

エアブリッジインダクタンスによる超伝導力学インダクタンス検出器の高感度化

目次

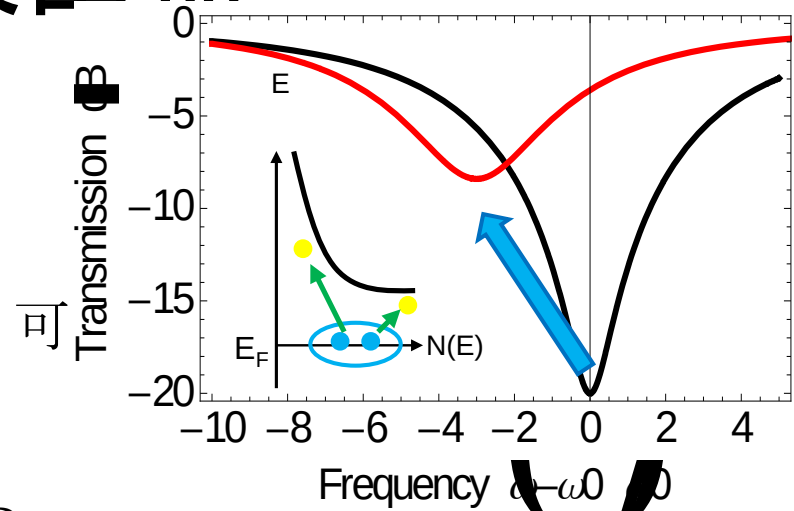
1. 力学インダクタンス検出 (KIDs) の動作原理と特徴
2. アルファ線検出実験
3. エアブリッジを組み込んだKIDs

埼玉大学大学院理工学研究科

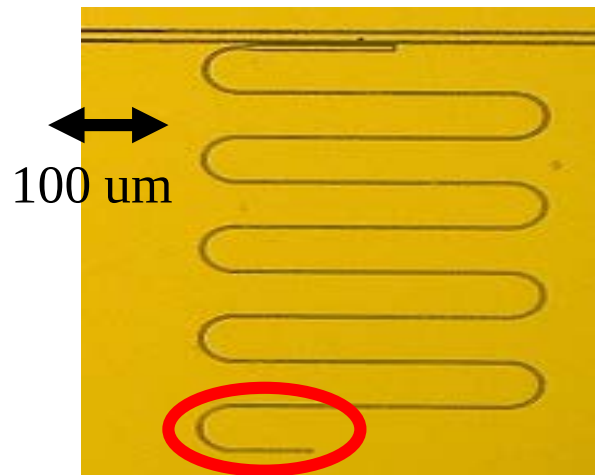
成瀬 雅人

力学インダクタンス検出器

- 超伝導マイクロ波共振器 $f_0 \propto (LC)^{-1/2}$
- インダクタンスの変化を読み取る
- FDMで多重化が容易
- 高感度(ミリ波帯：背景雑音レベル、
視光：光子数検出レベル、高エネルギー： $R > 100$)



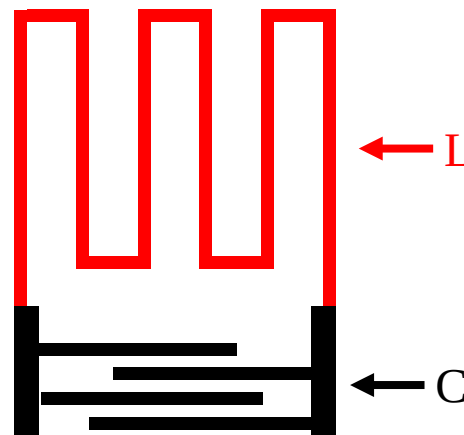
1/4波長導波路型



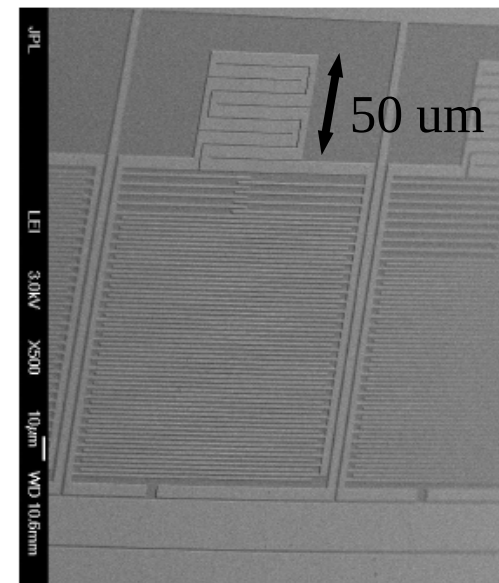
アンテナと相性が良い
高検出効率

集中定数型:LeKID

Doyle et al. JLTP 2008



ミリ波から放射線まで
検出効率の構造依存

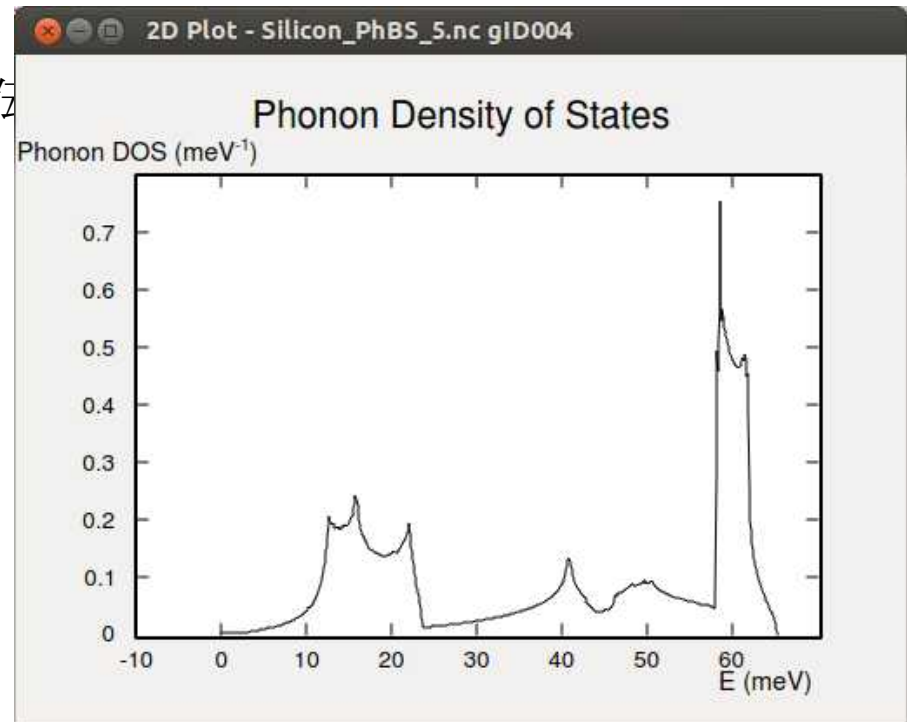
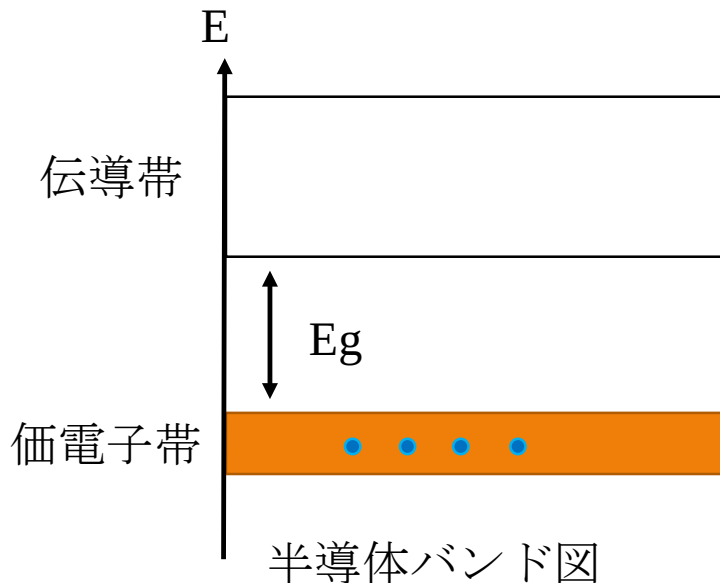


高感度な部分の面積が可変
Marsden et al. Proc. SPIE, 2012

半導体検出器との比較

- 感度の点からは超伝導検出器が有利。半導体は($NEP \sim 10^{-14}$)
 - 半導体検出器と比べてギャップエネルギーが小さい
 - 半導体ギャップは $\sim \text{eV}$ 、超伝導ギャップは $< \text{meV}$
 - 光子のエネルギーは...300 GHz=1 mmのとき $E \sim 1 \text{ meV}$
 - シリコン中のフォノンの状態密度は...

半導体のギャップエネルギーと超伝導



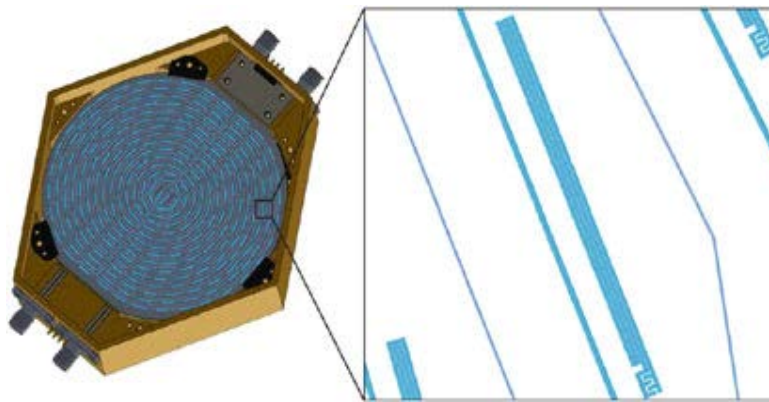
超伝導体バンド図

高エネルギー粒子(光子)への応用

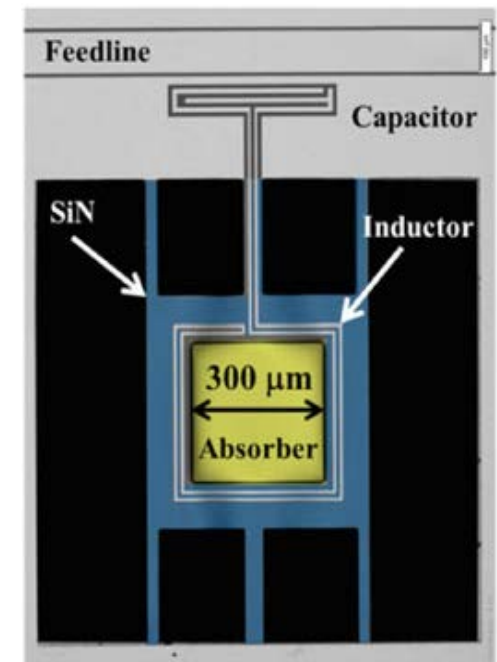
- 吸収体が必要 (KIDは薄膜からできているので)
- フォノン検出器 and/or カロリメータとして動作
- 550 eV@30 keV (Cornell, et al. JLTP, 2013)
- 62 eV@ 6 keV (Miceli, et al. JLTP, 2014)

$$\sigma_E = \frac{\Delta}{\eta_{ph}\beta(\omega, T)} \sqrt{\frac{\eta_{read}}{\alpha p_t} \frac{A_{sub} k_b T_N}{2\pi f_0} \frac{N_0 \lambda_{pb}}{\tau_{qp} S_1(\omega, T)}}$$

TiN で 38 eV



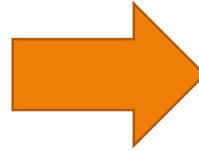
フォノン検出器
Cornell, et al. JLTP, 2013



吸収体付加型MKID
Miceli, et al. JLTP, 2014₄

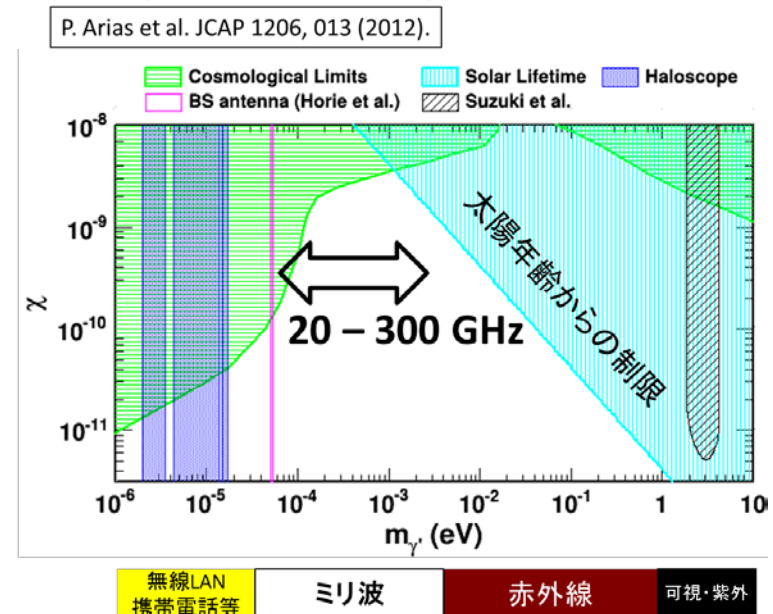
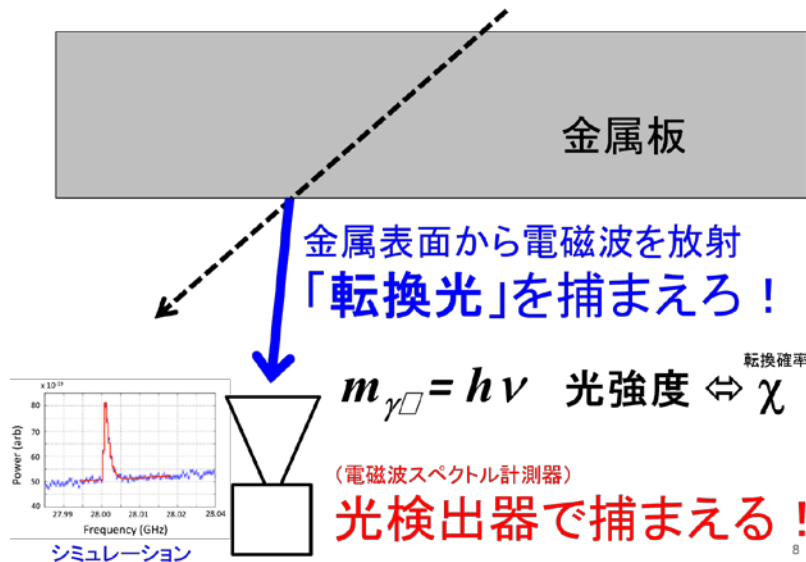
KIDsで他に何が見えるか？

- HP-CDM ?
- double beta decay ?
- wimp, ダークマター ?



- ミリ波・サブミリ波
- 蛍光・チェレンコフ光
- フォノン

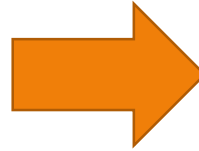
(京大 田島他) Hidden Photon CDM (HP-CDM)



観測する転換光子の帯域

KIDsで他に何が見えるか？

- HP-CDM ?
- double beta decay ?
- wimp, ダークマター ?



- ミリ波・サブミリ波
- 蛍光・チェレンコフ光
- フォノン

Development of kinetic inductance detectors for CUORE and LUCIFER

L. PAGNANINI

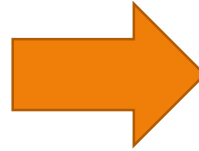
Gran Sasso Science Institute (INFN), L'Aquila, Italy

TABLE I. – Main features of the experiments in question. Total mass of crystals (M), resolution in the region of interest (σ), background in the region of interest (B) and sensitivity to the half-life of the $0\nu\beta\beta$ decay.

Experiment	M [kg]	σ [keV]	B [count/keV · kg · y]	$T_{1/2}^{0\nu}$ [y]	Ref.
Cuoricino (TeO ₂)	40.7	6.3	0.153 ± 0.006	2.8×10^{24}	[8]
CUORE-0 (TeO ₂)	39	5.1	0.071 ± 0.011	2.8×10^{24}	[9]
CUORE (TeO ₂)	741	5	$\sim 1\text{--}2 \times 10^{-2}$	0.95×10^{26}	[6]
LUCIFER (ZnSe)	17	13.4	$\sim 10^{-3}$	0.8×10^{26}	[10]
LUCIFER (ZnMoO ₄)	14	7	$\sim 10^{-3}$	0.6×10^{26}	[11]

KIDsで他に何が見えるか？

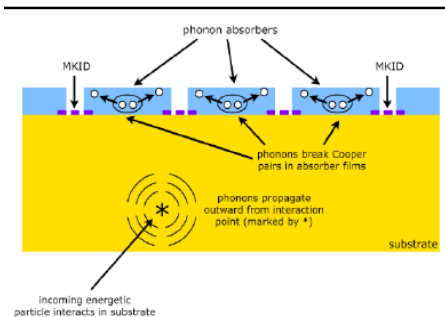
- HP-CDM ?
- double beta decay ?
- wimp, ダークマター ?



- ミリ波・サブミリ波
- 蛍光・チェレンコフ光
- フォノン

A WIMP Dark Matter Detector Using MKIDs

S. Golwala • J. Gao • D. Moore • B. Mazin •
M. Eckart • B. Bumble • P. Day • H.G. LeDuc •
J. Zmuidzinas



全部KIDsの守備範囲！

Architectures

Sunil Golwala

Caltech

started in 2008 or earlier

Small detectors (gram-scale)

Goal: detection of sub-eV energies from:

Dark photon absorption

DM-e scattering

Scalar-mediated nucleon scattering at very low recoil
energies producing phonons

Methods:

Detection of qp creation in superconducting target
via phonons (Hochberg, Zhao, Zurek, arXiv:1504.07237)

qp propagation diffusive, subject to pair recomb.

phonons quasiballistic, long decay times

Detection of optical phonon production in polar materials:

GaAs (Knapen, Lin, Pyle, Zurek, arXiv:1712.06598)

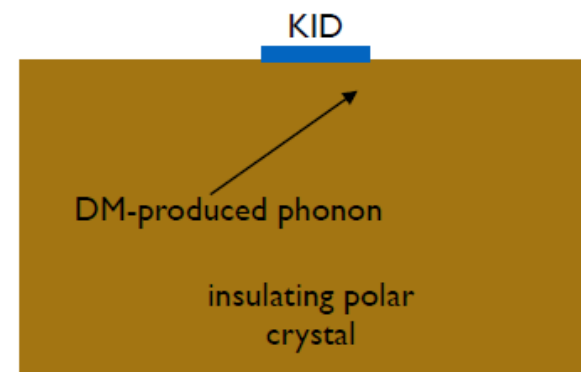
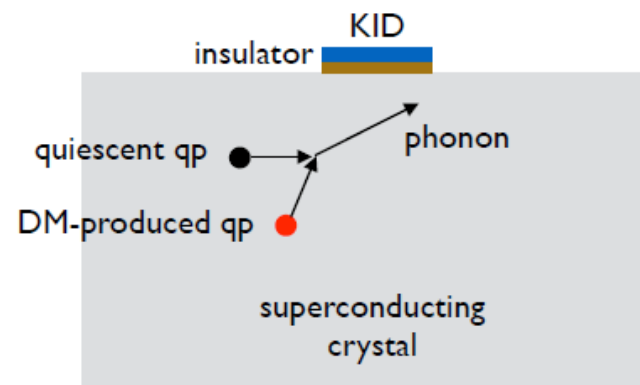
Al₂O₃ (Knapen talk (Tues))

Architecture:

single mm-scale KID on few-mm target substrate

previous slide energy estimate ~ valid

Need lower-gap superconductor for KID (e.g., AlMn) or better amplifiers
(kinetic inductance parametric amplifier recently demo'd $T_a \sim 70$ mK at 3 GHz)



no quasiparticle trapping!

Architectures

Large detectors (kg-scale)

Goal:

traditional nuclear recoil search at very low recoil energies (10 eV_r)

DM-e scattering at eV scales

Method:

Neganov-Luke-Trofimov phonon production by drifting e-h pairs in large electric field (Romani et al APL 112, 043501 (2018)) providing single e-h pair detection

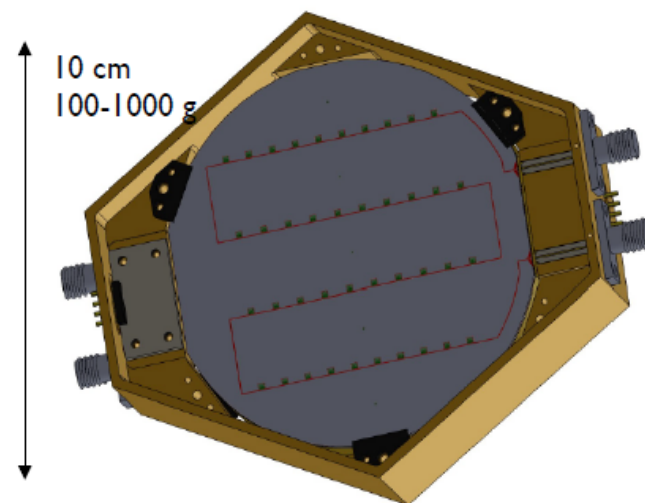
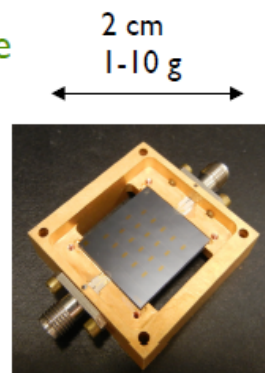
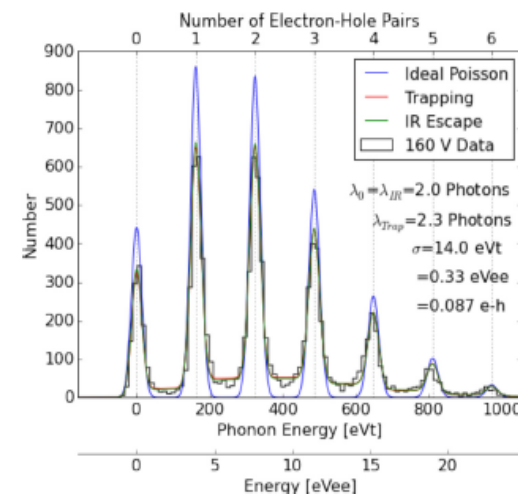
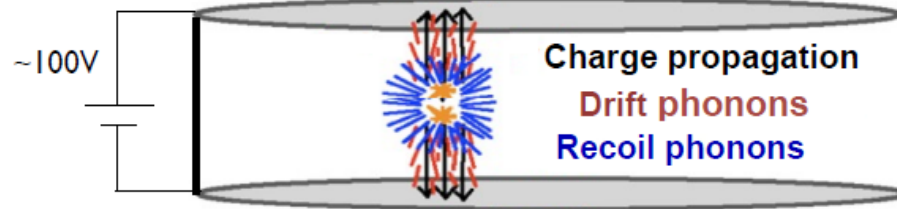
Architecture:

few KIDs on cm-scale substrate

~100 KIDs on 10-cm-scale substrate

Fine pixellization intended to provide fiducialization away from detector surfaces (most low-energy bg)

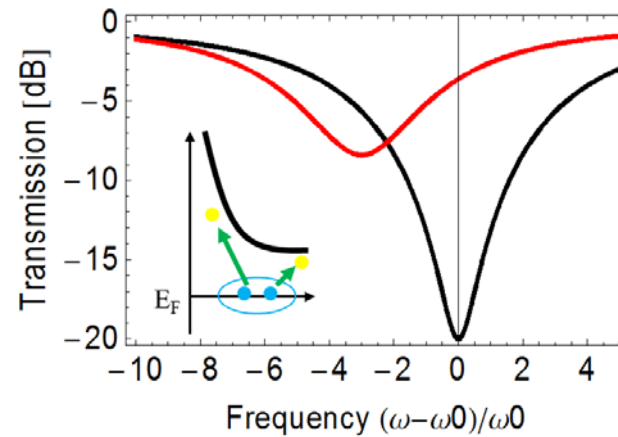
Also provide pos'n correction for energy



Sunil Golwala
Caltech

KIDsの感度

MKIDは準粒子数の変化を共振の変化として読み出す検出器



$$NEP \propto \sqrt{S} \cdot \left(\frac{dA}{dP} \right)^{-1} \cdot (\tau_{qp})^{-1}$$

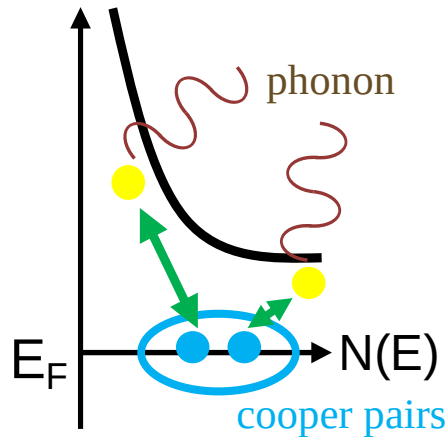
雑音
=N

応答性
=S

準粒子寿命
~積分時間

MKIDにおける積分時間とは？

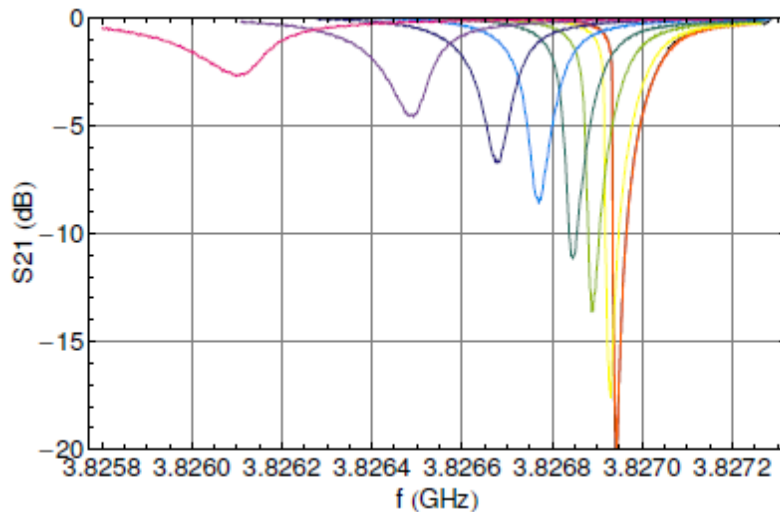
$$NEP \propto \sqrt{S} \cdot \left(\frac{dA}{dP} \right)^{-1} \cdot (\tau_{qp})^{-1}$$



光子によって励起された準粒子(電子)がもとのクーパー対に戻るまでの時間
=準粒子寿命

1つの光子が叩き上げた準粒子がもとのに戻るまえに次の光子が来れば、2個分のエネルギーだけ共振周波数がずれる。

励起電子をずっと保っておく方法はない！

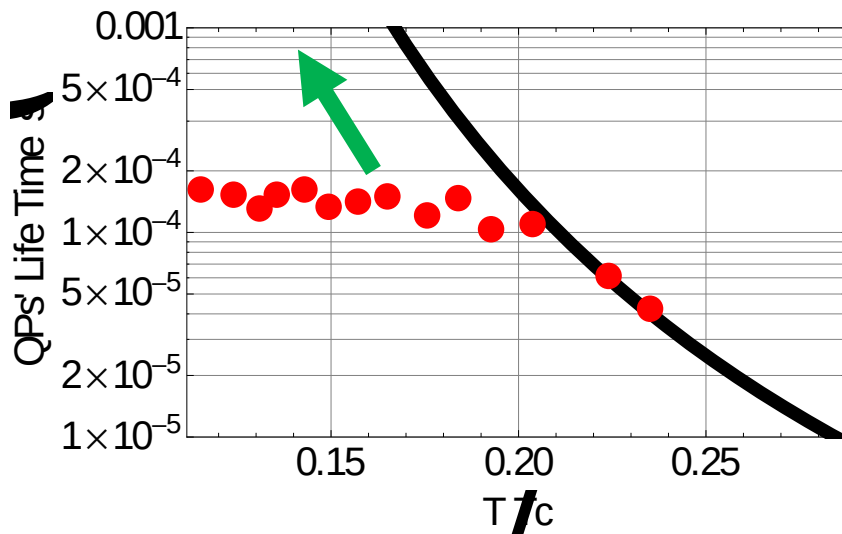


準粒子寿命

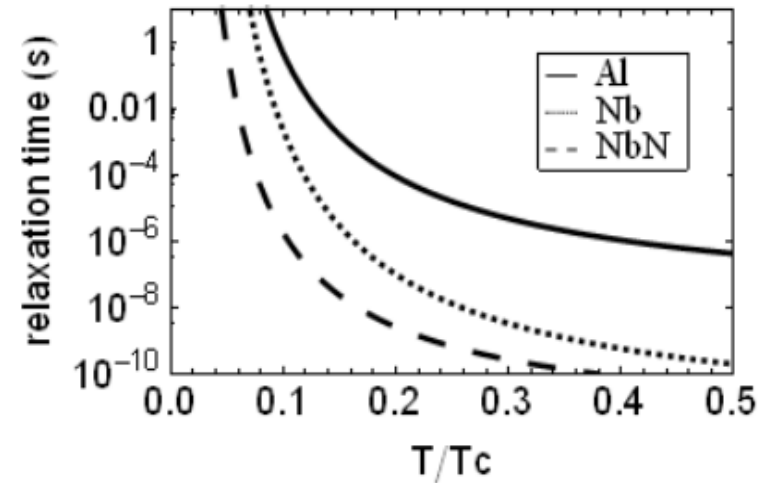
$$NEP \propto \sqrt{S} \cdot \left(\frac{dA}{dP} \right)^{-1} \cdot (\tau_{qp})^{-1}$$

- 超伝導転移温度の約1/5-1/10程度で頭打ち
- 一般的に転移温度が低い（弱結合）ほど長い
- 動作温度=冷却コストとのトレードオフ

ニオブを用いて1Kで動作させたい！



T dependence of QP's lifetime in SC Al



Relaxation time of the signal

Relaxation time of quasiparticles (τ_{qp}) in niobium and YBCO is much shorter than that of resonators (τ_r).

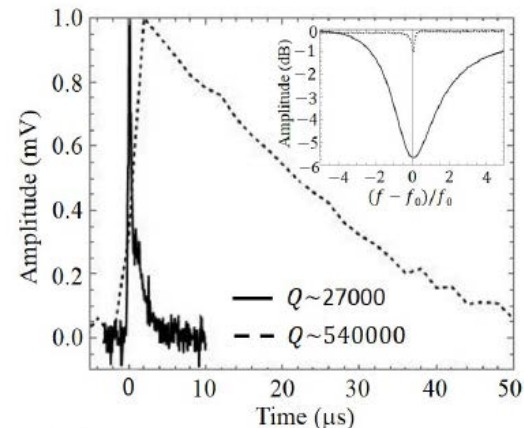
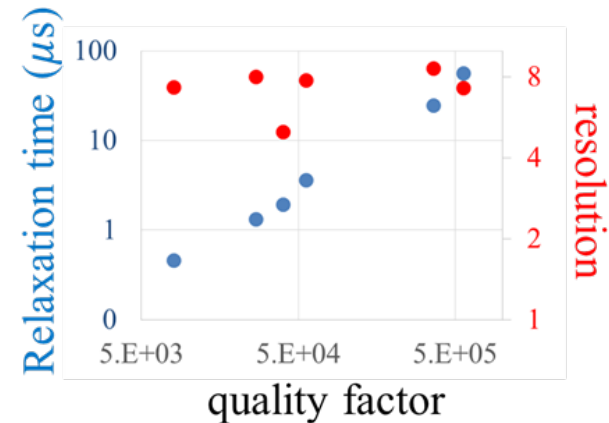
$$\tau_{qp-Nb} \sim 10^{-9} \text{ s at 1K}$$

$$\tau_{qp-YBCO} \sim 10^{-12} \text{ s at } T \ll T_c$$

$$\tau_r \sim \frac{Q}{\pi f_0} = 1 \mu\text{s}$$

$$(Q = 10000, f_0 \sim 3 * 10^9)$$

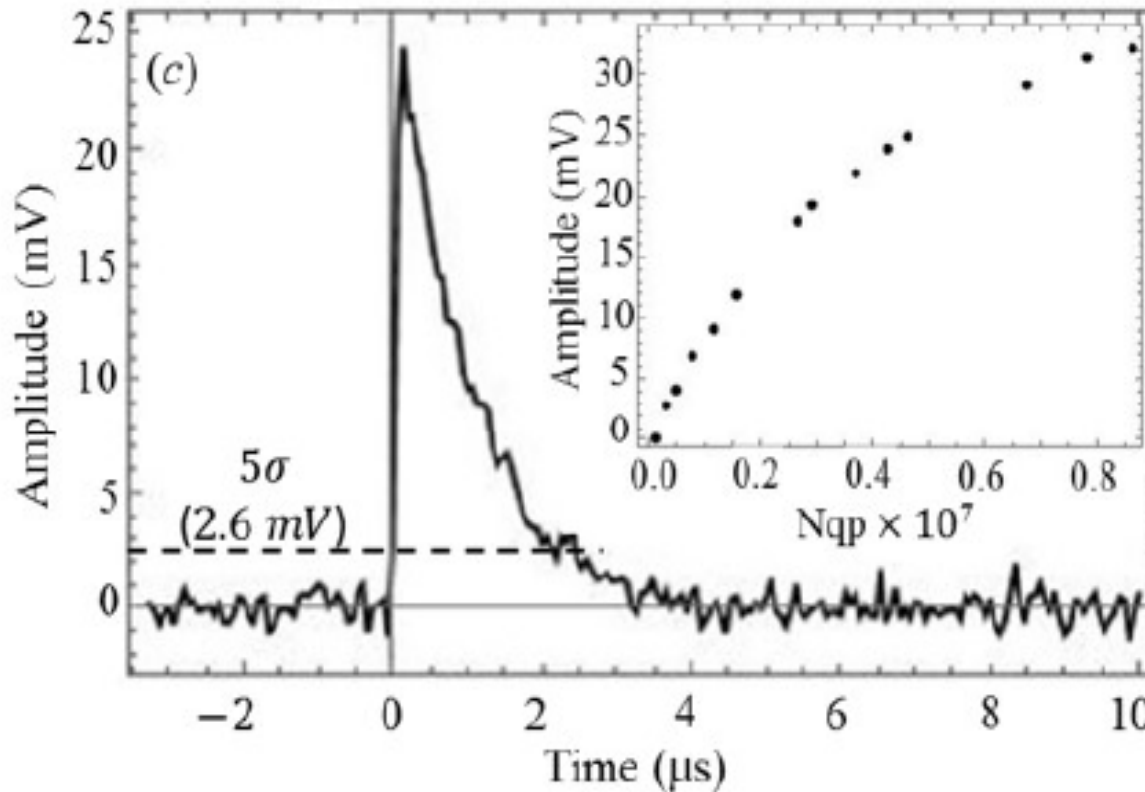
The higher Q resonator has longer pulse but has equivalent energy resolution.



α 線 (Am-241 5.49MeV, 5.44 MeV)の実験

- ^3He , 1K冷凍機で冷却

を評価
動的特性を評価



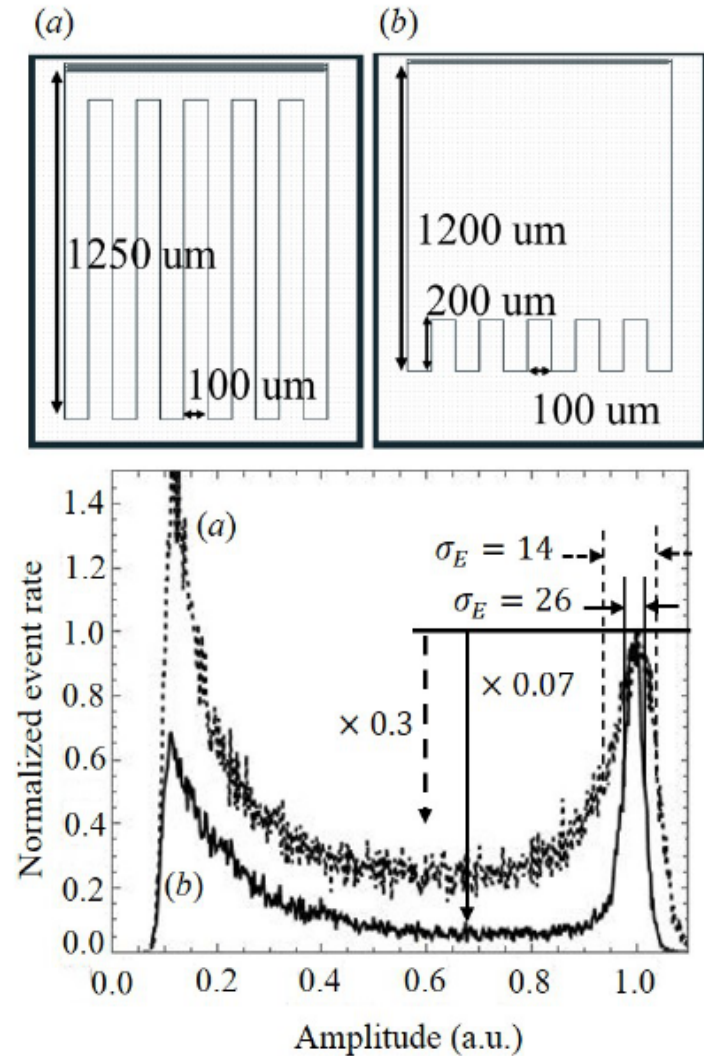
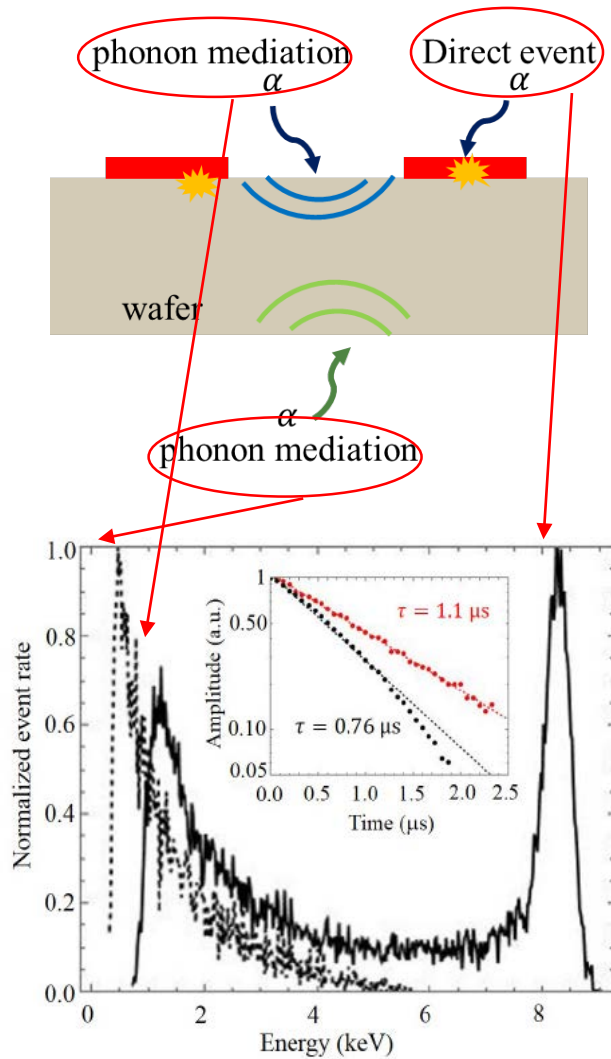
tizer

NA

MKIDs
 α -ray source



複数種のイベント



$$R \sim 1.2 \text{ keV @ } 30 \text{ keV}, \eta_{abs} = \frac{30 \text{ keV}}{5.5 \text{ MeV}} \sim \frac{1}{170}$$

theoretical limit of energy resolution of Nb-KIDs

Cardani+ APL 2015

$$\bullet \sigma = \frac{\Delta^2 N_0 V}{\eta \alpha S_2 Q} \sqrt{\frac{4Q_c}{Q^2} \cdot \frac{k_b T_n}{P_{in} \tau_{qp}}} \sim \mathbf{270 \text{ eV}} \text{ (assumed } \eta = 1)$$

where Δ : energy gap $\sim 1 \text{ meV}$,

N_0 : single spin density $1 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \mu\text{m}^{-3}$,

V : volume of Lekid $3 \times 5000 \times 0.1 \text{ in } \mu\text{m}$

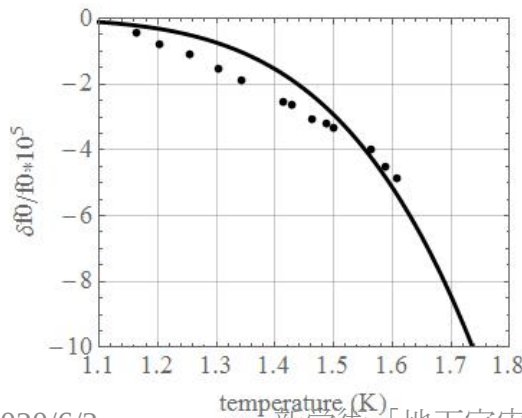
S_2 : almost unit in amp. readout

Q : loaded $Q \sim 10^4$, Q_c : coupling $Q \sim 10^4$

k_b : boltzman constant, T_n : noise temp. of HEMT $\sim 7 \text{ K}$

p_{in} : read out power, $\sim -60 \text{ dBm}$ τ_{qp} : QPs life time $\sim 10^{-9}$

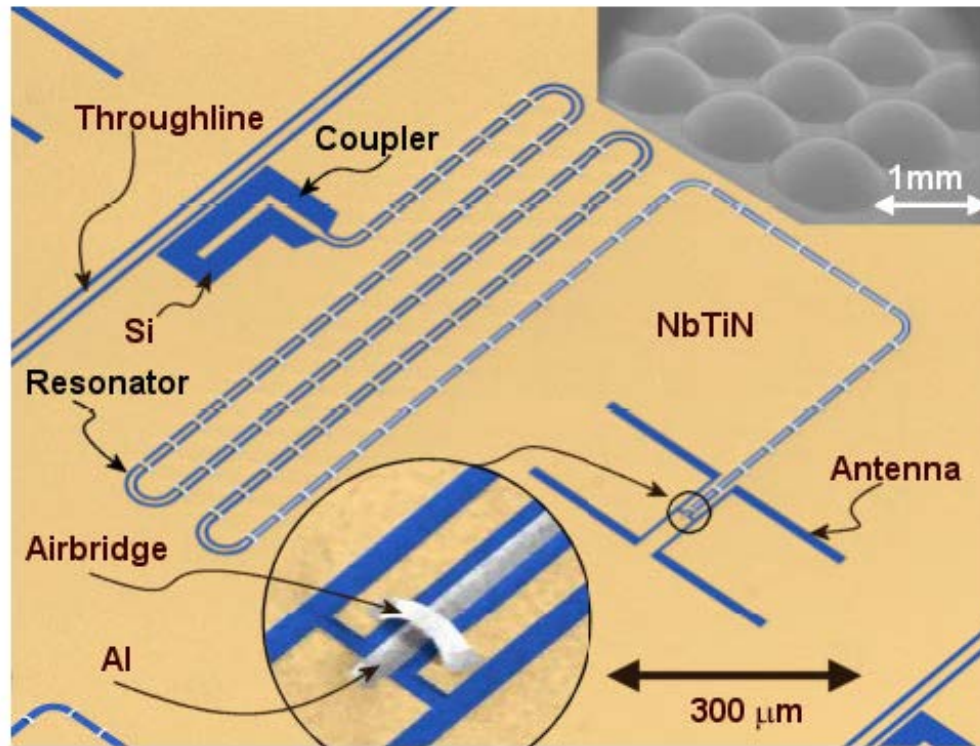
α : kinetic fraction ~ 0.08



理論値と実験値の差は4倍程度

そもそも理論値を上げられないのか??

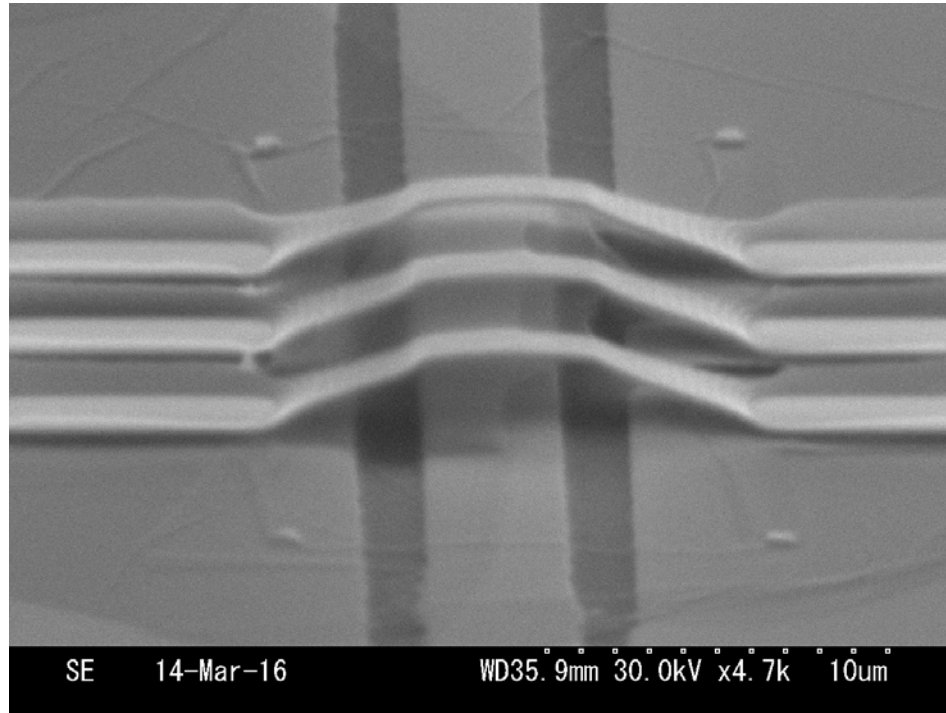
準粒子の閉じ込め



Jansen+, APL 2011

感度が高い部分を超伝導ギャップの低い超伝導体で作製し、それ以外を超伝導ギャップの大きな超伝導体で構成することで準粒子の拡散を防ぐ

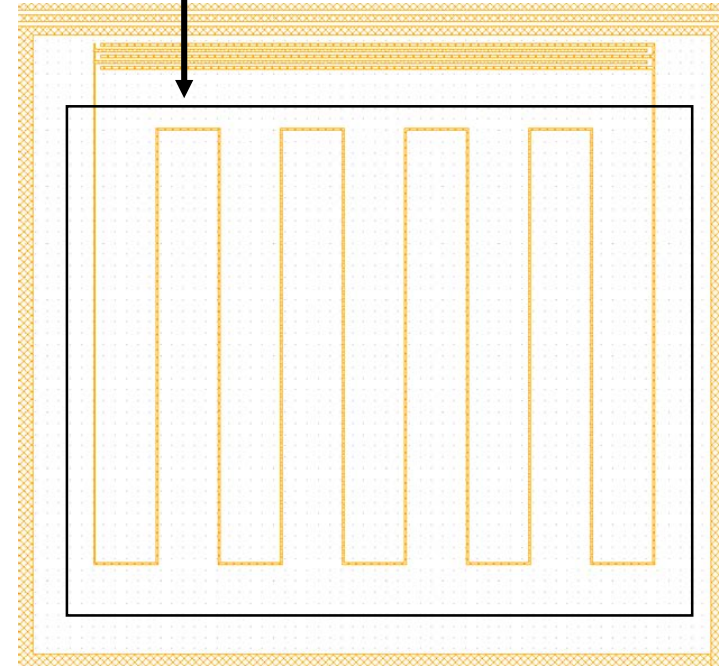
ニオブ エアブリッジによるエネルギー 閉じ込め



- 長さ 10 μm
- 幅 3 μm
- 高さ 2 μm

のニオブエアブリッジ作製に成功

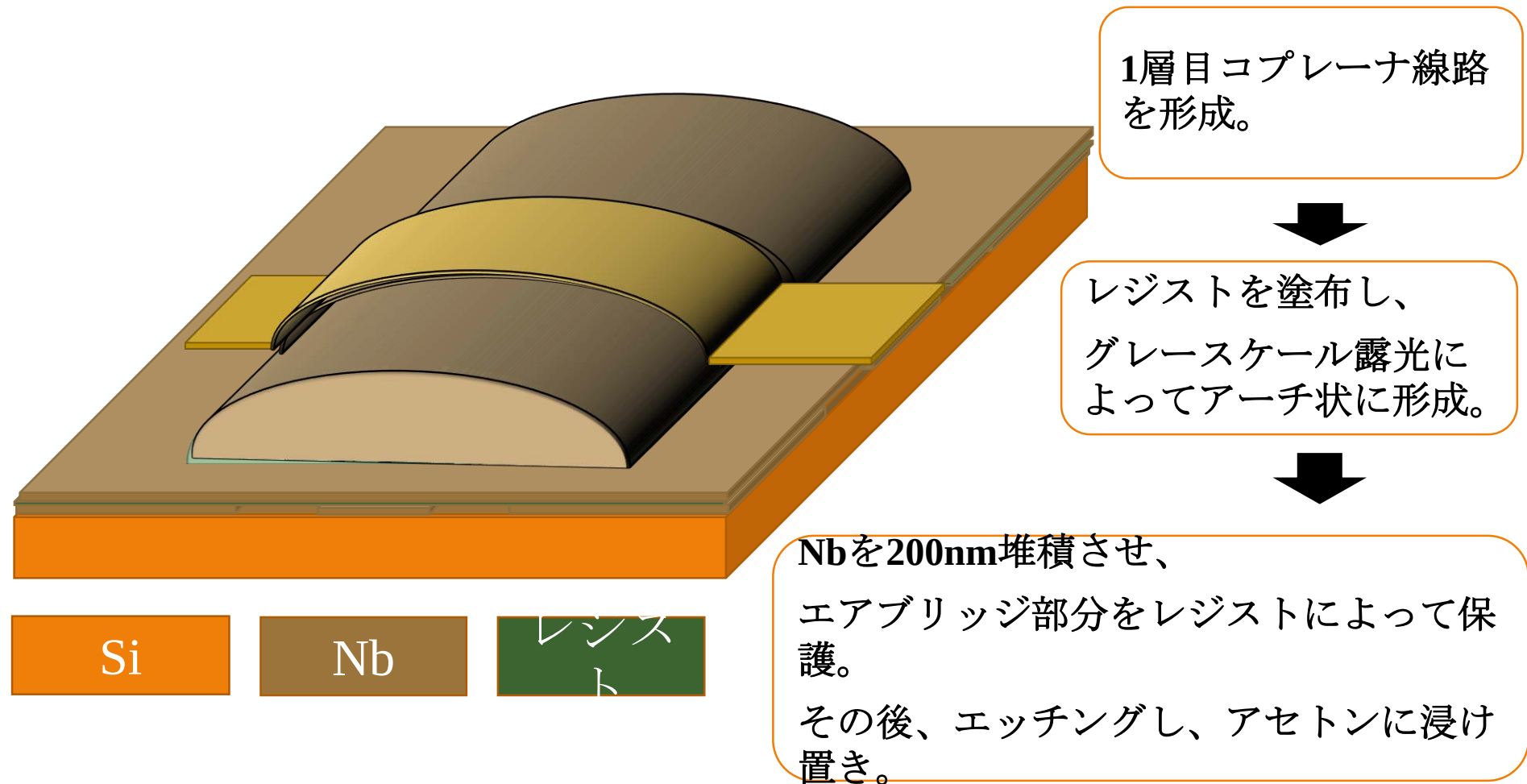
ここをエアブリッジにする



期待する効果：

- 基板イベントの抑制
- エネルギー拡散の抑制

エアブリッジ構造の作製方法



まとめ

- KIDsの紹介
- ニオブKIDsによるアルファ線検出
- エアブリッジ構造による感度向上策の提案