

宇宙マイクロ波背景放射観測衛星LiteBIRD に向けた多素子超伝導共振器カメラの開発 と低雑音化

19th March., 2015

唐津 謙一 (NAOJ)

関本 裕太郎, 野口 卓, 新田 冬夢, Agnes Dominjon (NAOJ)

関根 正和, 関口 繁之, 岡田 隆, Shu Shibo (東京大学)

成瀬 雅人 (埼玉大学)

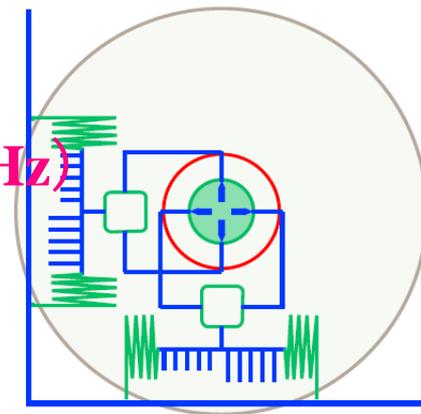
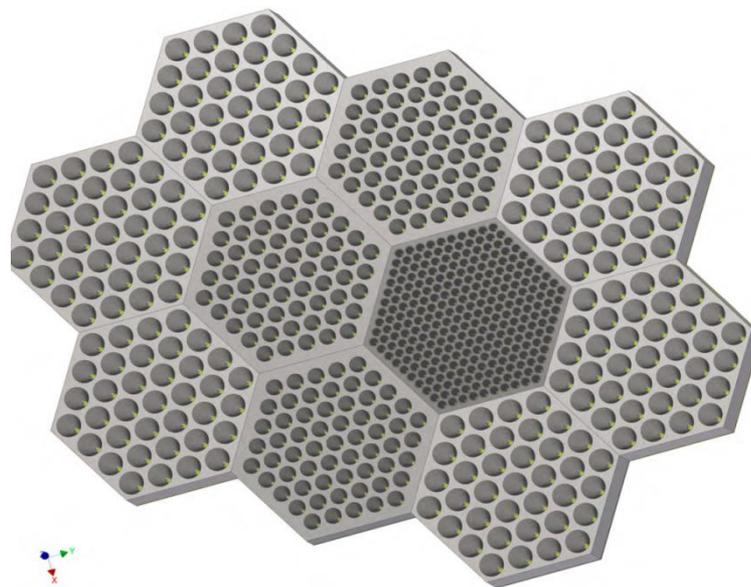
他LiteBIRD Working Group

Contents

- LiteBIRDの要求性能
- Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)
- これまでの結果
- 今回の結果
 - Light-tightセットアップ
 - 測定結果
 - 以前の結果との比較
- まとめと今後

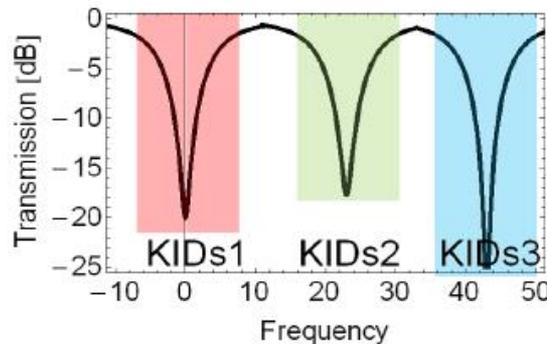
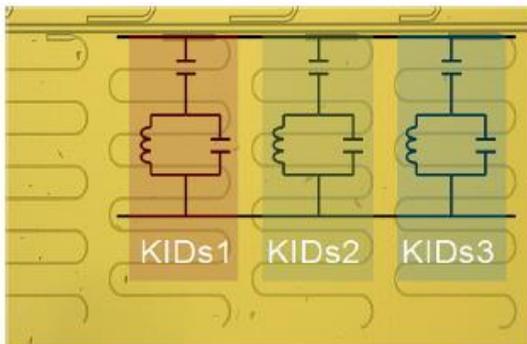
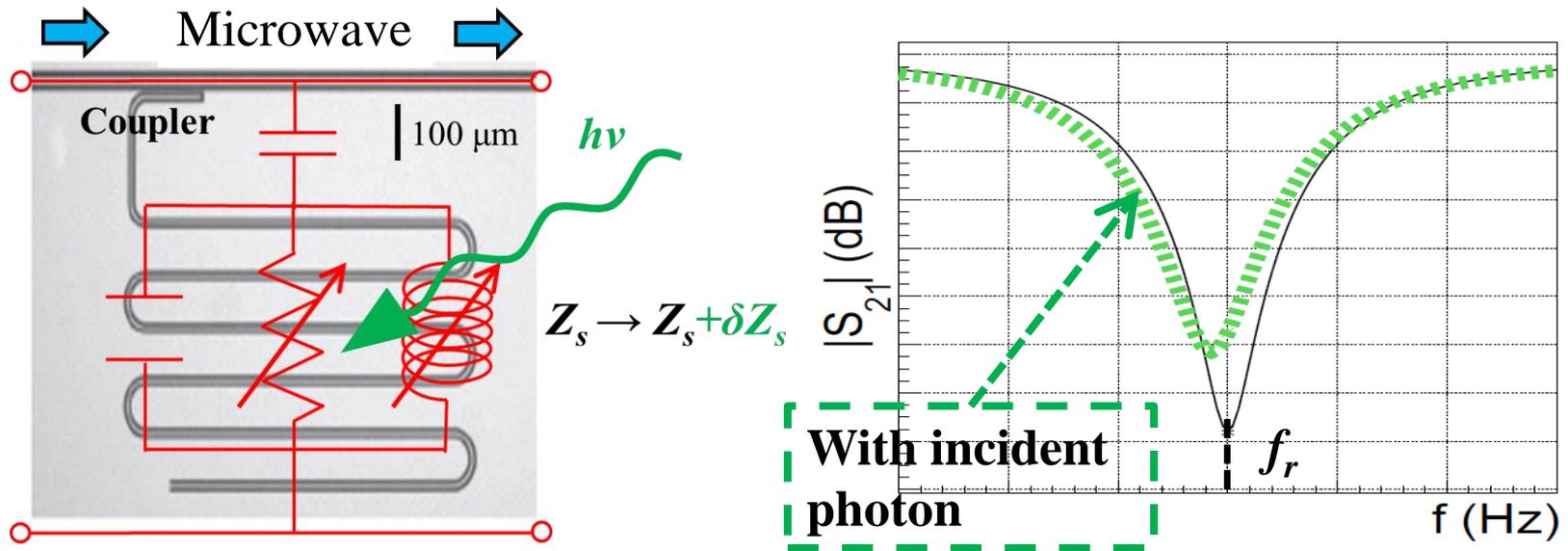
LiteBIRDの要求性能

- 観測帯域： 50 – 320 GHz
- 偏光測定精度
 - Diff. gain
 - Diff. beam width
 - Diff. beam pointing
 - Diff. beam ellip.
 - 指向精度
 - 絶対ゲイン
 - ビームサイズ安定度
 - 角度較正
- 感度
 - 光子雑音限界以下 ($2 \times 10^{-18} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 150 GHz)
 - 1/fノイズ ($f_{\text{knee}} < 20 \text{ mHz}$)
- 多素子アレイ
 - 約2000素子



Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)

- ✓ 入射光子による超伝導表面インピーダンスの変化を共振器を利用して検出する



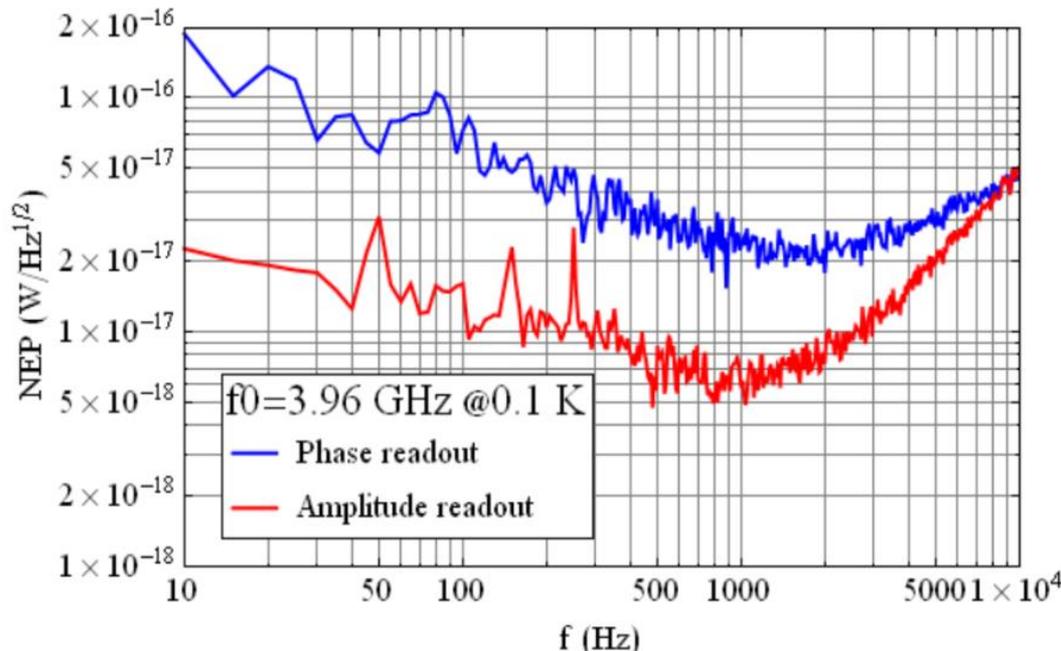
周波数方向の多重化が可能

→ 1000素子規模を1本の信号線で読み出せる

これまでの結果

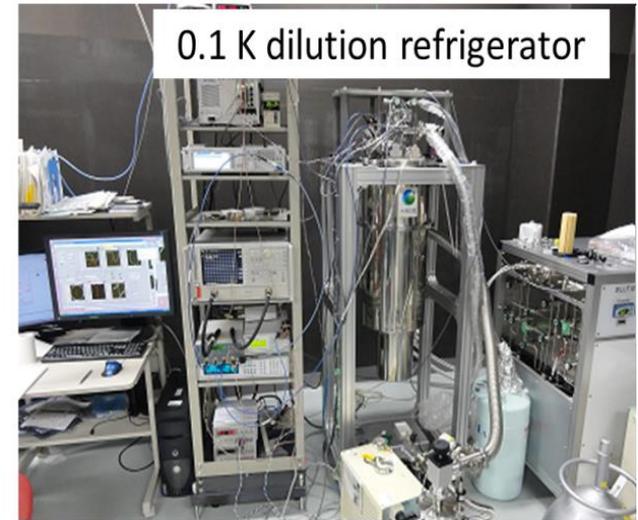
高品質 Al 薄膜

- ✓ τ_{qp} (準粒子寿命) を長くする
→ MBE (Molecular Beam Epitaxy) :
Al(111) on Si(111), (Residual Resistive Ratio) > 20
- ✓ 0.1 K 希釈冷凍機を用いた性能評価
- ✓ Electrical NEP of 6×10^{-18} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ($Q_i \sim 2e+6$, $\tau_{qp} \sim 500 \mu\text{sec}$)



M. Naruse et al., JLTP 167, 373-378, 2012
M. Naruse, Ph. D Thesis, The Univ. of Tokyo, 2012

$$NEP_{g-r} = \frac{2\Delta}{\eta} \sqrt{\frac{N_{qp}}{\tau_{qp}}}$$

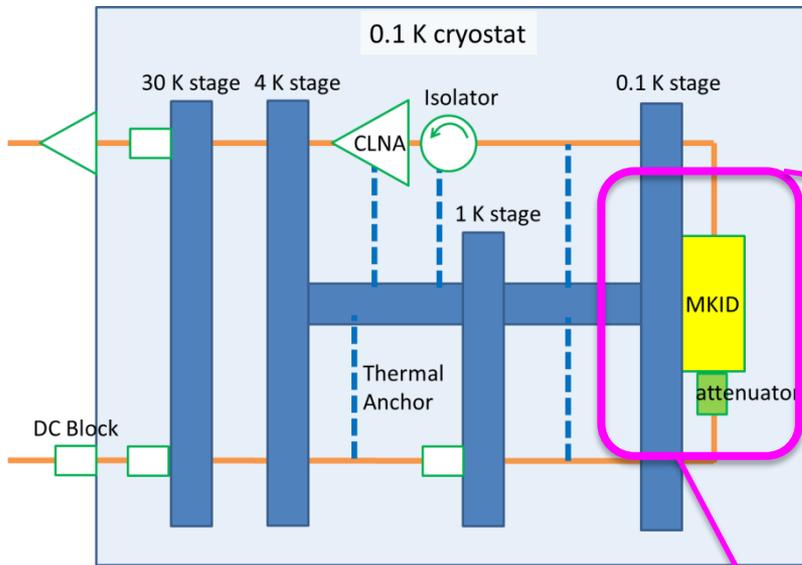


- ✓ MBE膜とEB (Electron Beam) 蒸着膜で性能に大きな差はない

✓ Light-tight セットアップ
が必要

Ref: J. Baselmans et al., AIP Conf. Proc. 1185, 1, 160-163, 2009

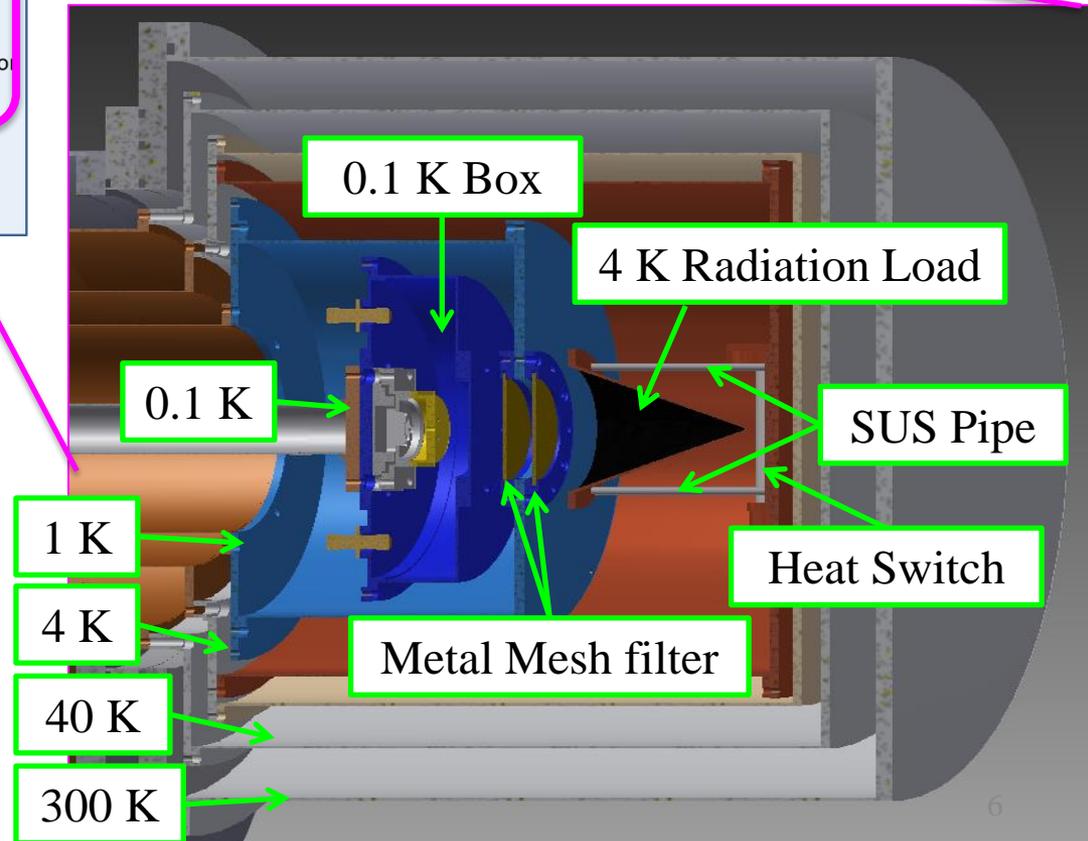
Light-tightセットアップ



<迷光対策>

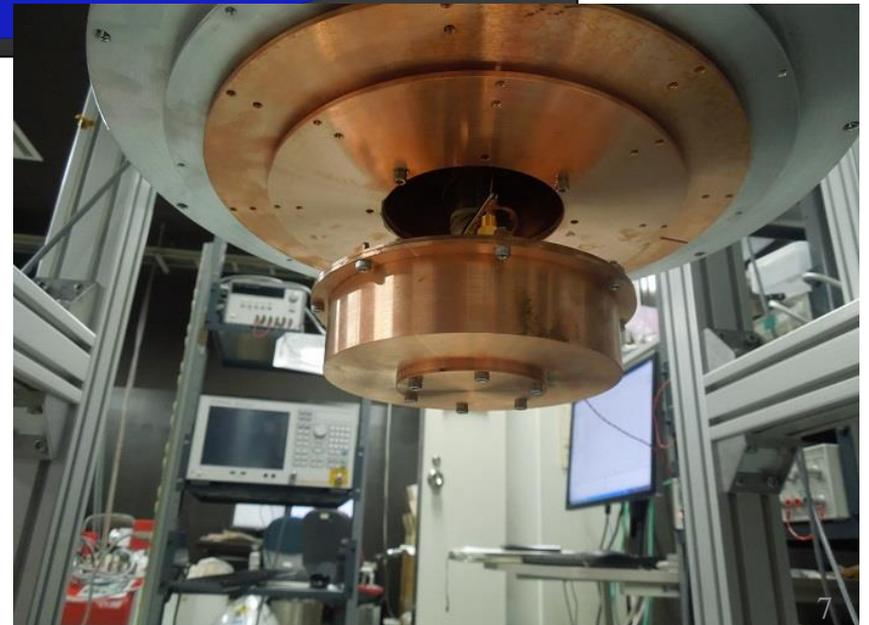
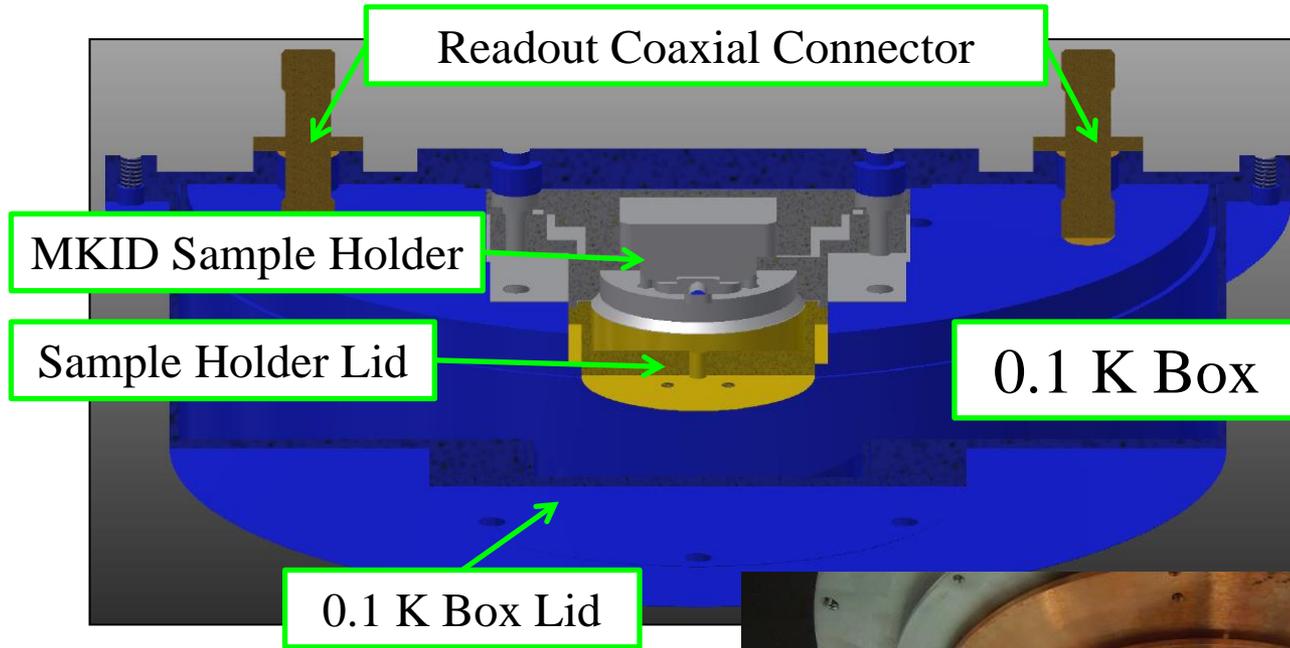
- ✓ 輻射：box-in-box サンプルホルダー
- ✓ 信号線経由：low pass filter

- ✓ ダーク / 光照射 両方の測定が可能なデザイン
- ✓ 高温ステージ(1 Kや4 K)から0.1 Kへの輻射を抑制する

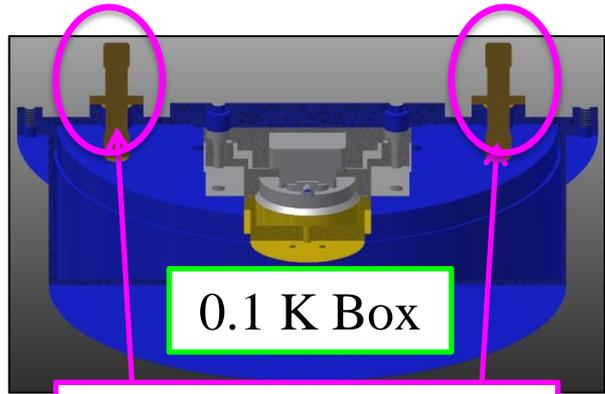


S. Sekiguchi, M Thesis, The Univ. of Tokyo, 2014

Light-tight セットアップ (Box-in-Box)

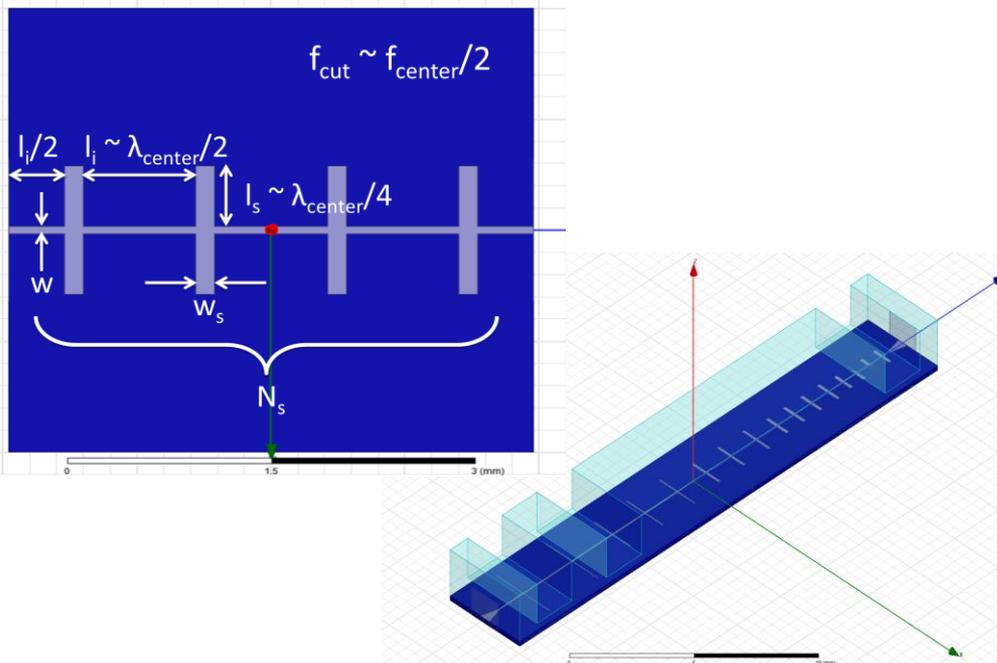
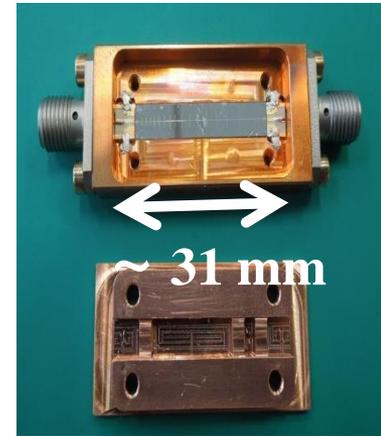


Light-tight セットアップ (Low Pass Filter)

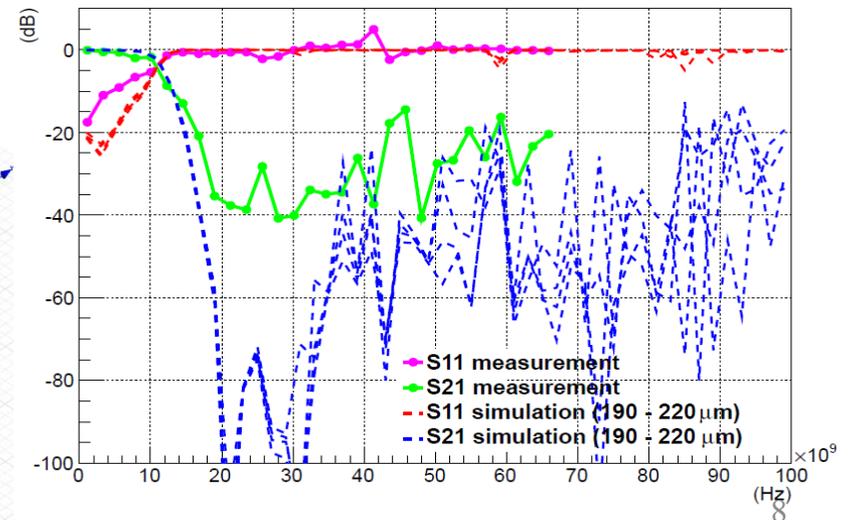


ここに広帯域Low Pass Filterが必要

- ✓ 10-100 GHz帯を抑制するために3種類のサイズのスタブフィルターを組み合わせる
- ✓ 材質: Nb (100 nm) on Si wafer (200 μm)
- ✓ フィルターと筐体はNAOJで作製



S parameters of Stub Filter



Electrical (Dark) NEP測定

$$NEP = \sqrt{S_X} \left(\frac{\eta \tau_{qp}}{\Delta} \frac{\partial X}{\partial N_{qp}} \right)^{-1} \sqrt{1 + (2\pi f \tau_{qp})^2} \sqrt{1 + (2\pi f \tau_{res})^2}$$

$$\frac{\partial A}{\partial N_{qp}} = \frac{\partial A}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial N_{qp}}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial N_{qp}} = \frac{4Q_r}{f_r} \frac{\partial f_r}{\partial N_{qp}}$$

- $X = A$ (amplitude) or θ (phase)
- $\eta = 0.57$: 準粒子生成効率 (Ref: A. Kozorezov et al., Phys. Rev. B 61, 11807-11819, 2000)
- $\Delta = 3.52 \text{ kT}_c/2$, $\tau_{res} = Q_r/\pi f_r$: resonator ring-time (<10 usec)

<測定量>

$$f_r, Q_r$$

MKIDの共振測定から計算

$$\frac{\partial f_r}{\partial N_{qp}}$$

f_r の温度依存性から見積もる

$$S_X$$

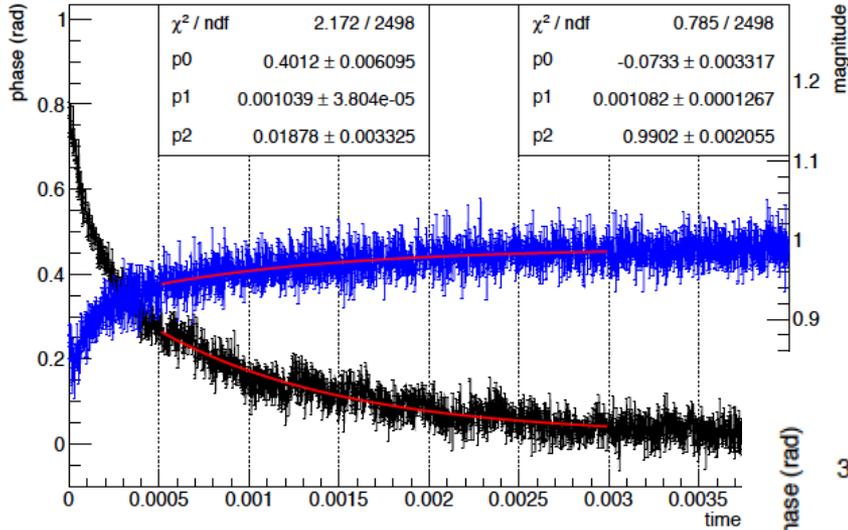
ノイズのパワースペクトル
(unit: 1/Hz or rad²/Hz)

$$\tau_{qp}, \frac{\partial A}{\partial \theta}$$

宇宙線イベントから見積もる

宇宙線イベント

Phase of t_{21} (norm), $F_{\text{center}}=3.078610$ GHz, AttIn=-20.0 dB, T=77.1 mK, Run=1106

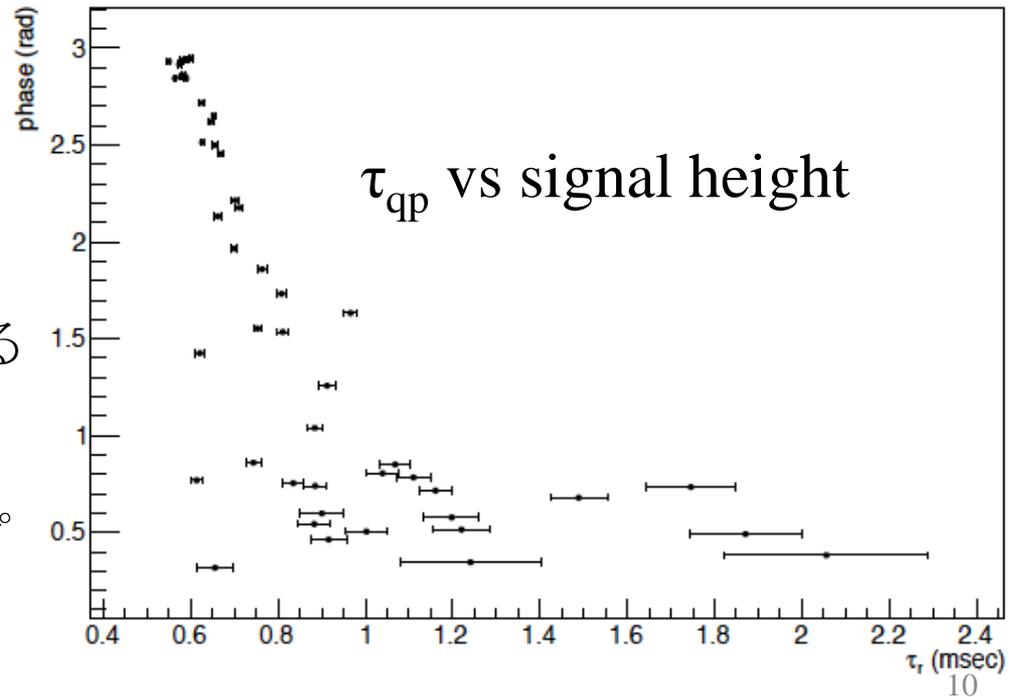


- ✓ 宇宙線イベントを使って τ_{qp} (準粒子寿命) を測定
- ✓ Event rate $\sim 50\text{-}60 / 3$ hours

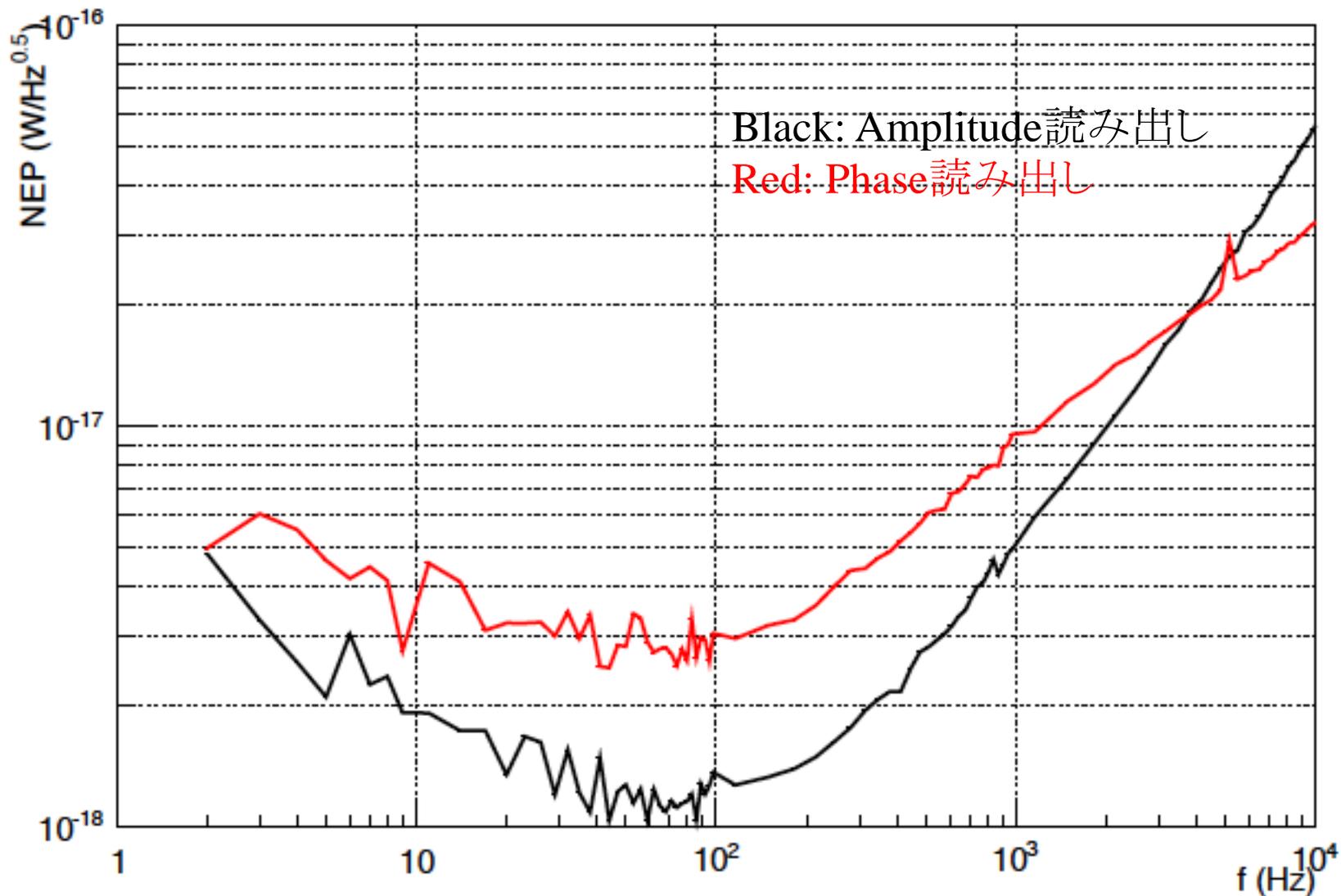
Black: Phase読み出し

Blue: Amplitude読み出し

- ✓ 大きな信号ほど小さな τ_{qp} になる
- ✓ 2つの緩衝プロセス(時定数)があるように見える
- ✓ 大きな信号ほど短い時定数のプロセスが支配的になる？



Electrical (Dark) NEP結果



以前の結果との比較

	Thickness (nm)	RRR	τ_{qp} (us)	Q_r	$d\theta/dN_{qp}$	$dA/d\theta$	dA/dN_{qp}	$S_A @ 1 \text{ kHz}$ (dBc/Hz)
Previous (MBE)	160	18	450	$6e+4$	$1.2e-6$	0.26*	$3.1e-7$	-88
SRON (sputter)	40	5	3000	$4e+4$			$5e-7$	-102
This work (sputter)	50	3	1000	$9e+4$	$8.7e-6$	0.2	$1.7e-6$	-92

SRON data from P. Visser et al., PRL 106, 167004, 2011

<Dark NEP>

MBE = $6e-18 \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$

SRON = $4e-19 \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$

This work = $1e-18 \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$



- ✓ dX/dN_{qp} はある程度設計でコントロール可能
- ✓ Q_i が大きくても、 Q_c が感度を制限する

$$\frac{dA}{dN_{qp}} = -\frac{2\alpha Q_r}{|\sigma|V} \frac{d\sigma_1}{dn_{qp}} \quad (\alpha = L_k / (L_g + L_k))$$

$$\frac{d\theta}{dN_{qp}} = -\frac{2\alpha Q_r}{|\sigma|V} \frac{d\sigma_2}{dn_{qp}} \quad \frac{1}{Q_r} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_c}$$

SRON程の感度はないがLiteBIRDの要求性能を満たす

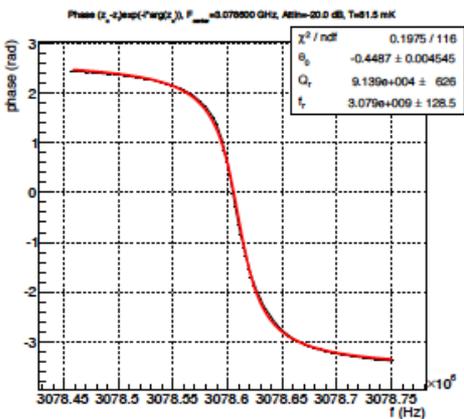
まとめと今後の展望

- 国立天文台ATCではLiteBIRDに向けたMKIDの開発を進めている(関連ポスター: V112b)
- 感度を改善するために, MKID測定系の改良(Light-tightセットアップの構築)を行った
 - **Dark NEP: $\sim 1e-18$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を達成**
 - まだ改善の余地はありそう(Low pass filterまわり)
- 今後の展望
 - 光照射下におけるNEP (Optical NEP) の測定
 - 膜質と感度の関係についてのstudy (設計段階におけるMKID感度の最適化手法の確立)
 - Horn coupled MKID Cameraの性能評価

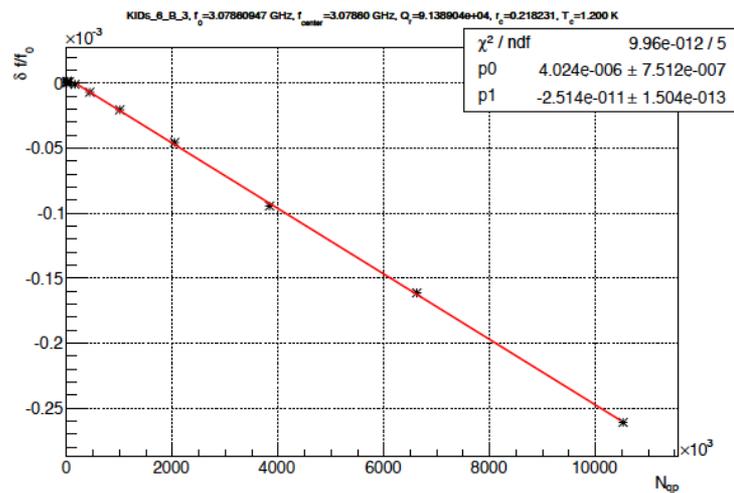
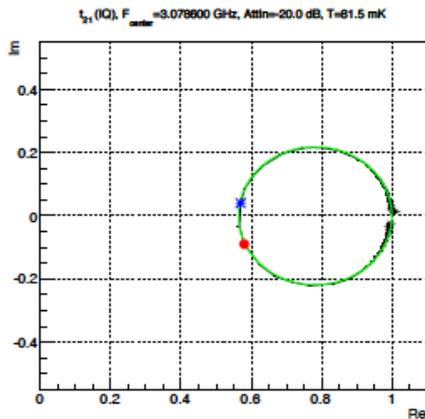
Backup

測定結果

$$f_r, Q_r$$

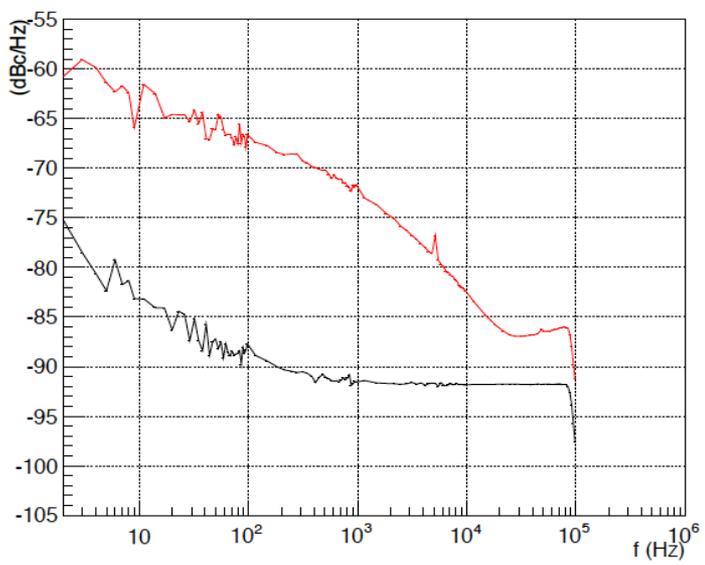


$$\frac{\partial f_r}{\partial N_{qp}}$$

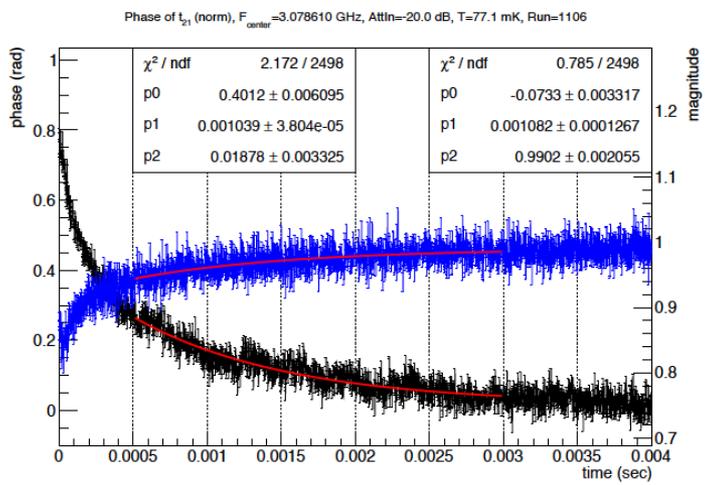
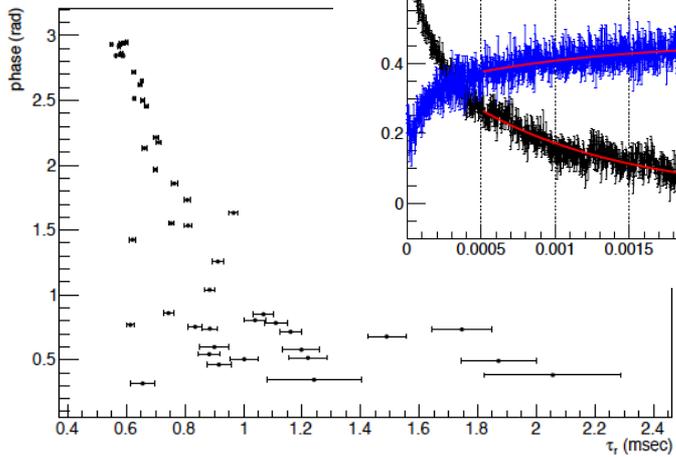


$$S_X$$

FFT, $F_{\text{center}}=3.078610 \text{ GHz}$, $\text{AttIn}=-20.0 \text{ dBm}$, $T=81.2 \text{ mK}$



$$\tau_{qp}, \frac{\partial A}{\partial \theta}$$



Measurement of Electrical (Dark) NEP

