振器CPW間のインピーダンスマッチング
- 幅が広めのカプラー(低周波雑音対策)

➡ 電磁界シミュレーションHFSSで最適化し設計解を得た

short-circuit stub



# フォトマスクデザイン(アライナー用)



カメラの焦点面=3インチの全面に  
109素子を配置(従来型と同様)

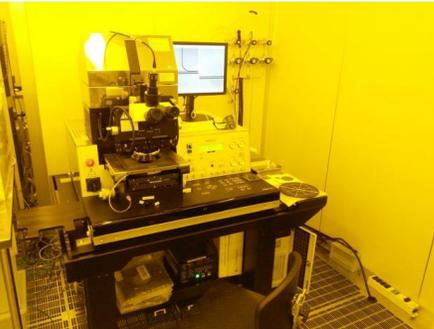
4-inch x 4-inch (drawn by LayoutEditor)

# 製作のフロー

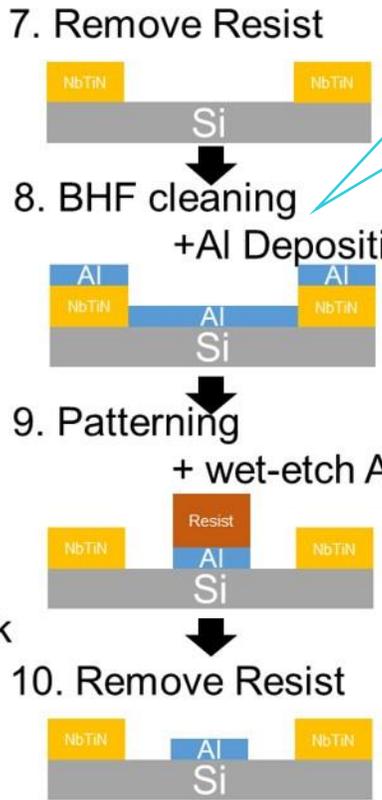
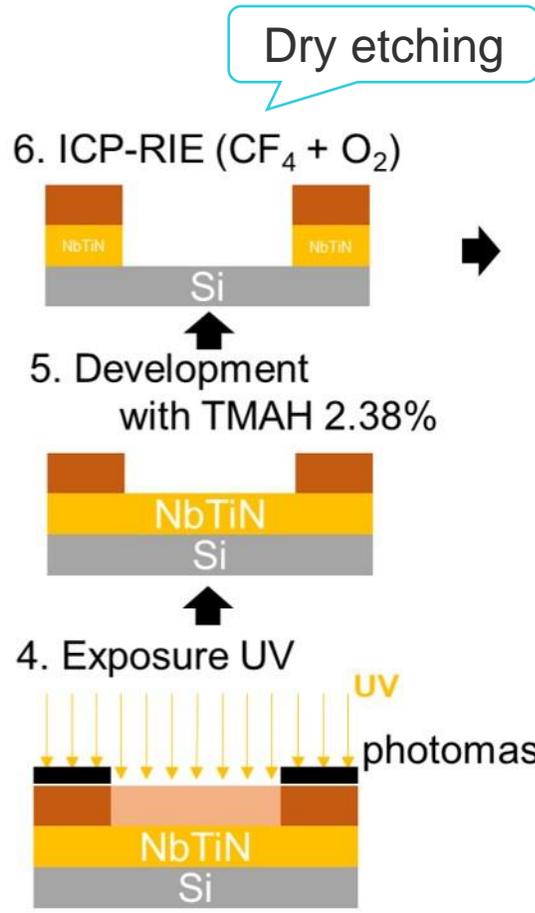
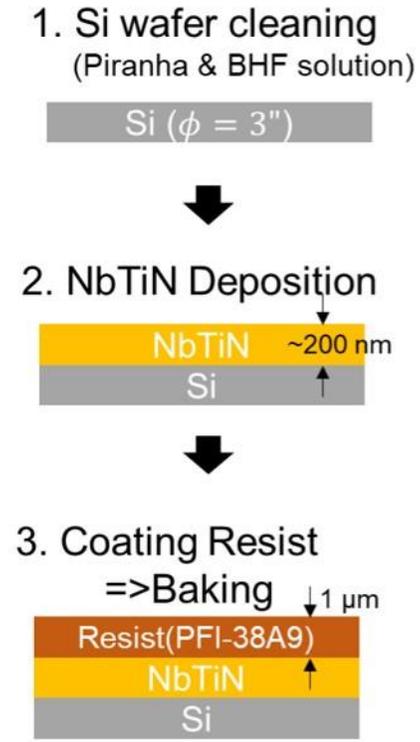
- ピラニア溶液 : 有機物除去
- BHF : 酸化膜除去



(a) Spincoater 1H-D7, from MIKASA

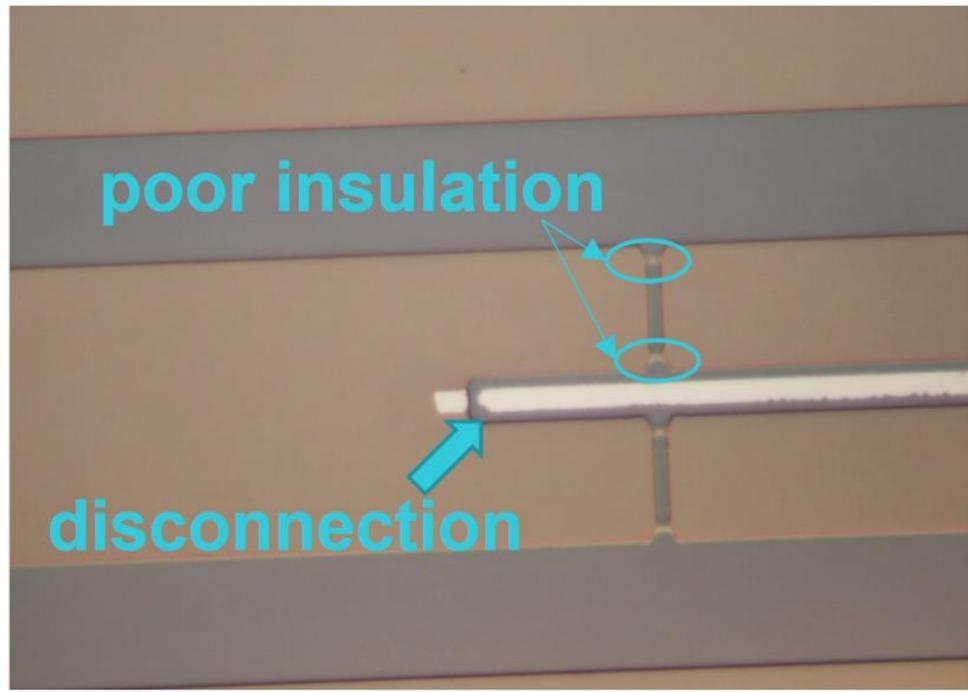


(b) Mask aligner MA6, from SUSS.

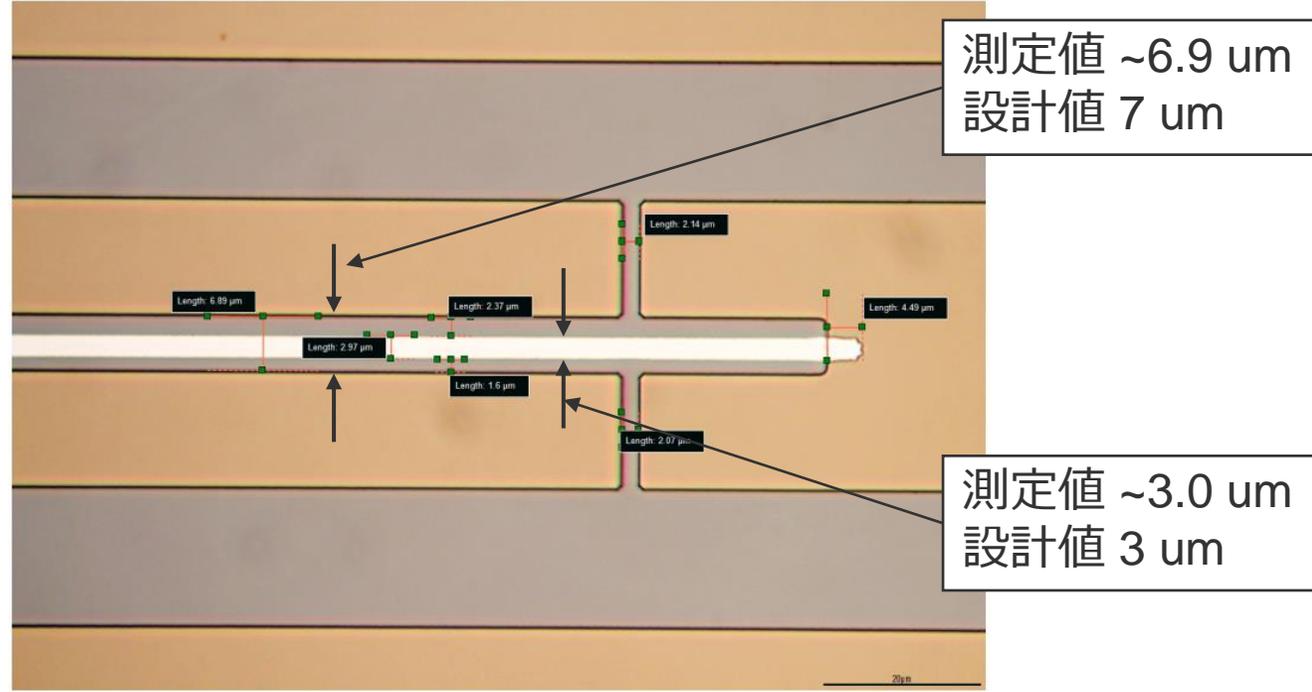


# 製作条件の最適化

最適化前のアンテナ結合点



レジストの膜厚・露光量の最適化後



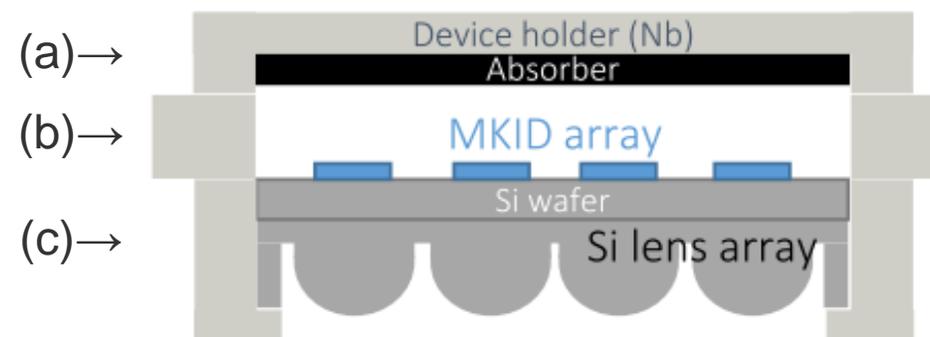
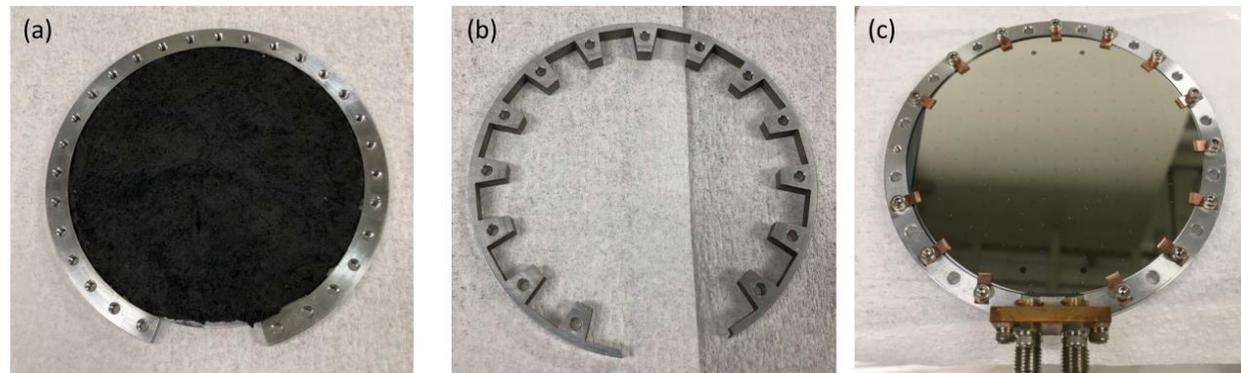
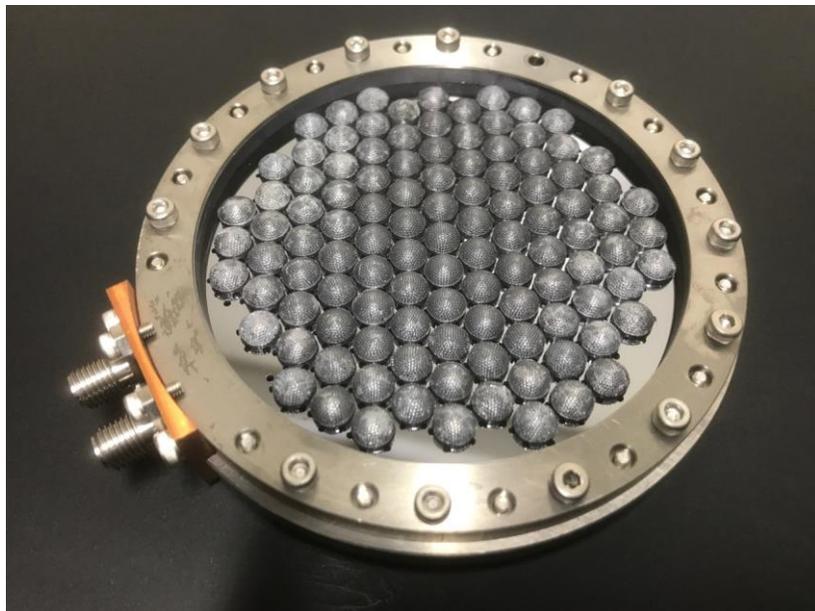
レジストの膜厚や露光量の最適化により設計通りのパターンが作れる条件を得た

# SEM画像：ハイブリッド型MKID

未発表の図表

製作条件の最適化によって3インチ基板全面に渡って  
良好なパターンのNbTiN/AIハイブリッド型MKIDアレイの製作することができた

# デバイスホルダーへのインストール



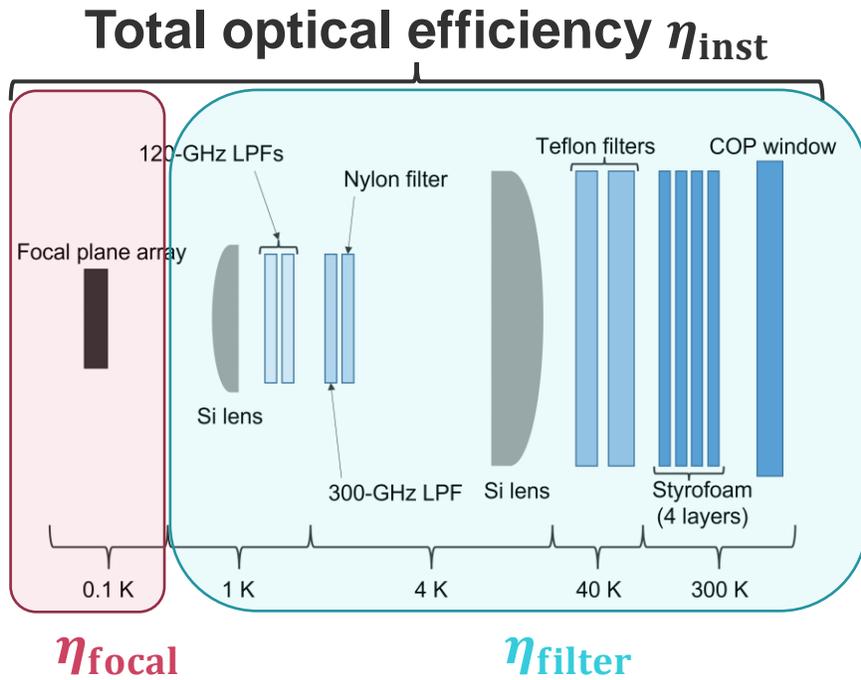
焦点面Siレンズ + 平面アンテナにより  
検出器MKIDとカメラ冷却光学系を結合

# 目次

---

- 研究背景
- MKIDの概要と課題
- NbTiN-Al ハイブリッド型MKIDアレイの設計と製作
- ハイブリッド型MKIDを用いた100-GHz帯カメラの評価
- 望遠鏡での搭載試験 in 2021—2022
- まとめ

# 光学効率の評価

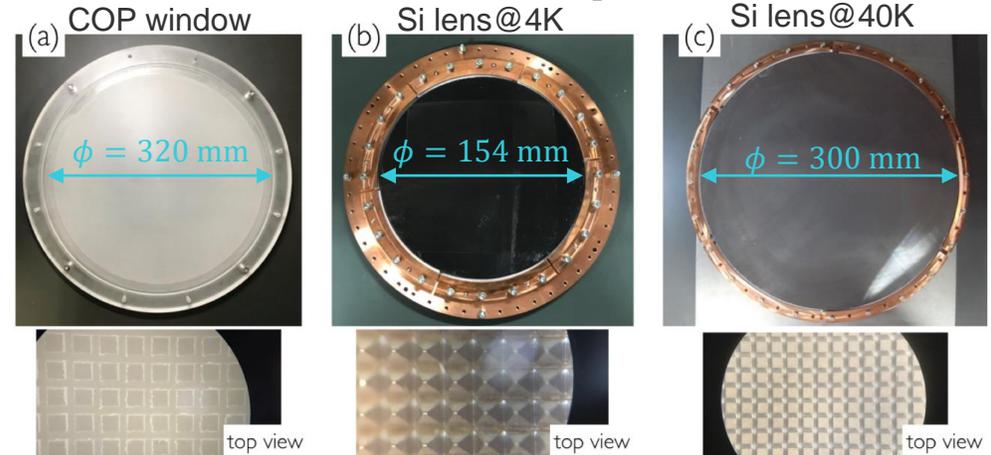


$$\eta_{inst} = \eta_{focal} \times \eta_{filter}$$

未発表の図表

## ◆ 2018—2020年にかけての改修

- MKIDのハイブリッド化 [村山博士論文]
- 真空窓・Siレンズの反射防止加工 [Nitta+2020, 樋川修論2020]



透過率98%  
@ 90—110 GHz

反射率1% @ 90—110 GHz

- ✓ 装置全体で7倍の効率改善
- ✓ 約1/50の観測時間で  
同じ深さの観測が可能に！

# 感度NEPの改善

---

# 目次

---

- 研究背景
- MKIDの概要と課題
- NbTiN-Al ハイブリッド型MKIDアレイの設計と製作
- ハイブリッド型MKIDを用いた100-GHz帯カメラの評価
- 望遠鏡での搭載試験 in 2021—2022
- まとめ

# 望遠鏡での試験観測(2021—2022)

## ◆2021年の試験(5—6月)

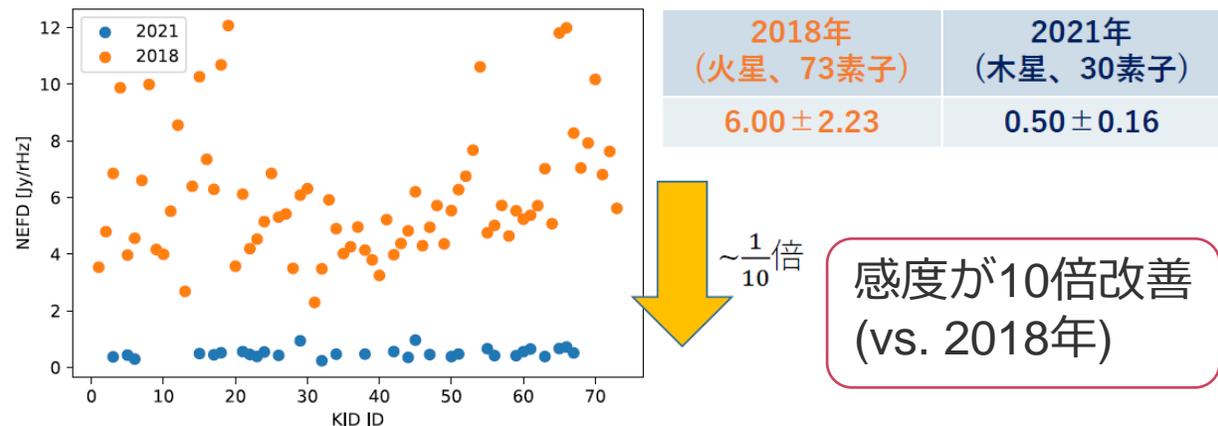
- 装置+望遠鏡の性能評価  
宮澤修論2022, 野地修論2022など

## ◆2022年の試験(5—6月)

- 星形成領域の科学観測
  - 永井(NAOJ), 李(筑波大M1), 石崎(同B4)
  - W49, W51 etc.
- クエーサー3C278
  - ビームパターン評価 / 李
- 線形応答性の評価 / 村山

など、現在試験観測結果の解析中

## 感度(雑音等価フラックス密度NEFD)の評価(宮澤修論)



## 星形成領域W49の観測結果(石崎さん)

# 望遠鏡からのカメラ搬出(2022.09.07—08)

アップデートに向けて実験室へお持ち帰り

国立天文台野辺山観測所Twitterより



# まとめ

- ミリ波サブミリ波帯での天体の探査には高感度な撮像装置、電波カメラの開発が重要
- 筑波大学を中心として野辺山望遠鏡用100-GHz帯カメラを開発中
  - カメラの高感度化(NEPの向上)、また観測時間短縮のために、より高い光学効率を持つNbTiN-AIによる100-GHz帯ハイブリッド型MKIDアレイを開発した
  - 従来型の109素子AI単層MKIDアレイと比べると、109素子ハイブリッド型MKIDアレイは焦点面アレイの光学効率が2.6倍改善した。光学系の改修と合わせることで、カメラ全体で感度NEPを4倍改善
  - 2021—2022 年にかけて野辺山45 m電波望遠鏡での搭載試験  
=> 望遠鏡と組み合わせたカメラの性能評価や星形成領域の科学観測を実施
- 今後の課題：
  - 観測結果の解析
  - 実験室に持ち帰ったカメラの改修：  
検出器 + 読み出し系のアップデートにより 大気放射で制限される感度限界到達を目指す