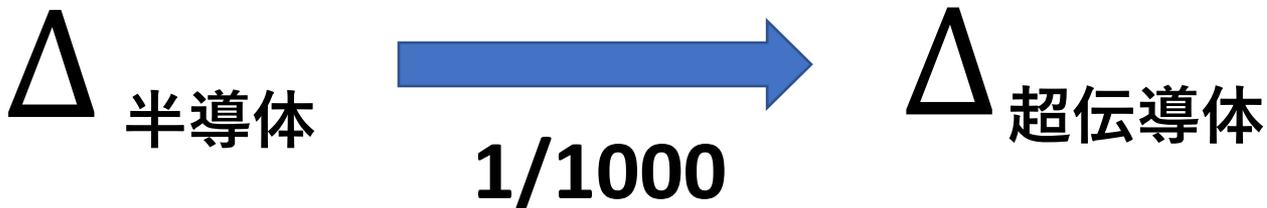


超伝導検出器 MKID における TLS ノイズの抑制研究

京大理 **末野 慶徳**

大谷知行 (理研) 小栗秀悟 (JAXA) 沓間弘樹 (理研)
鈴木惇也 田島治 本多俊介 (IAC) 美馬覚 (理研)

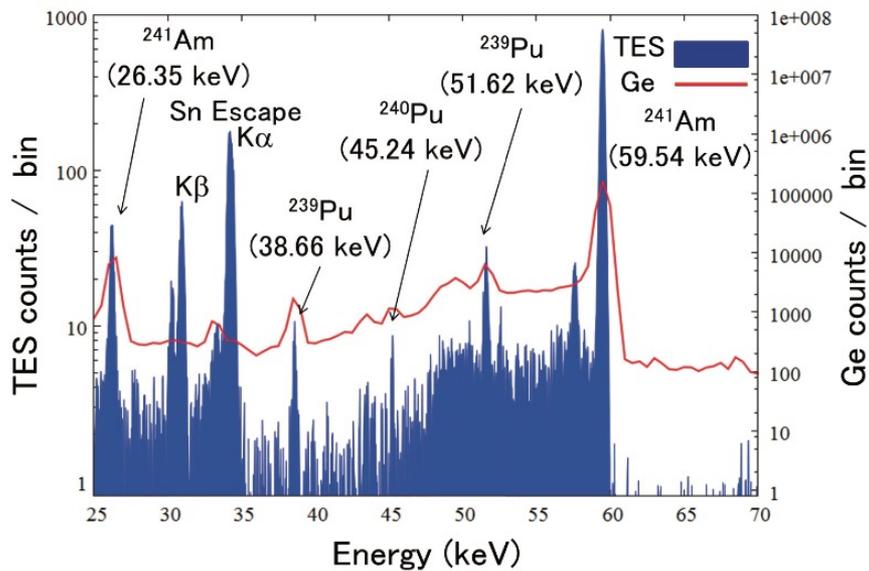
超伝導検出器



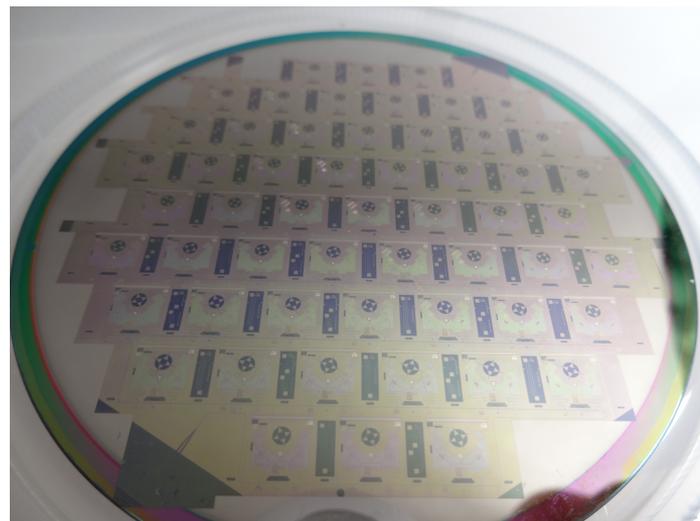
高いエネルギー分解能での放射線計測

低いエネルギー閾値

超伝導 vs 半導体



ミリ波計測 (≈ 100 GHz)

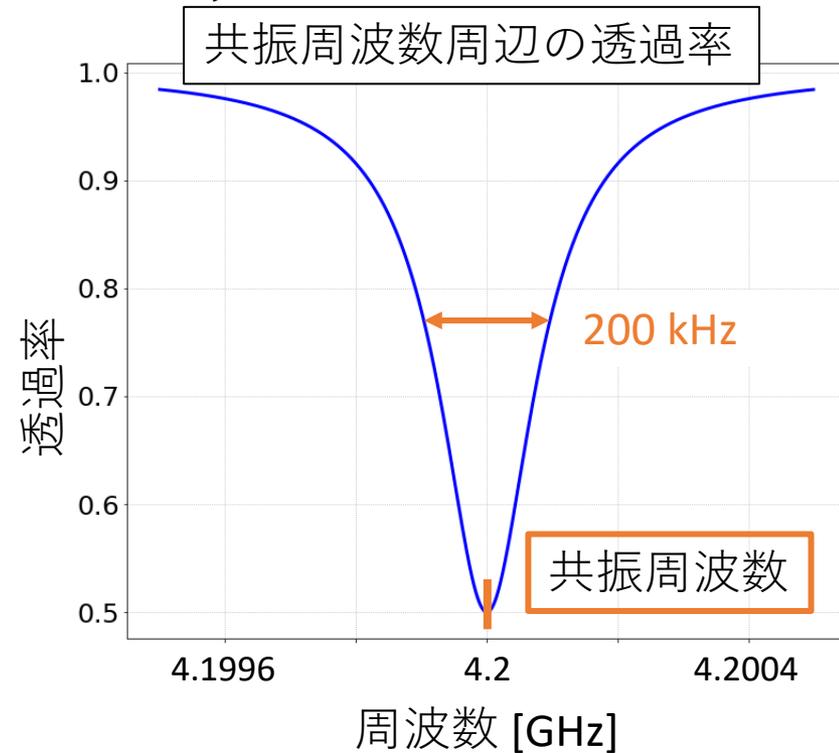
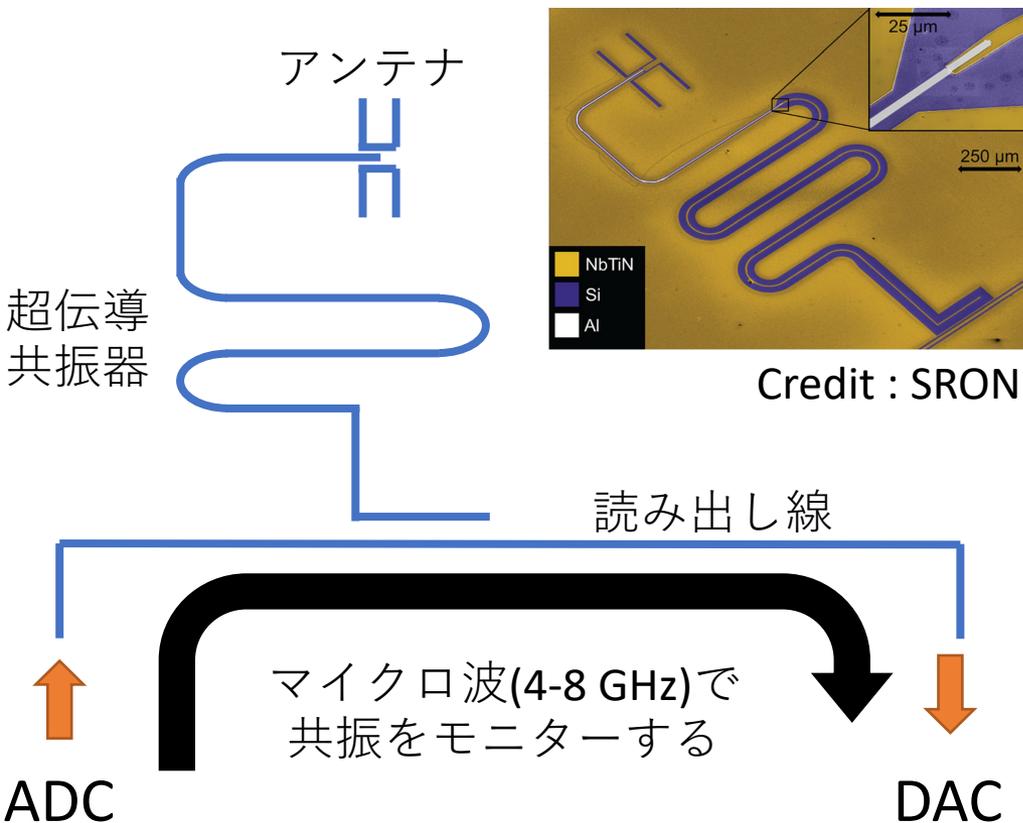


CMB実験GroundBIRD用の検出器アレイ

M. Ohno et al., IEICE Trans. Electron. Vol. E100-C, No. 3, pp.283-290 (2017)

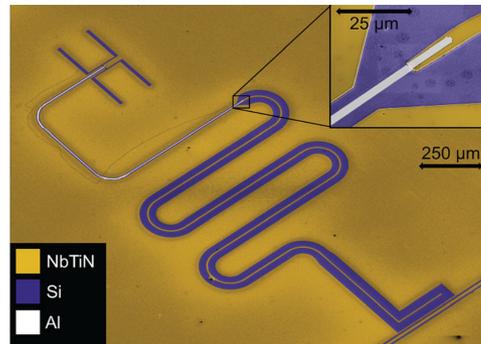
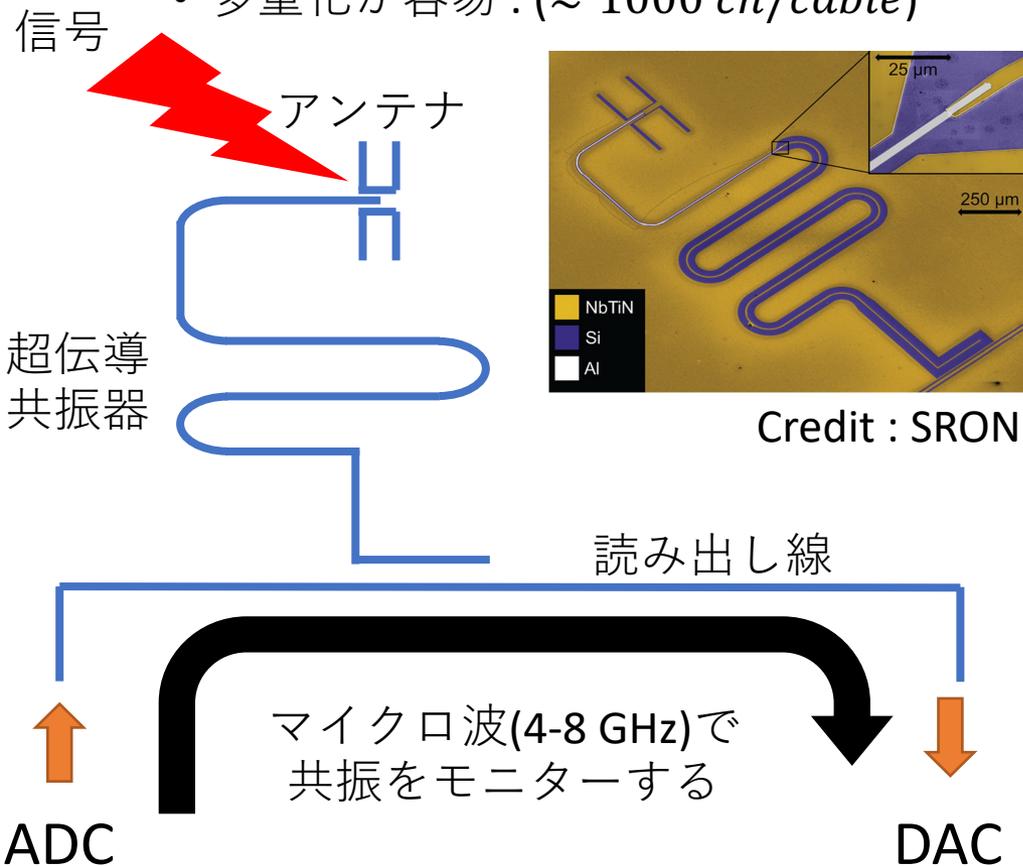
MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector)

- 超伝導体を用いた共振器 (< 400 mK)
 - 低いギャップエネルギー: $\geq 0.4 \text{ meV}$ ($\geq 100 \text{ GHz}$)
 - 時間応答が早い: ($\approx 100 \mu\text{s}$)
 - 多重化が容易: ($\approx 1000 \text{ ch/cable}$)

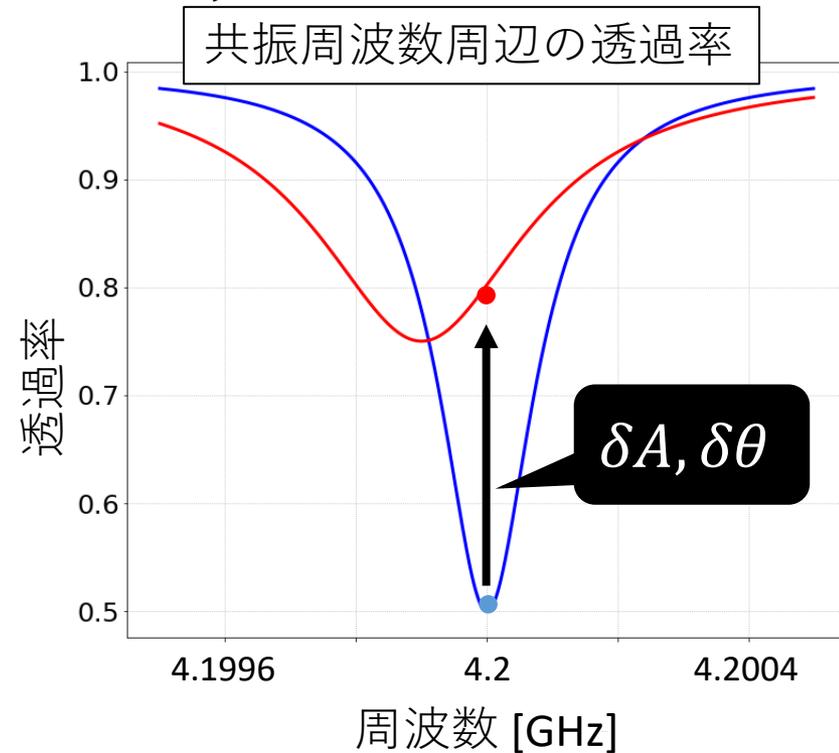


MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector)

- 超伝導体を用いた共振器 (< 400 mK)
 - 低いギャップエネルギー: $\geq 0.4 \text{ meV}$ ($\geq 100 \text{ GHz}$)
 - 時間応答が早い: ($\approx 100 \mu\text{s}$)
 - 多重化が容易: ($\approx 1000 \text{ ch/cable}$)



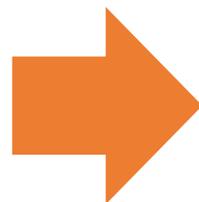
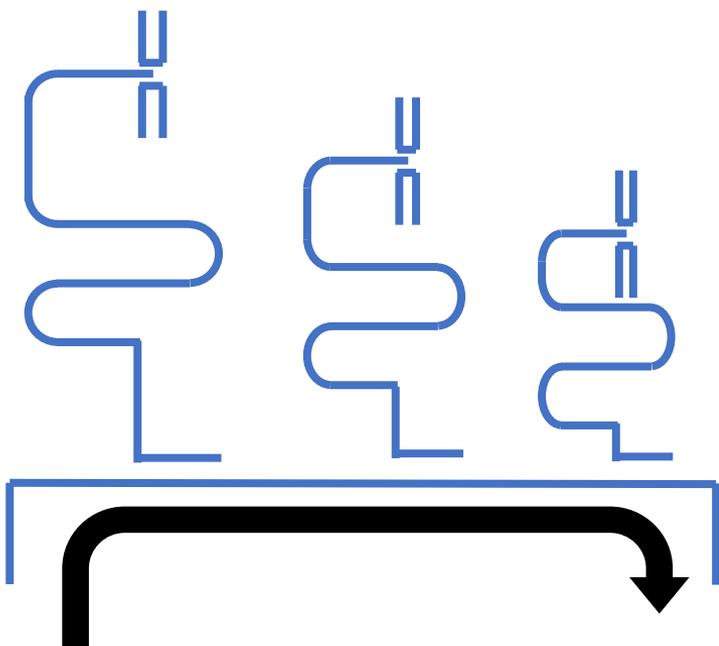
Credit : SRON



共振周波数の時系列データにおける共振の変化($\Delta A, \Delta \theta$)から入射パワーを求める

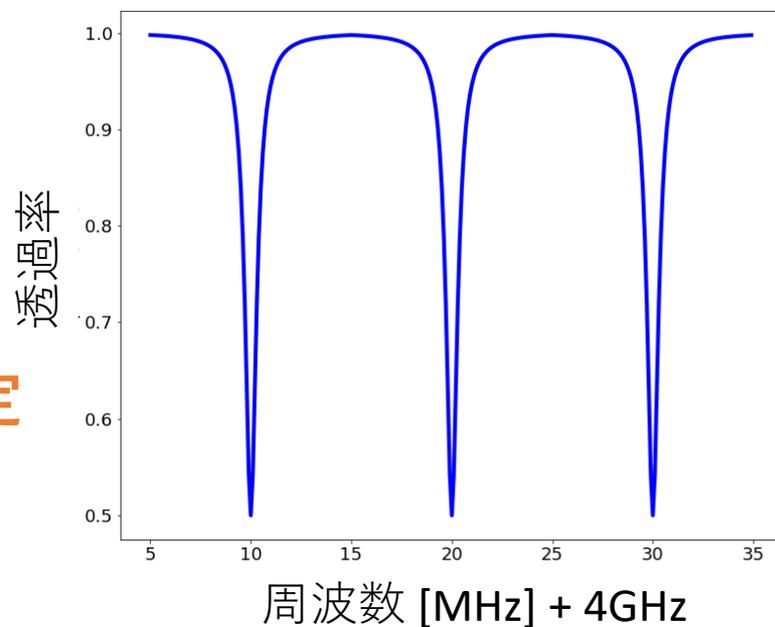
超伝導検出器の多素子化

共振器の長さ



透過率測定

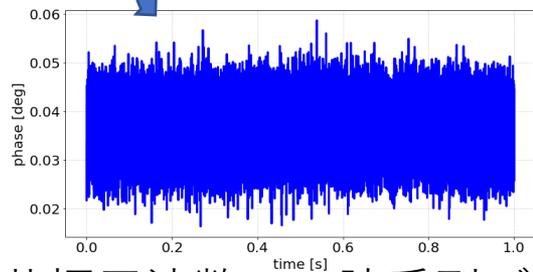
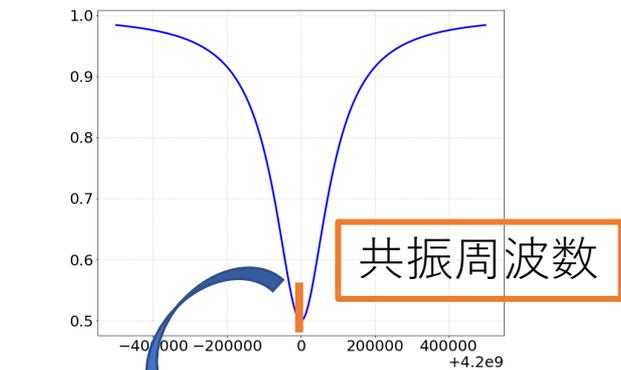
共振器の長さ



共振周波数 $\propto 1/$ (共振器の長さ)

周波数空間で容易に多素子化できる！

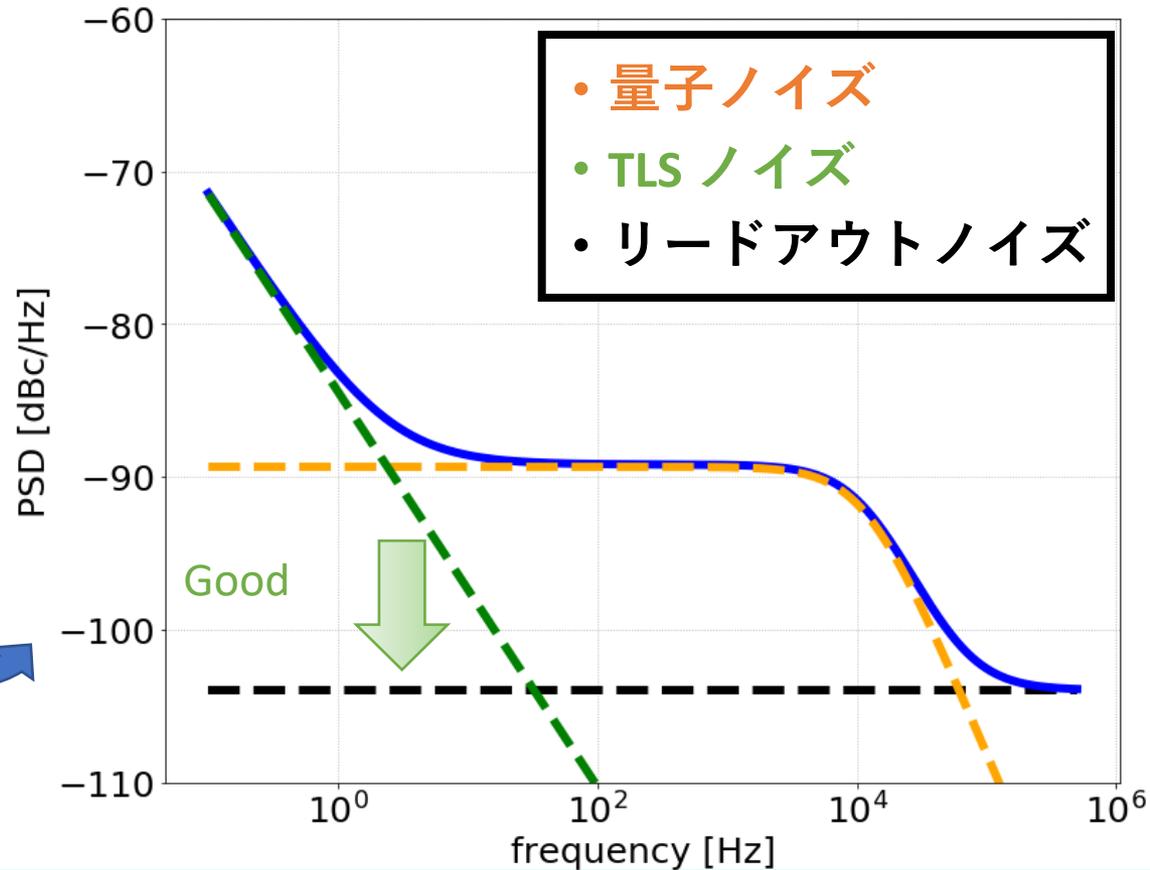
MKIDのノイズ成分



共振周波数での時系列データ

フーリエ変換

パワースペクトル密度



TLSノイズの問題点

TLSノイズ:大

ノイズの
大きさ

非ホワイトノイズ
成分が卓越

TLS
ノイズ

量子
ノイズ

周波数

TLSノイズの問題点

TLSノイズ:大

TLSノイズ:小

ノイズの
大きさ

TLS
ノイズ

量子
ノイズ

周波数

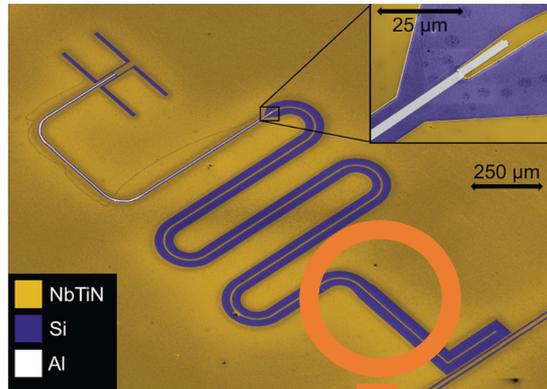
ノイズの
大きさ

周波数

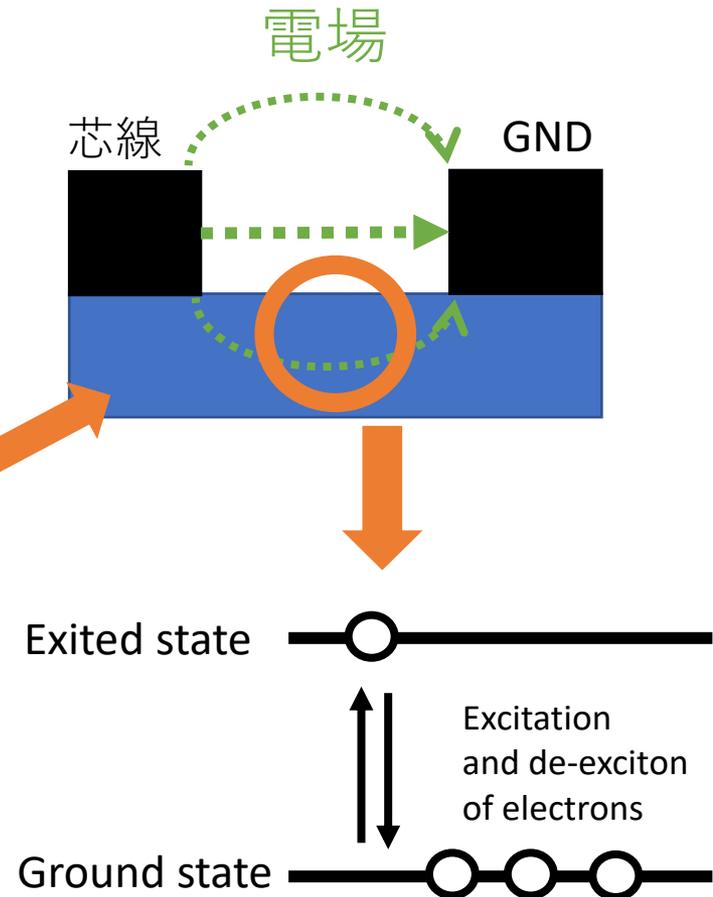
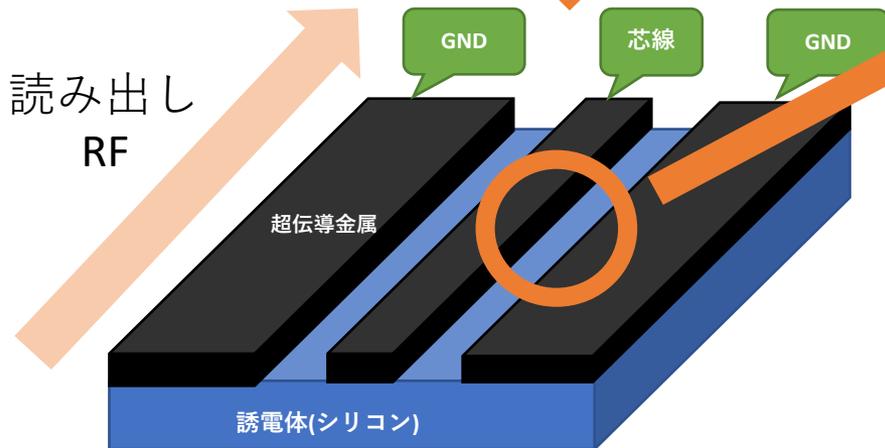
TLSノイズを低減する手法の確立
→さまざまな分野への応用！

TLS (Two Level System) ノイズ

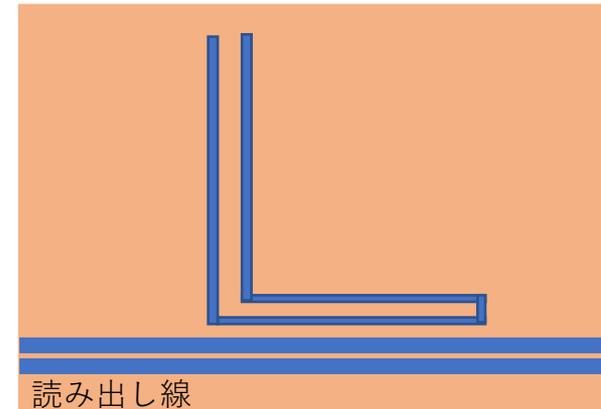
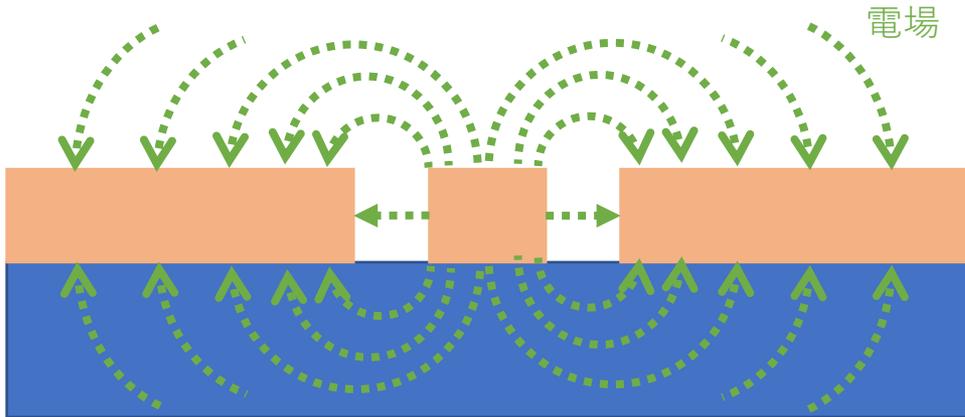
- 誘電体、超伝導体表面で2つのエネルギー準位を持つことに由来
- 読み出しRFの電場と相互作用し、ノイズとなる



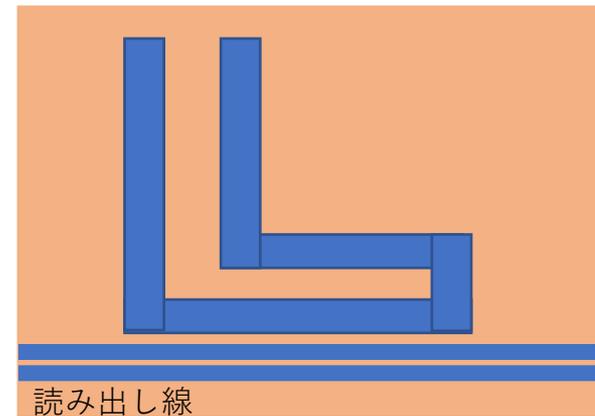
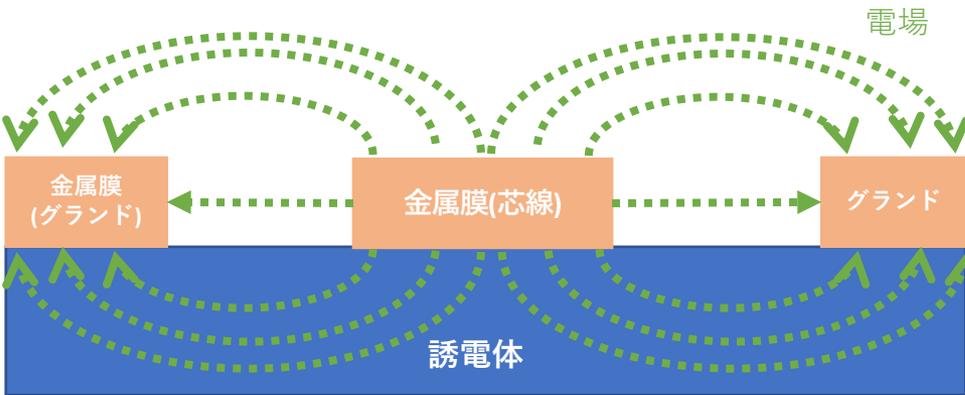
Credit : SRON



構造と電場密度



構造を広くすることで電場密度を下げ
TLSノイズを抑制する。

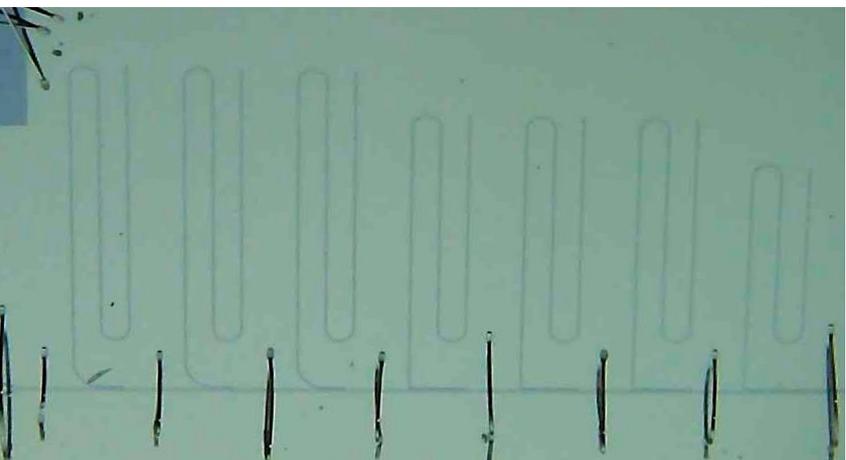


断面図

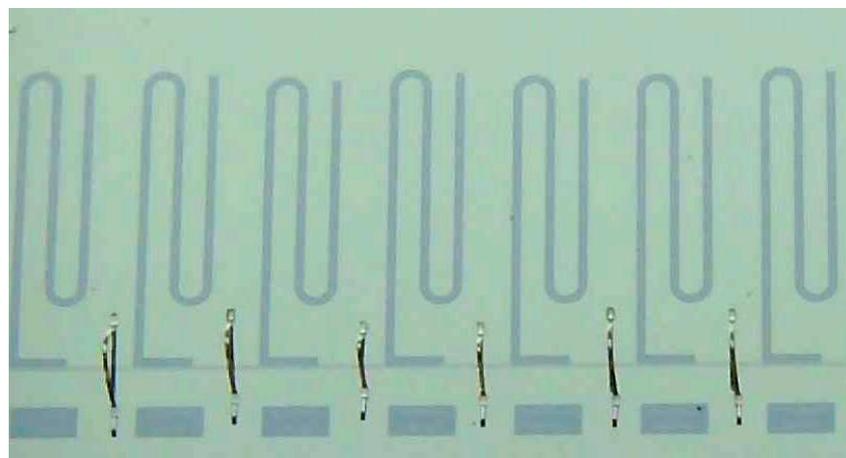
上から見た図

構造の比較

従来デザイン



幅広デザイン



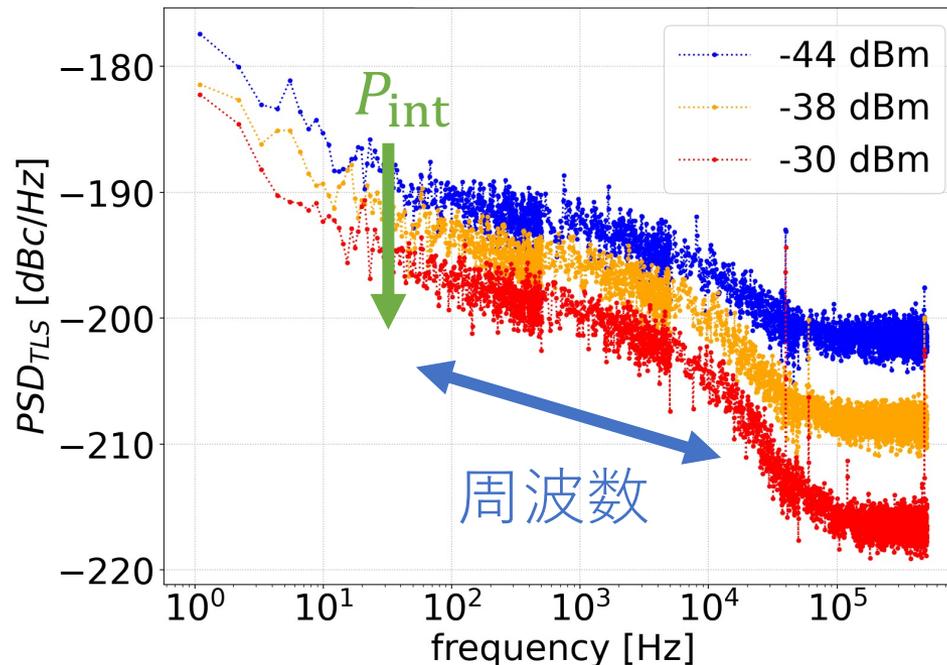
理研テラヘルツイメージング研究チーム製作

配線幅 : 4 倍 \Leftrightarrow 電場密度 : 1/4

TLSノイズの評価手法

$$PSD_{\text{TLS}} \propto N_{\text{TLS}} \times P_{\text{int}}^{\alpha_P} \times f^{\alpha_f} \quad \rightarrow \quad N_{\text{TLS}}, \alpha_P, \alpha_f \text{ を求めて TLSノイズを評価}$$

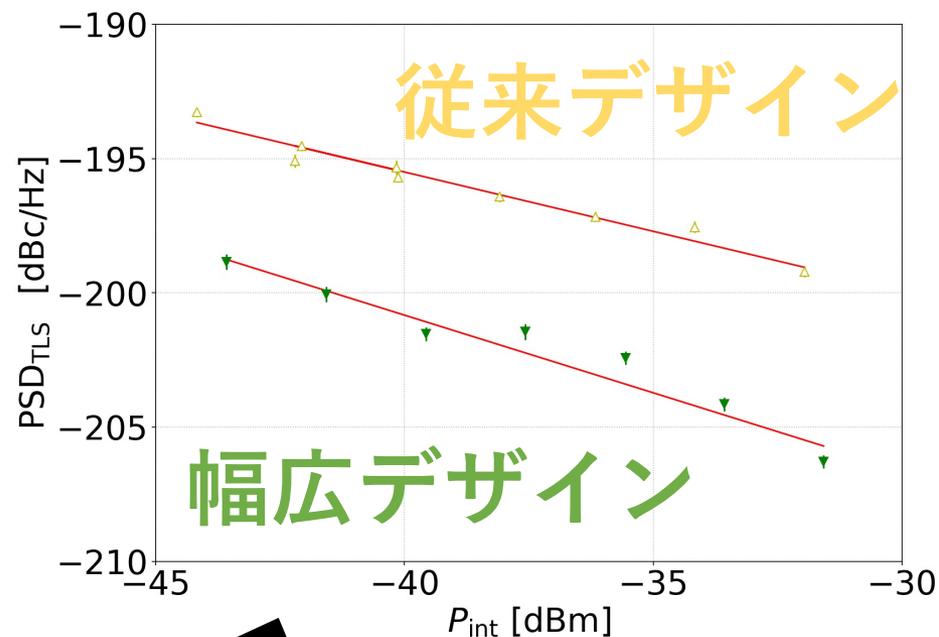
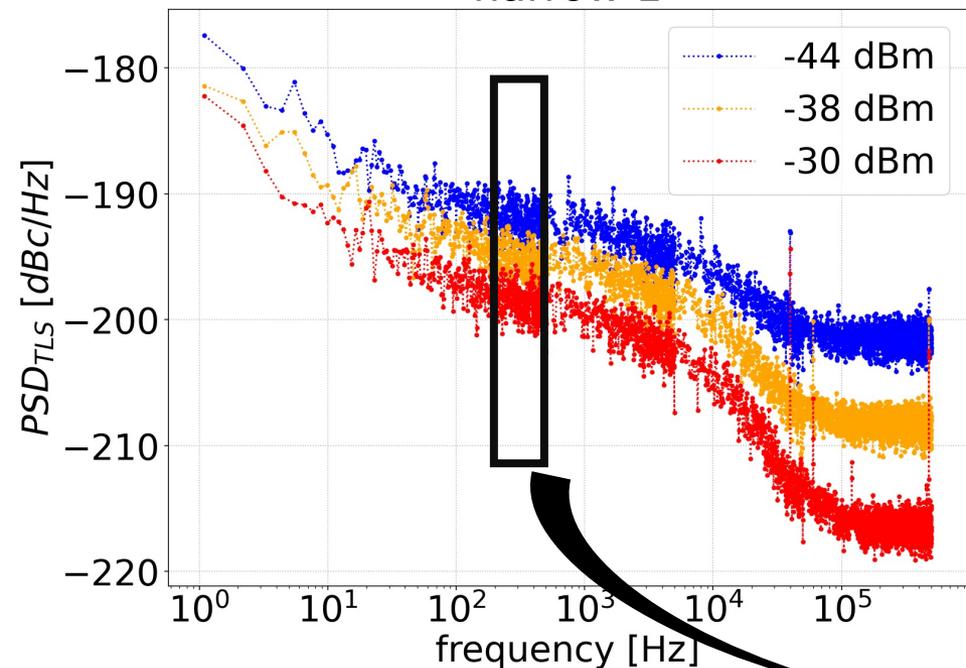
- 読み出しRFのパワー(P_{read})を変え、内部に蓄えられるパワー(P_{int})を変化させた時のPSDから、TLSの特性を評価



TLSノイズ P_{int} 依存性

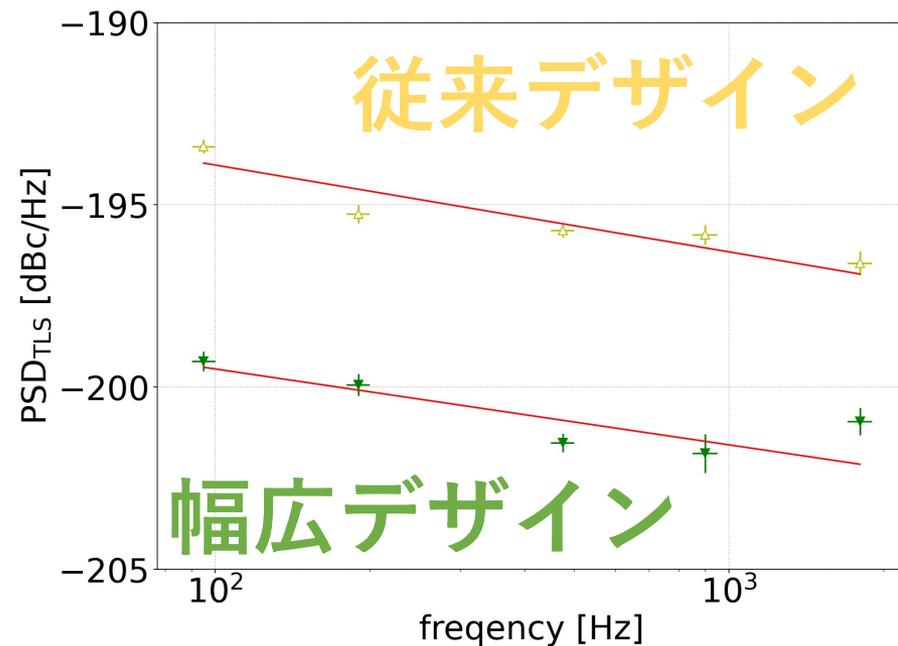
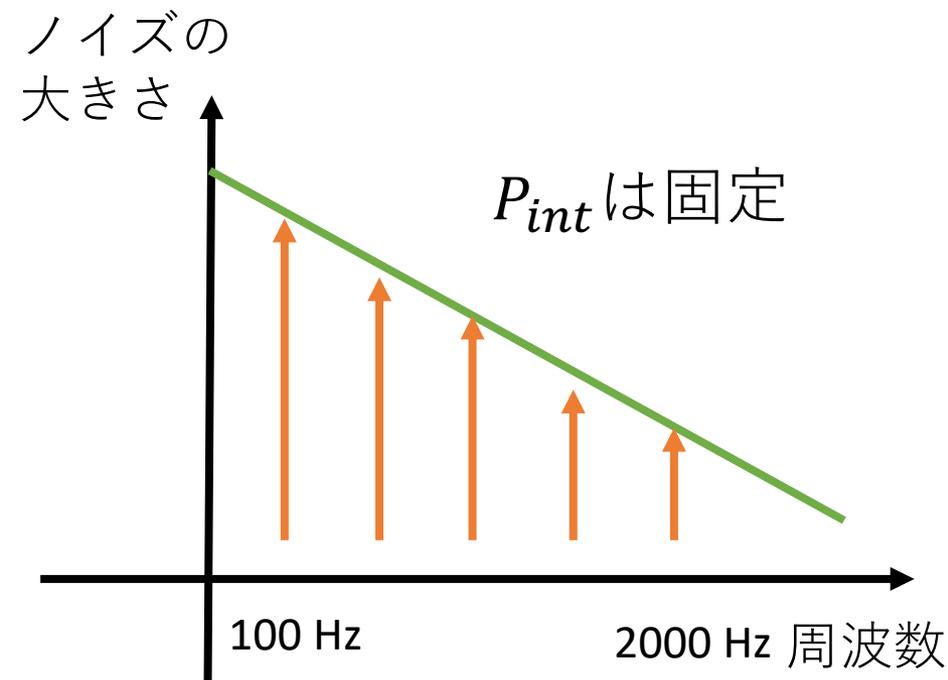
周波数は固定

narrow 1



- TLSノイズが抑制できていることを確認
- それぞれのMKIDで N_{TLS} , α_P を求めた

TLSノイズ：周波数依存性

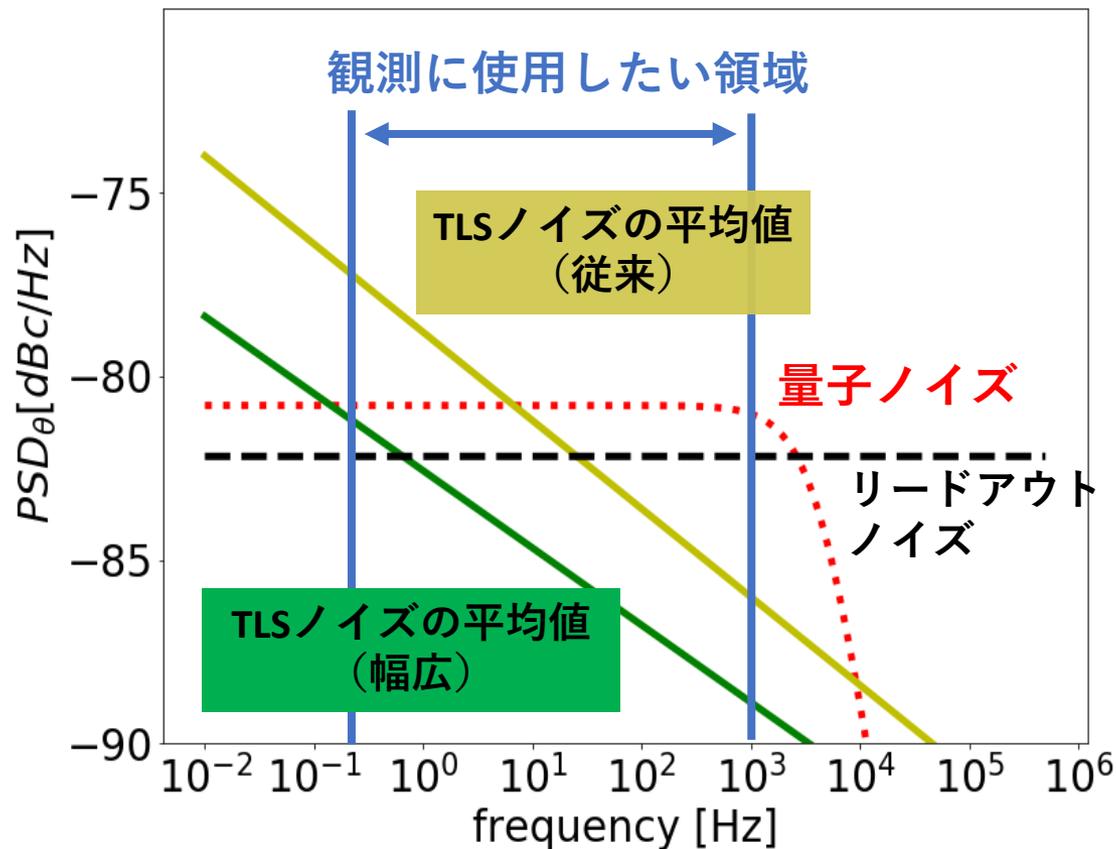


- TLSノイズが抑制できていることを確認
- それぞれのMKIDで N_{TLS} , α_f を求めた

実際の応用例

- CMB観測実験GroundBIRDでのノイズシミュレーション
- 観測に使用したい周波数帯域でTLSノイズを量子ノイズより小さくする

シミュレーション



まとめ

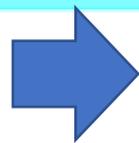
- 超伝導検出器MKIDは超高感度で多素子化が容易な検出器
- TLSノイズを抑制するデザインを考案
- 非ホワイトノイズ成分であるTLSノイズの特性を評価した
- 期待通りの抑制性能を確認 ($\sim 1/4$ 倍)

CMBの観測手法

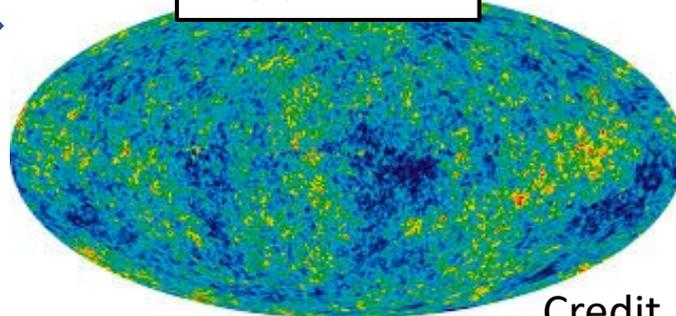
時系列データ

+

視線方向



強度マップ

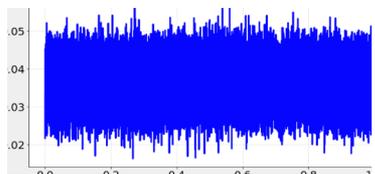
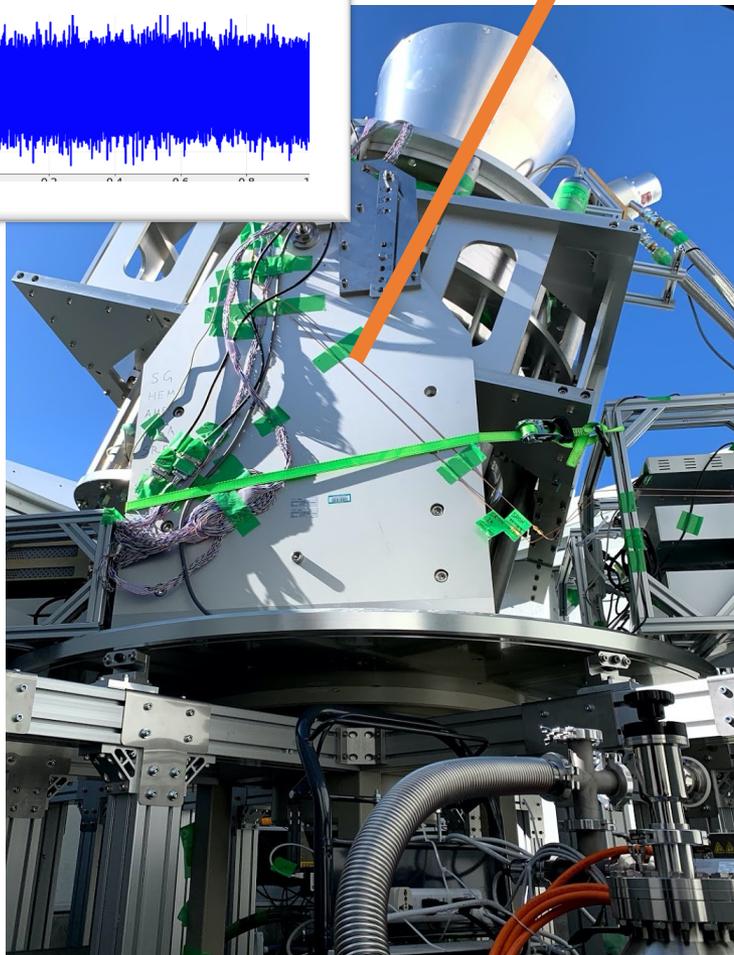
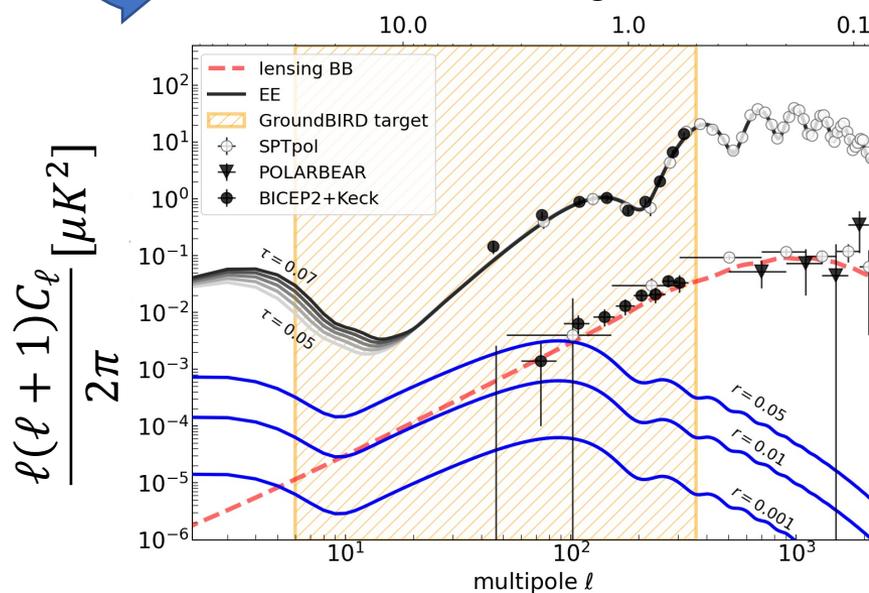


Credit : WMAP

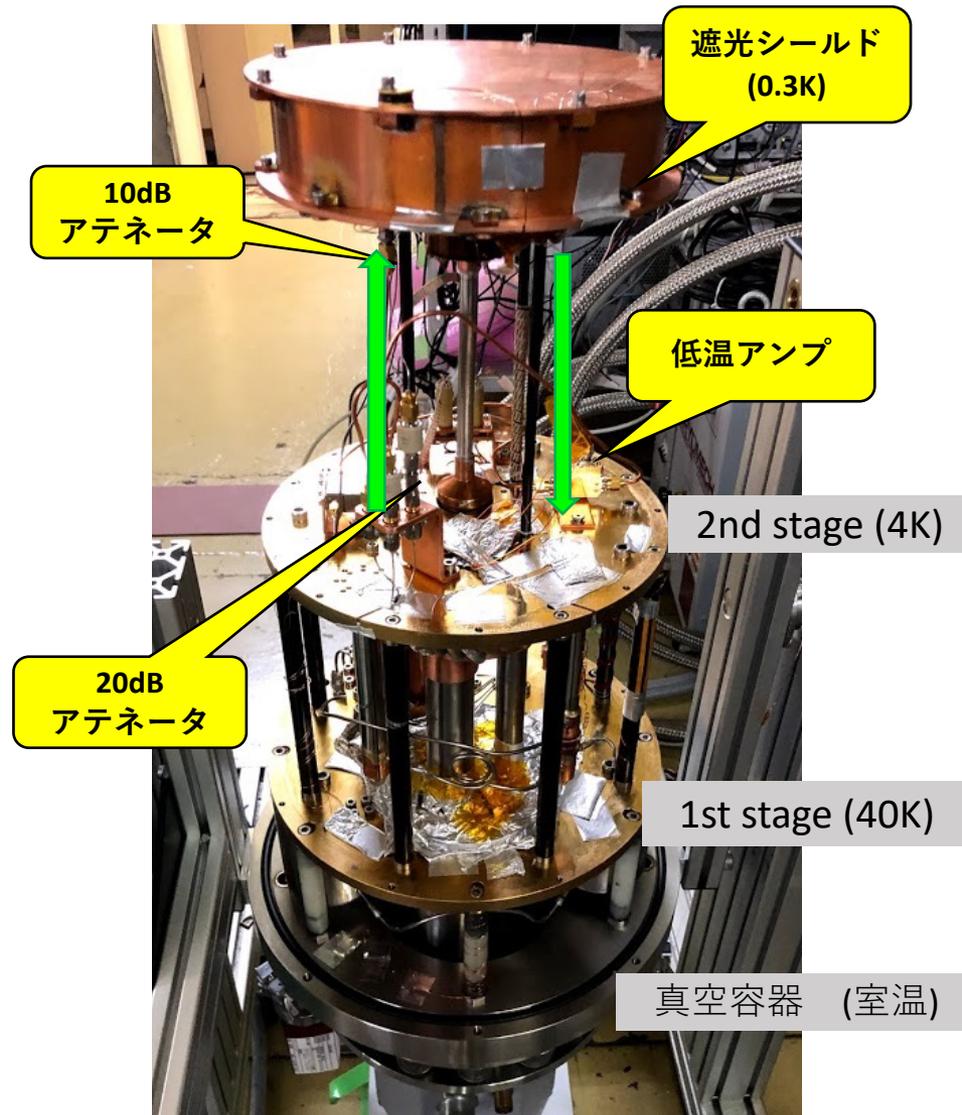
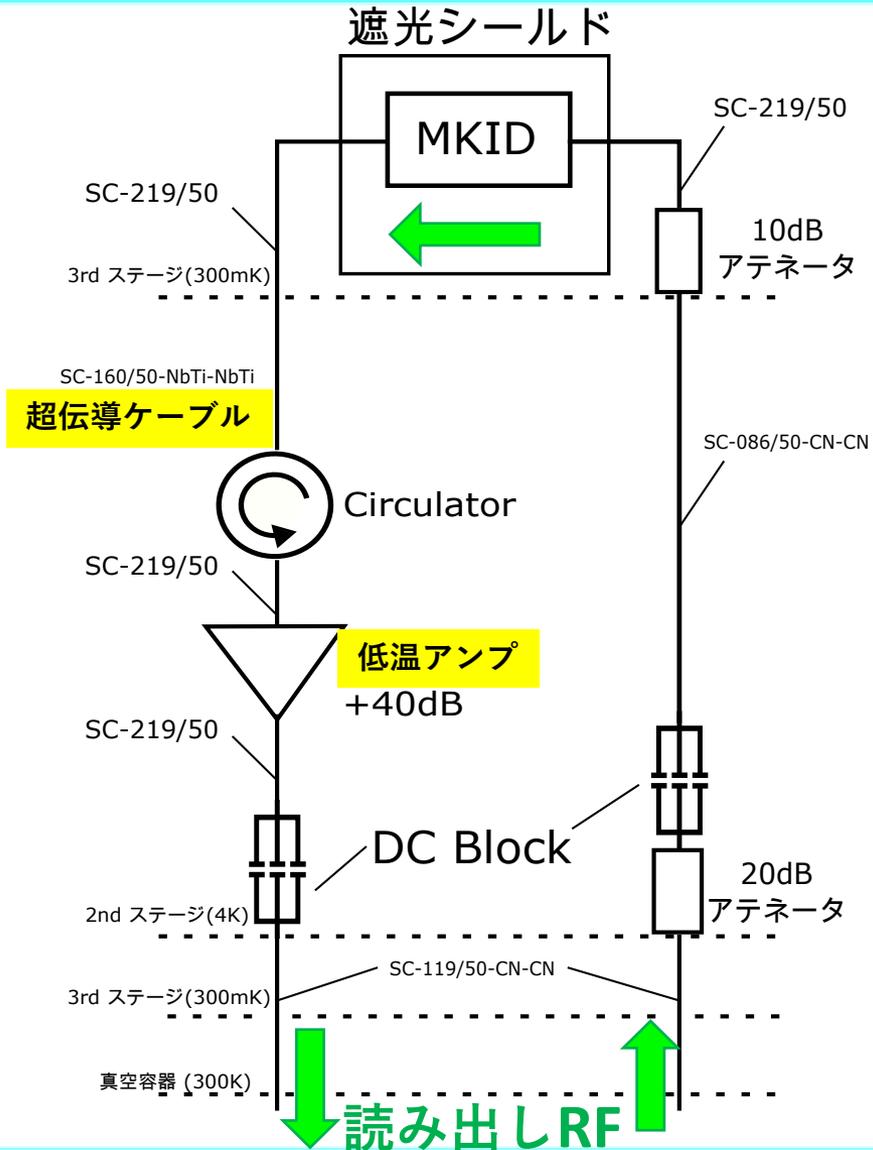
フーリエ
変換

パワースペクトル

視野角 [deg]

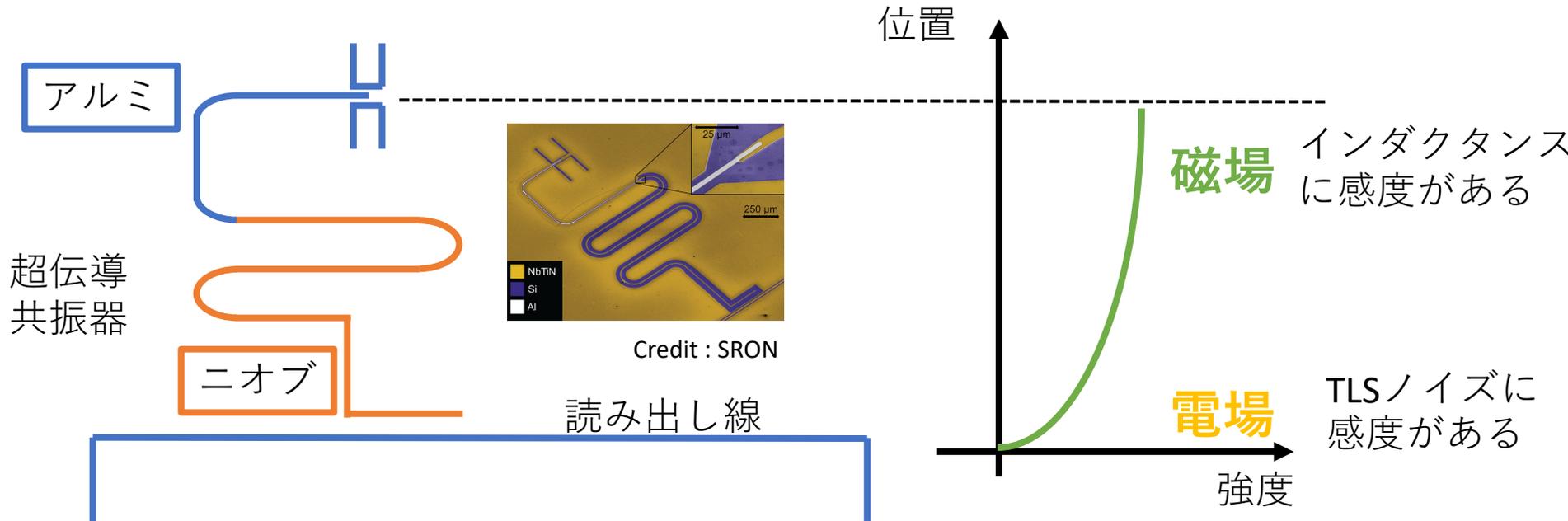


クライオスタット内部配線



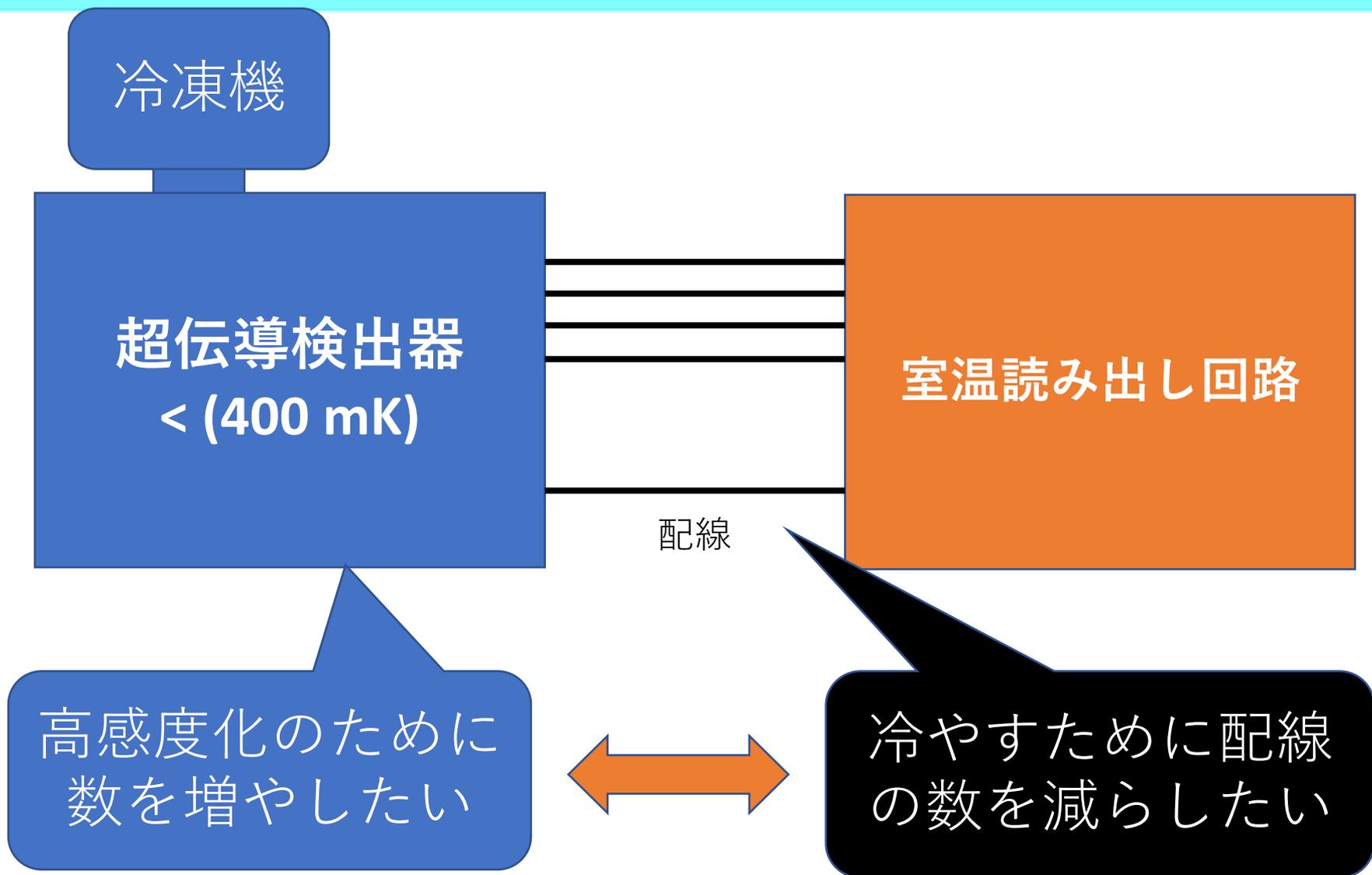
ハイブリッドMKID

- 読み出し線側にTLSノイズの少ないニオブ
- アンテナ側にCMBに感度を有するアルミ



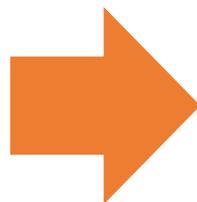
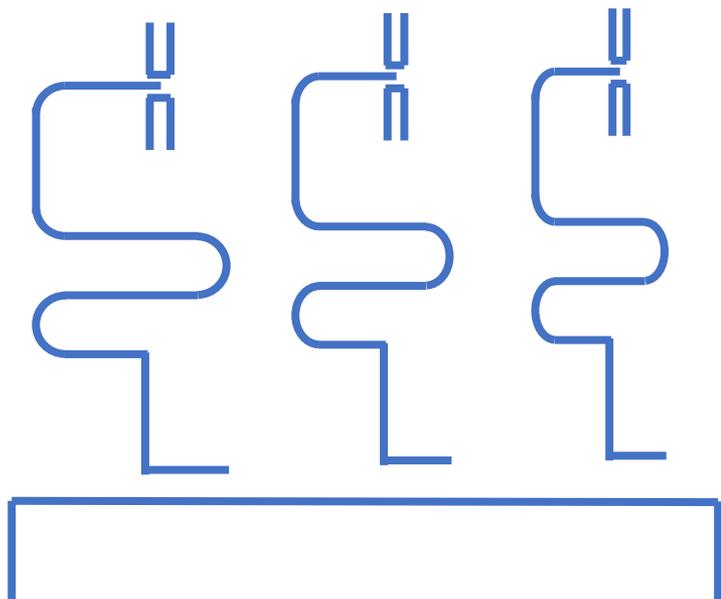
TLSノイズを抑制するためのデザイン

超伝導検出器の多素子化



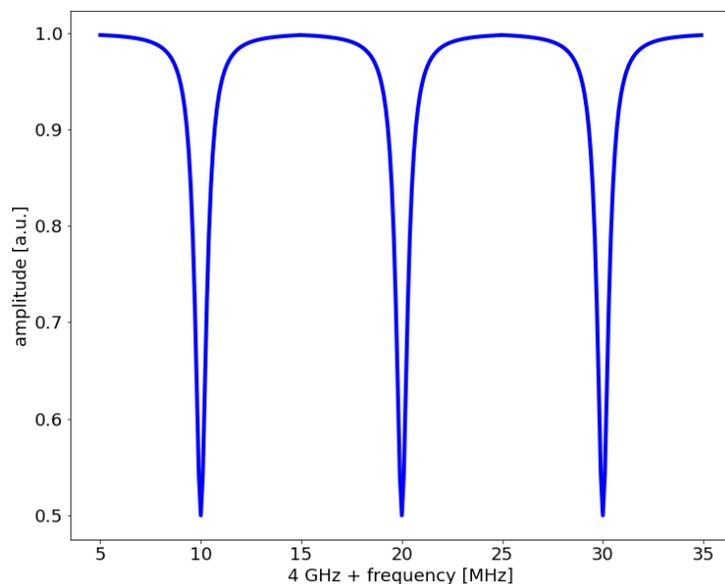
超伝導検出器の多素子化

共振器の長さ



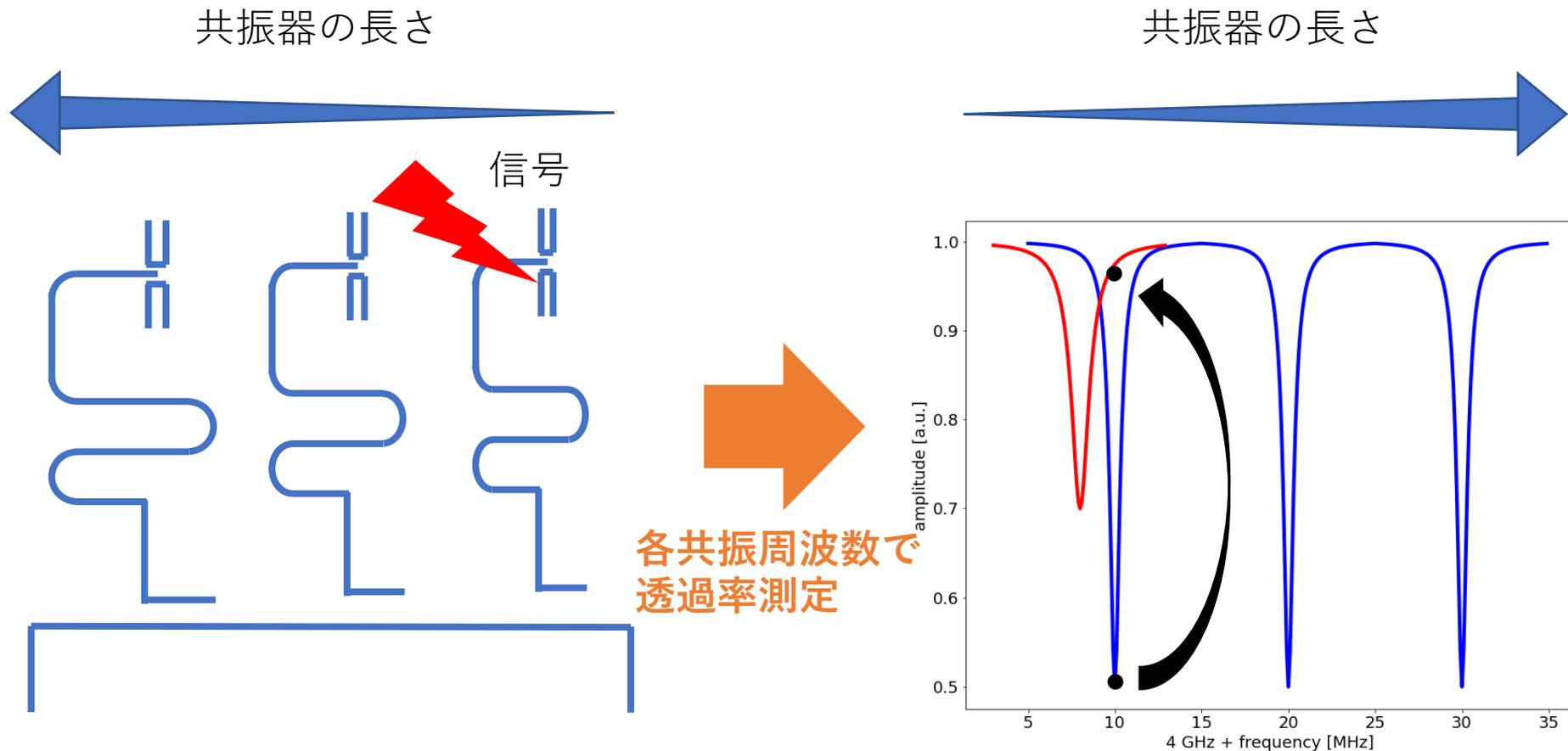
各共振周波数で
透過率測定

共振器の長さ



共振周波数 $\propto 1/$ (共振器の長さ)

超伝導検出器の多素子化



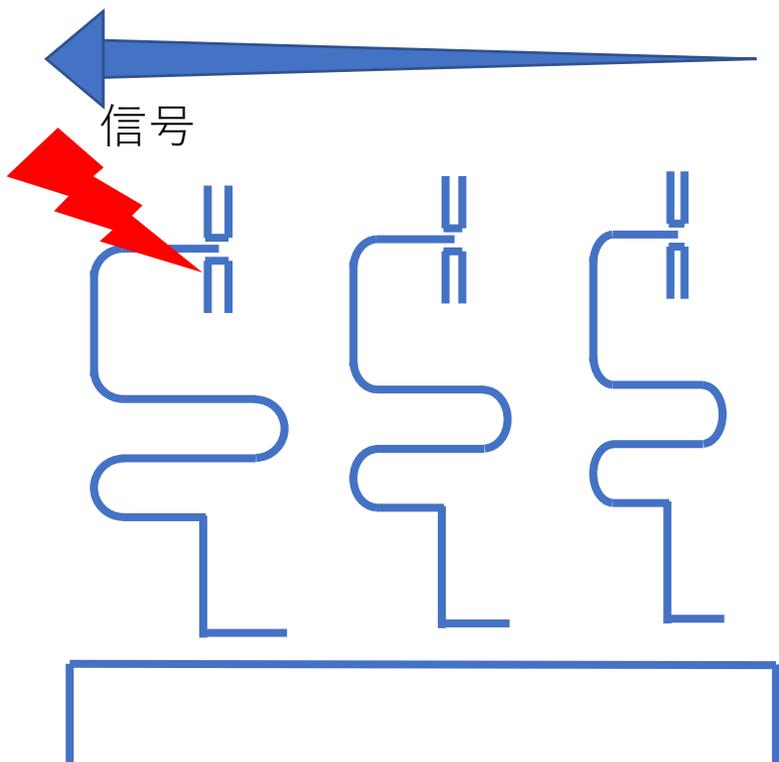
共振周波数 $\propto 1/$ (共振器の長さ)

A&A jochem 1000 KIDs を見せる？

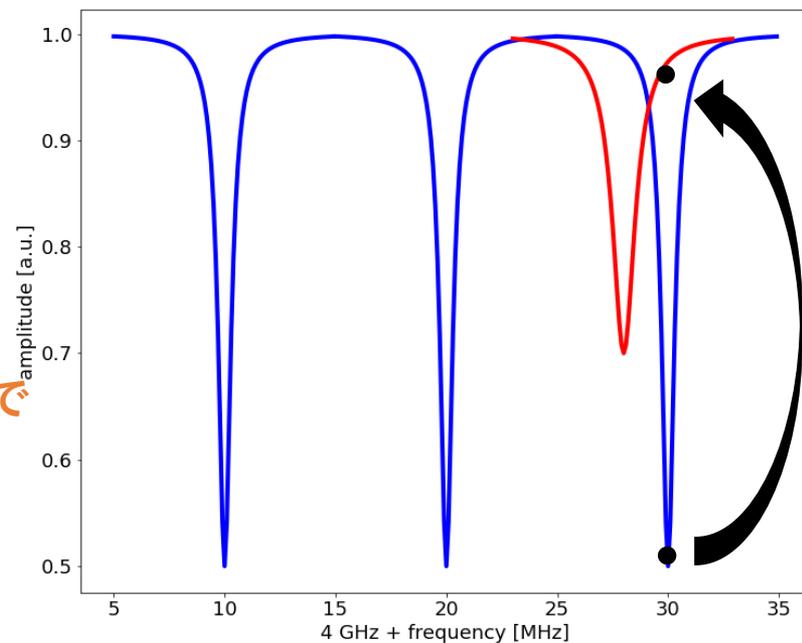
超伝導検出器の多素子化

共振器の長さ

共振器の長さ



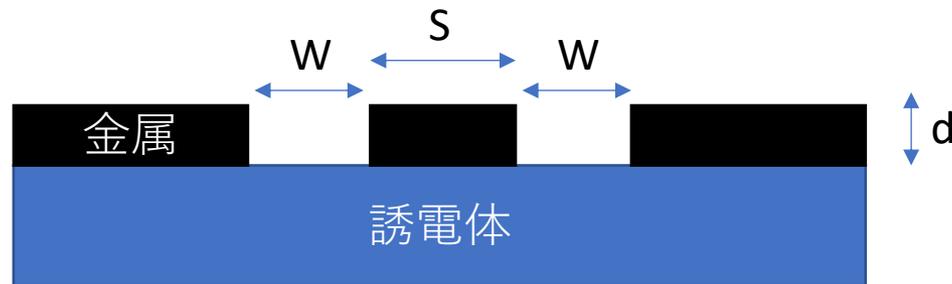
各共振周波数で
透過率測定



共振周波数 $\propto 1/$ (共振器の長さ)

A&A jochem 1000 KIDs を見せる？

ジオメトリの違い



MKID	超伝導材質	誘電体材質	芯線の線幅 (S)	ギャップの線幅 (W)
Wide ジオメトリ	Nb	Si	$5.0 \mu\text{m}$	$23.7 \mu\text{m}$
Narrow ジオメトリ	Nb	Si	$3.0 \mu\text{m}$	$4.0 \mu\text{m}$

サイエンスバンドとTLSノイズ

TLSノイズ:大

TLSノイズ:小

“サイエンスバンド”

“サイエンスバンド”

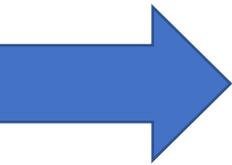
ノイズの
大きさ

ノイズの
大きさ

TLS
ノイズ

量子
ノイズ

望遠鏡への要求
 $f_{knee} < 0.3 \text{ Hz}$



GroundBIRDでは

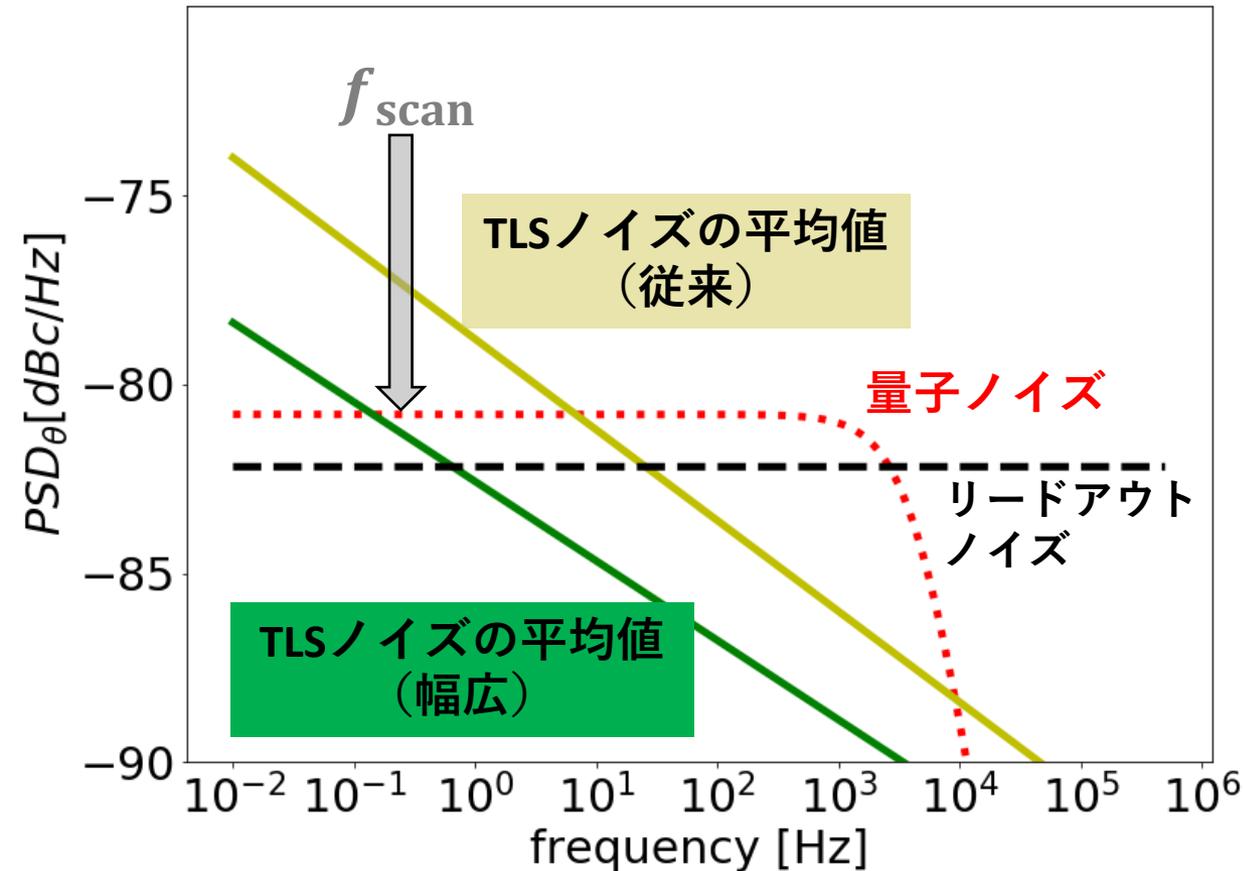
- $f_{scan} \sim 0.3 \text{ Hz}$
- $f_{sample} \sim 1 \text{ kHz}$

現状: $f_{knee} = \text{数Hz}$

f_{knee} の推定

- 求めた N_{TLS} , α_p , α_f から観測時の f_{knee} を推定

シミュレーション



従来デザイン
 $f_{\text{knee}} = 8 \text{ Hz}$



幅広デザイン
 $f_{\text{knee}} = 0.2 \text{ Hz}$