日本物理学会　第81回年次大会（2026年）

講演番号：14aG723-7

DarQ-Direct:
超伝導量子ビット直接励起を用いたダークフォトン・ダークマター探索

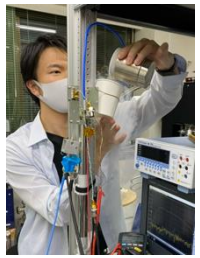
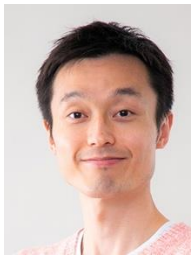
渡邉香凜^A,B^, 陳詩遠^C^, 福田朝^A^, 福山寛^D^, 稲田聡明^E^, 河井力^A,B^,諸井健夫^A,B^, 中園寛^A,B^, 新田龍海^B^, 澤田龍^E^, 野口篤史^F,G,H^, Thanaporn Sichanugrist^A^, 白井菖太郎^F^, 寺師弘二^E^

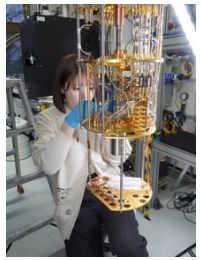
東大理^A^, 高エ研 QUP^B^, 京大理^C^, 東大低セ^D^, 東大素セ^E^, 理研RQC^F^, 東大KIS^G^, InaRIS^H^

DarQ Collaboration

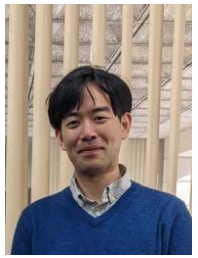
UTokyo ICEPP



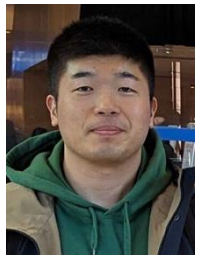





UTokyo Moroi Lab


UTokyo Noguchi Lab RIKEN RQC

KyotoU HE Lab







KEK QUP



1

DarQ Collaboration

第81回年次大会におけるDarQ Collaboration 関連講演

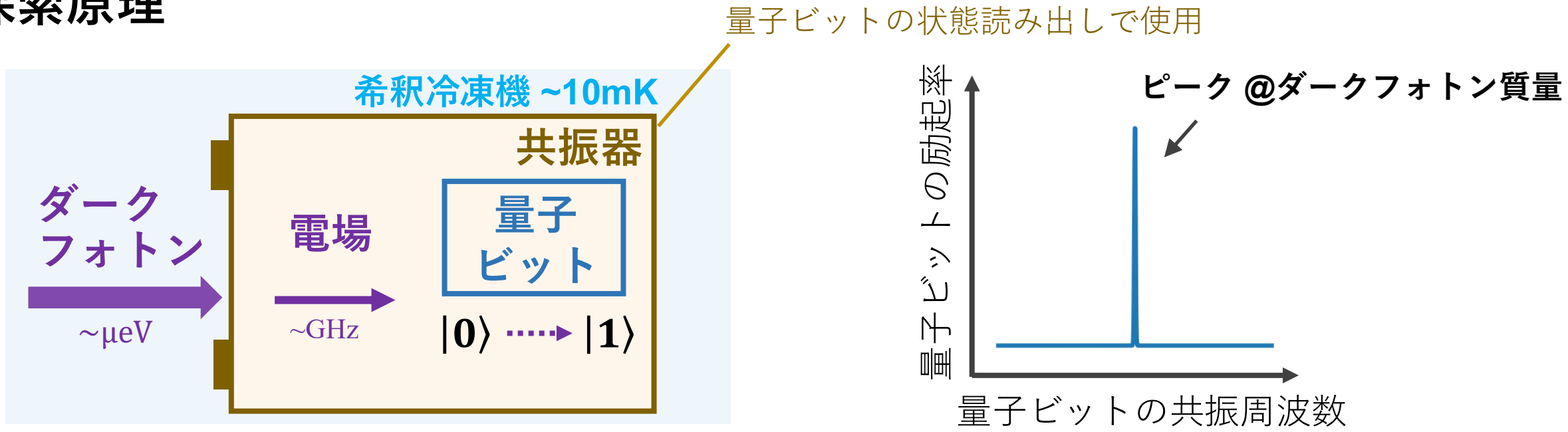
14aG723-7 : 渡邉 香凜（東大理, KEK QUP）
DarQ-Direct: 超伝導量子ビット直接励起を用いたダークフォトン・ダークマター探索

14aG723-8 : 中園 寛（東大理, KEK QUP）
強磁場下での量子センシングに向けたNb3Sn超伝導coaxial cavityの
マイクロ波特性評価

15aE521 : 中村 公亮（京大理）
2次元超伝導導波路共振器を用いた高周波重力波検出器の開発と性能評価

16aA109-3 : 河井 力（東大理, KEK QUP）
アクシオン暗黒物質探索のための超伝導量子ビットを用いた
単一マイクロ波光子検出器の開発

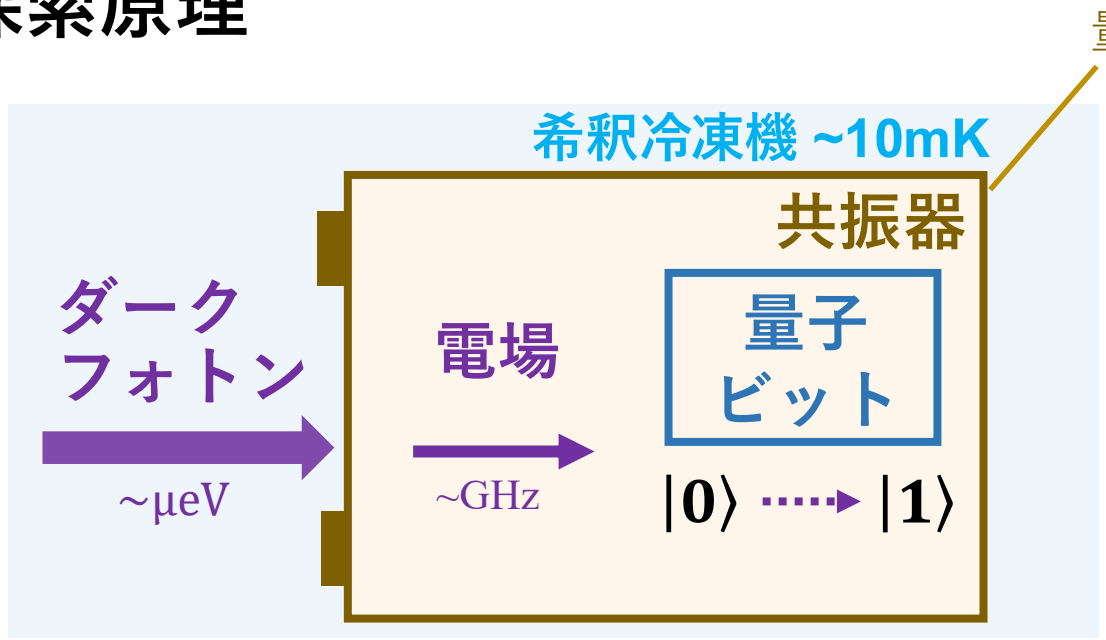
探索原理

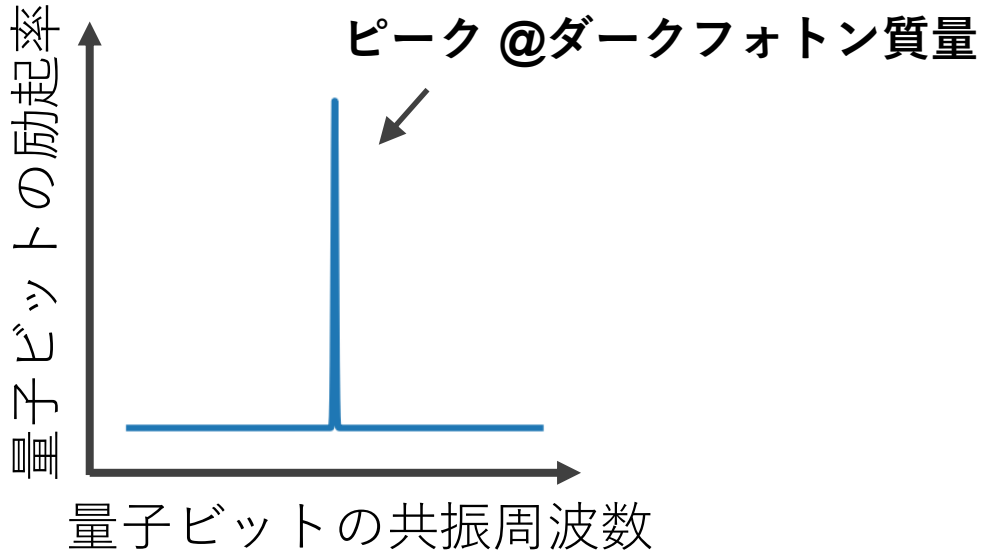


- ダークフォトンが金属壁を通過すると、その質量に対応する周波数の電場が誘起される $f \sim \frac{mc^2}{h}$
- 電場の周波数が量子ビットの共振周波数と一致すると、量子ビットが励起する
- 量子ビットの共振周波数を掃引し、励起率のピークを探索する

Moroi et al. PRL 131 (21), 211001 (2023)

探索原理

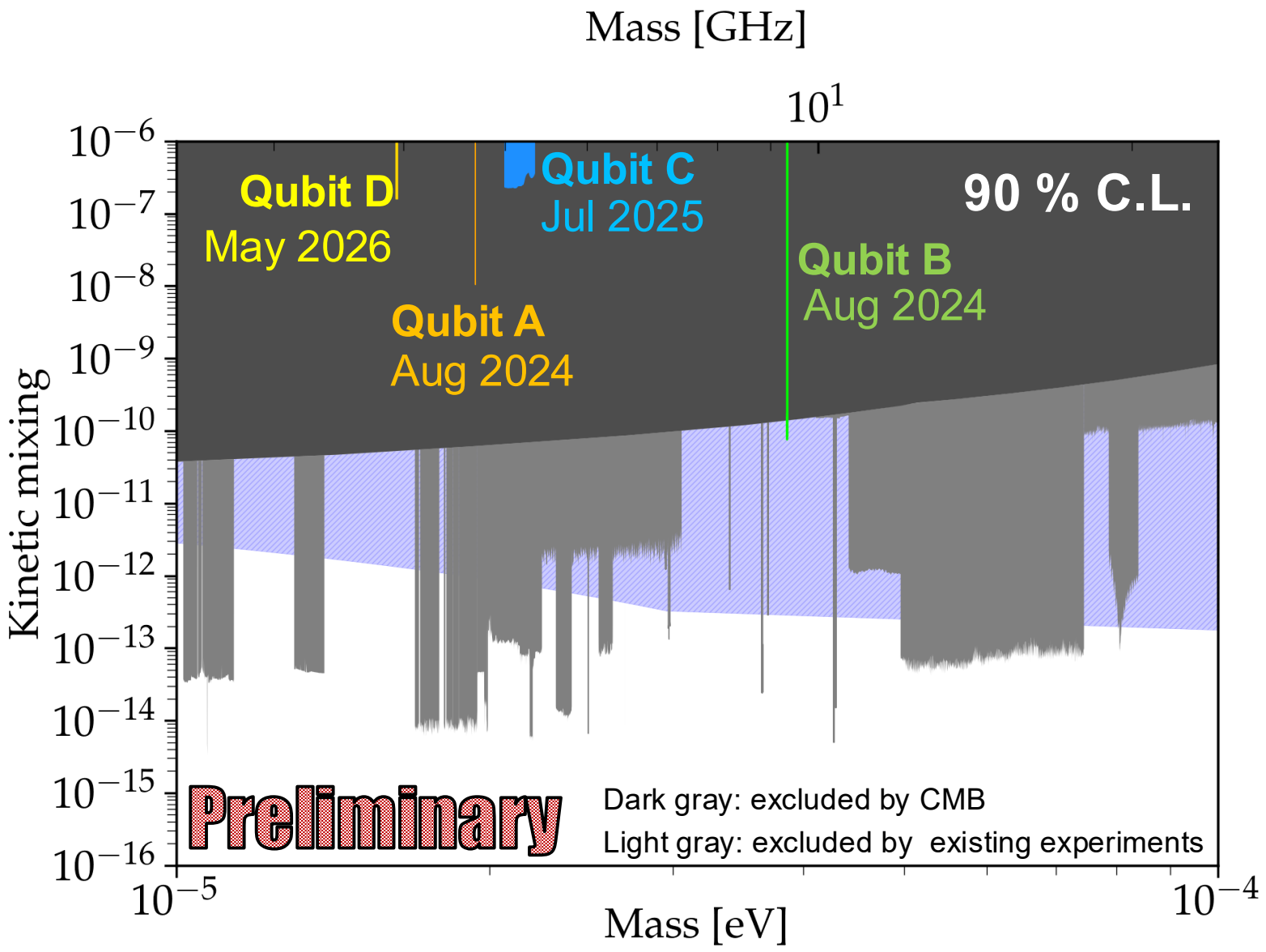




より詳しい話は
日本物理学会誌 第81巻第8号
「超伝導量子ビットの直接励起を用いた暗黒物質探索」
に掲載

Moroi et al. PRL 131 (21), 211001 (2023)

これまでの実験結果



Found no peak (>5σ)
with in the explored parameter space.

Qubit A*: 4.684018 - 4.684160 GHz
Standard 2D transmon

Qubit B : 9.3275 - 9.3398 GHz
SQUID-based 3D transmon,

Qubit C*: 4.991 – 5.325 GHz
SQUID-based 2D transmon,

Qubit D*: 3.918 – 3.972 GHz
SQUID-based 2D transmon,

*Fabricated by N.Noguchi and S.Shirai

感度改善のために必要なこと

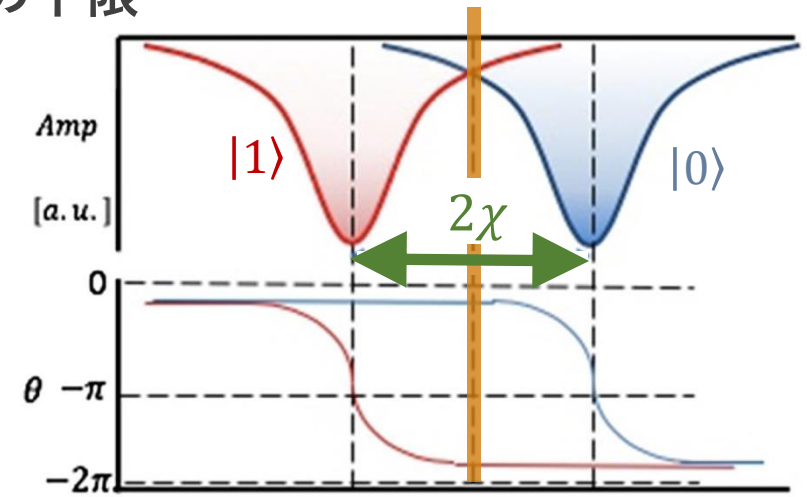
ダークフォトンによる量子ビットの期待励起確率 p_{ge} について

$$\boldsymbol{p_{ge}} \propto T_1 < T_1^{\mathrm{limit}} \propto \frac{Q_{\mathrm{loaded}}}{\chi} \propto \boldsymbol{Q_{\mathrm{loaded}}^2}$$

T_1：量子ビットのエネルギー緩和時間

期待信号を大きくするには
高いQ値を持つキャビティが必要

- **χの下限**



$f_{\mathrm{resonator}} < f_{\mathrm{qubit}}$の場合　Bare 共振器周波数　frequency

量子ビット状態に応じた反射波の振幅・位相の変化

一般に量子ビットの状態読み出し（$|0\rangle$ or $|1\rangle$）は
共振器の反射波・透過波の振幅・位相が
量子ビットの状態に応じて
2χ ずれることを利用する

ここでは議論のため
$|0\rangle|1\rangle$のピークが半値全幅離れている

$2\chi \sim \frac{f_{\mathrm{r}}}{\mathrm{Q_{loaded}}}$ を読み出しできる最小のχとした

W. Chien et al., Journal of Electronic Materials 49, 6844–6858 (2020)

アニールによる銅キャビティのQ値向上 –東大低セ福山氏との共同研究–

アニールとは

金属を高温にし、結晶の欠陥の減少 および 結晶粒の成長を促す熱処理

アニールにより、残留抵抗比 RRRなどのDC特性が改善することは知られている

GHz帯のAC特性が改善されるかは未知

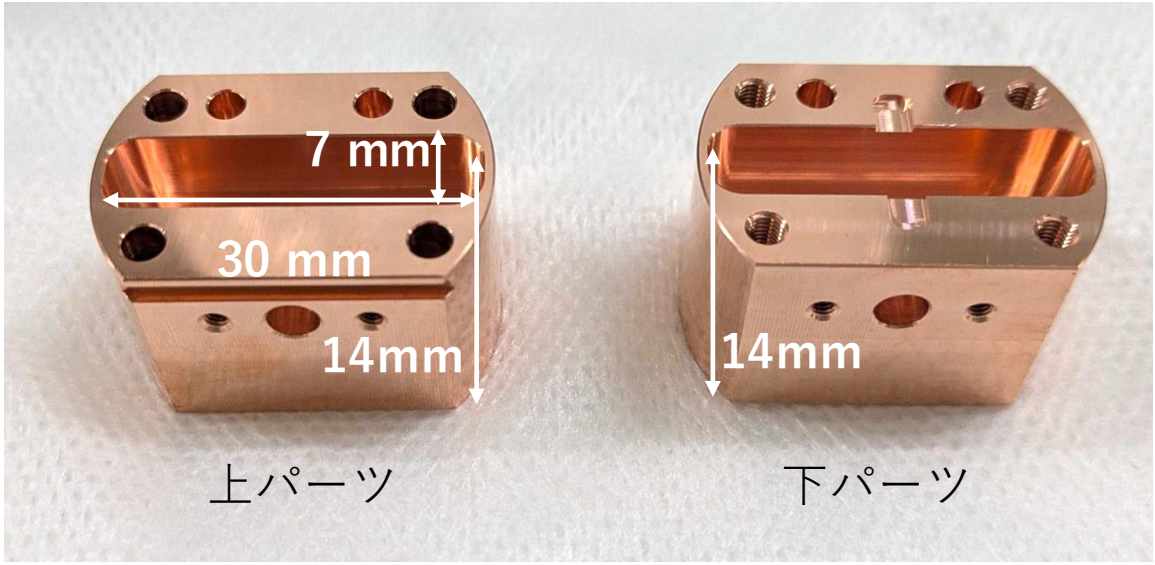
キャビティの仕様

共振周波数: ~ 7.5 GHz

材質: 無酸素銅 (C1020) ・6N銅

寸法: 7 x 30 x 28 mm^3

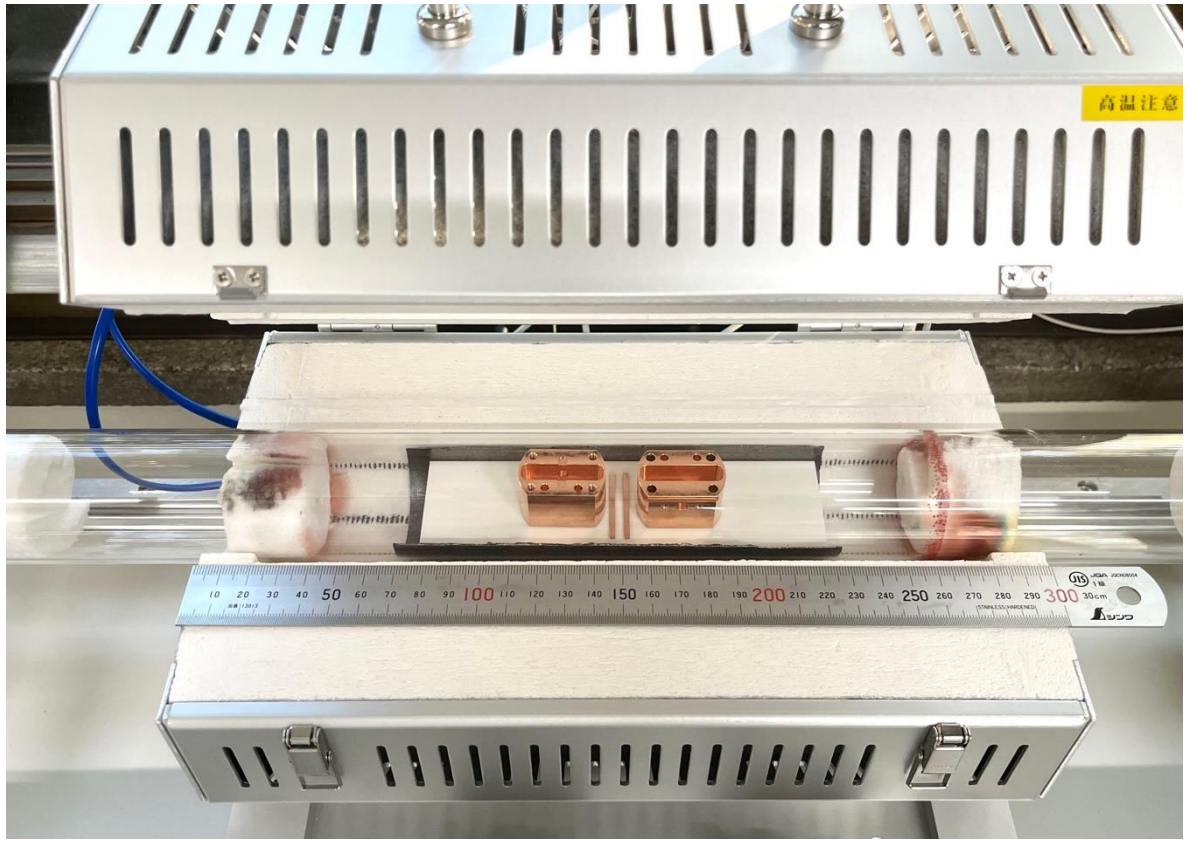
量子ビットの変調 i.e. 探索質量のスキャンに
磁場を用いるため、材質は銅を採用



実際のアニール処理の手順

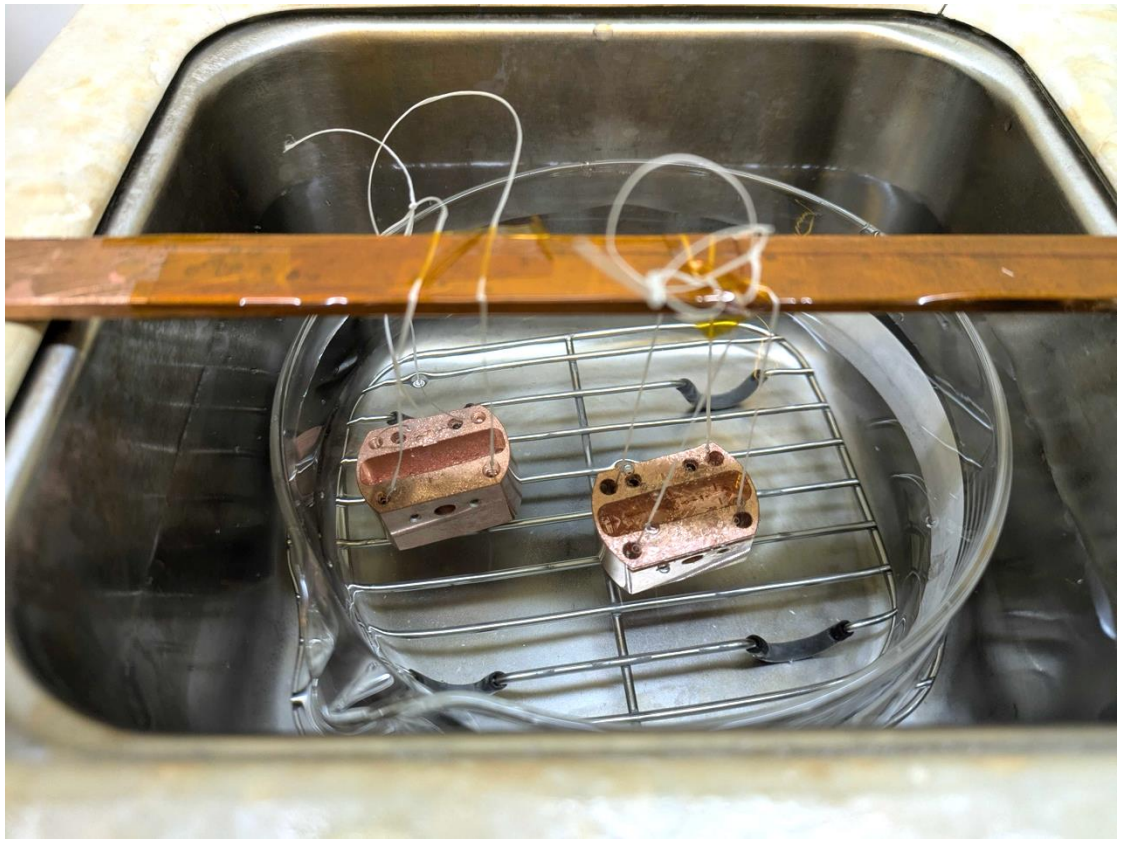
①アニール: 2時間昇温→24時間 900℃, O_2flow $2 - 4 \times 10^{-2}$ Pa →冷却 ~6時間

②酸エッチング: 3%wt 希硝酸で1時間超音波洗浄 + 超音波・流水で30分洗浄



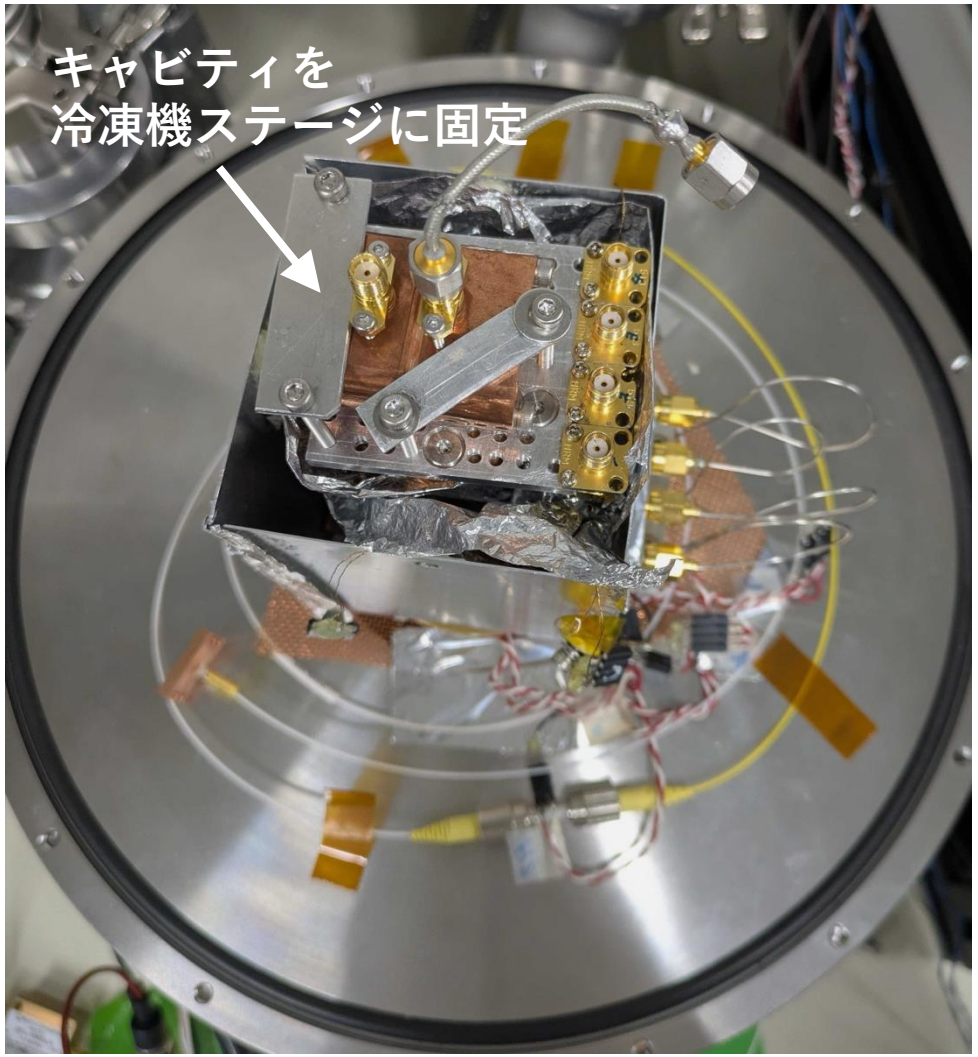
アニール*加熱直前の状態

*福山氏による

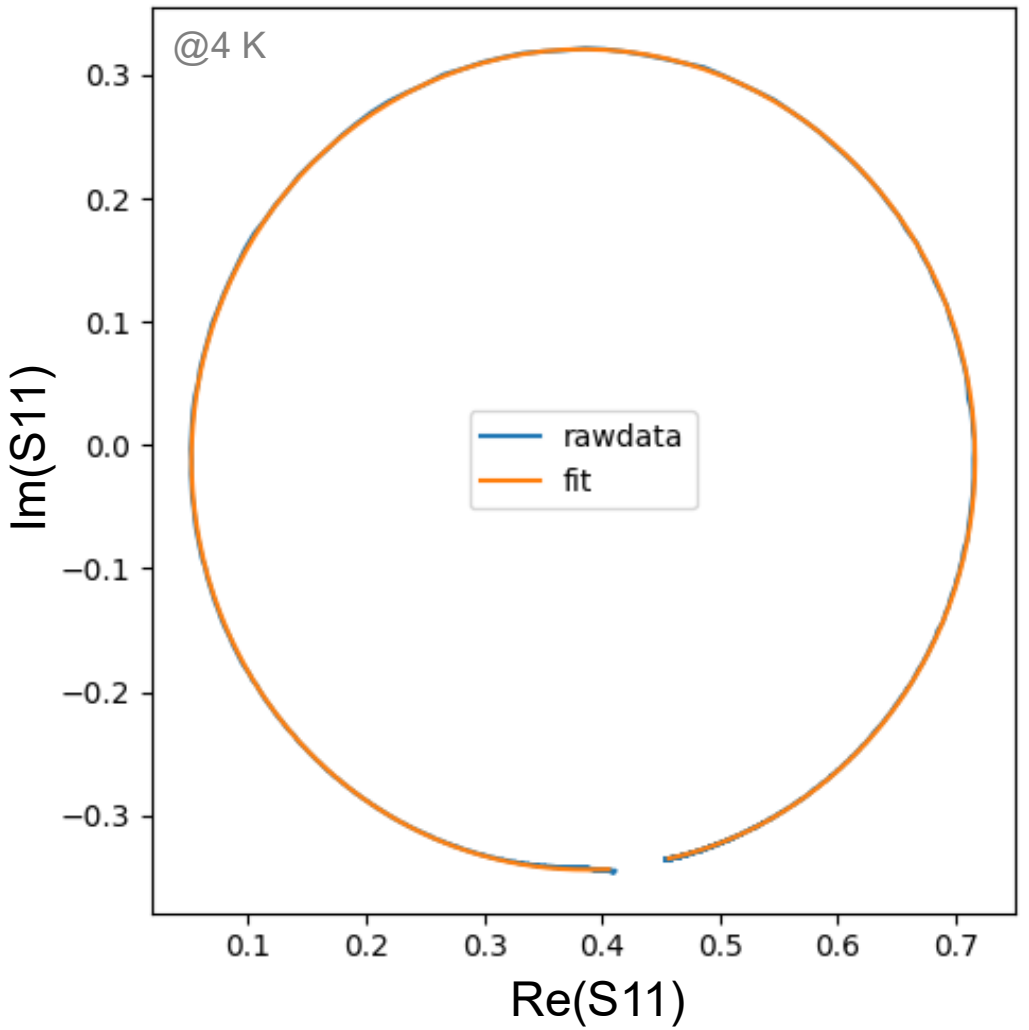


希硝酸中に吊り下げた状態での超音波洗浄

アニールしたキャビティの測定・評価

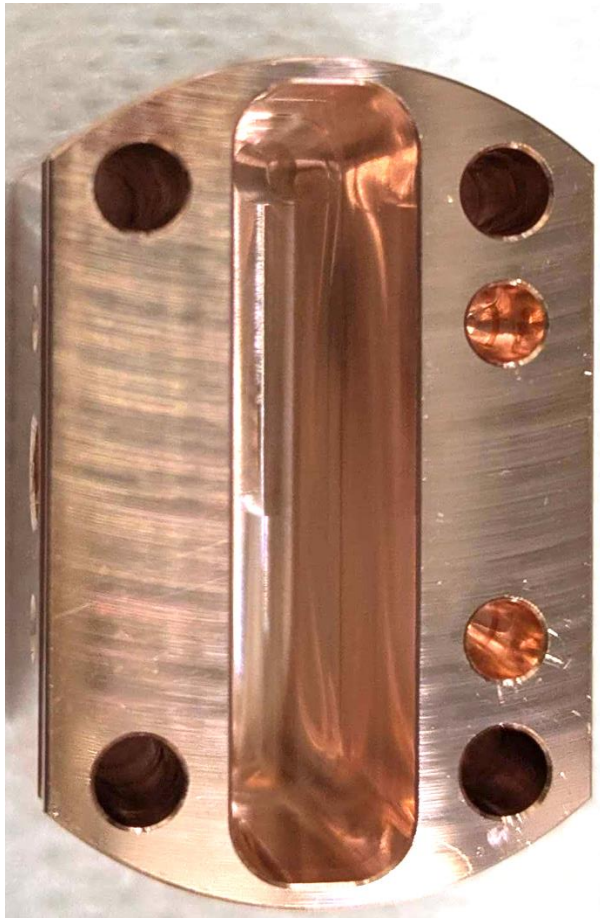


GM冷凍機@4 K での測定



アニールした無酸素銅キャビティのcircle fit結果

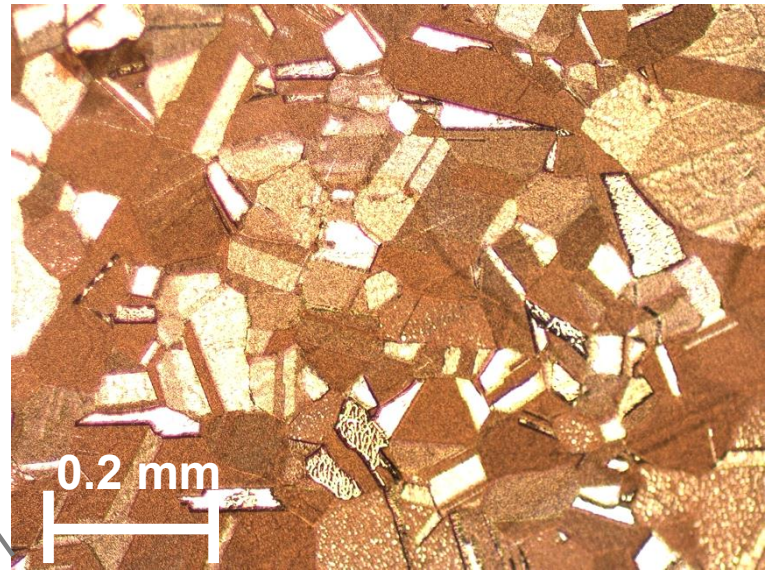
アニール前後の無酸素銅キャビティの比較



アニール前



アニール後



アニール後のキャビティの
10倍光学顕微鏡写真。

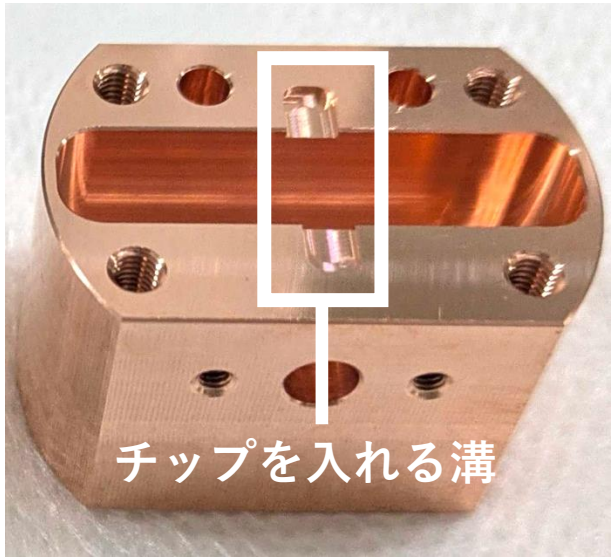
Q_i 3.3×10^4 → 1.6×10^5

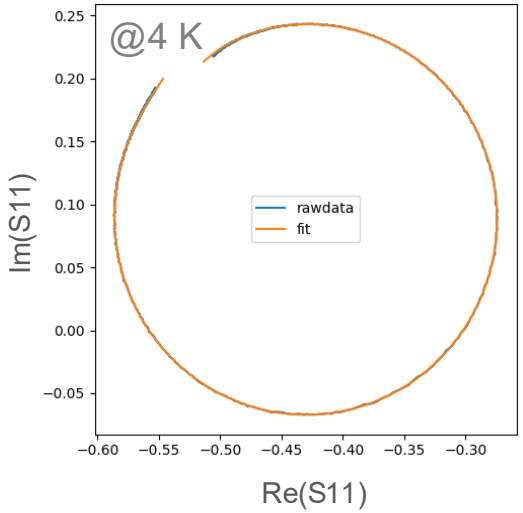
結果

- 無酸素銅 ：$Q_i = 3.3 \times 10^4 \rightarrow \mathbf{1.6 \times 10^5}$, RRR =2,270±60
- 6 N 銅 ：$Q_i = 7.4 \times 10^4 \rightarrow \mathbf{1.0 \times 10^5}^*$, RRR = 8,020

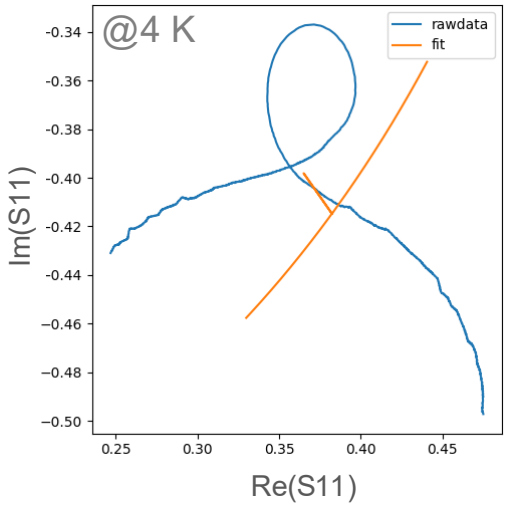
*エッチングを再度行うと $\mathbf{1.8 \times 10^5}$ まで向上

- チップ溝幅に対し、チップ幅が十分に小さいことも必要だと分かった
  - キャビティの素材（無酸素銅 or 6N銅）・チップに用いた高抵抗Siウエハのメーカー・チップのダイシング方法（ブレード or ステルス）を変えても再現
  - 293 K から 4 Kでの熱収縮率はCu: 32.6×10^{-4}, Si: 2.2×10^{-4} (Lake Shore Cryotronics, Inc., Cryogenic Reference Tables)





チップ溝幅 3 mm
チップ幅　2.8 mm



チップ溝幅 3 mm
チップ幅　3 mm

結果

- $\mathbf{Q_i = 1.6 \times 10^5}$ の無酸素銅キャビティにチップを入れた状態で、
  $\mathbf{Q_i^{chip} = 4.7 \times 10^4}$ を達成
- このとき $\boldsymbol{Q_{\mathrm{loaded}} \sim 20,000}$ （改善前は $\sim 6{,}000$ ）
- ダークフォトンによる量子ビットの期待励起確率 p_{ge} は
  $\boldsymbol{p_{ge} \propto T_1 < T_1^{\mathrm{limit}} \propto \frac{Q_{\mathrm{loaded}}}{\chi}}$ $\boldsymbol{Q_{\mathrm{loaded}}^2}$ であったから

期待信号上限を10倍大きくできる

まとめ

- 過去のパイロット実験では**T_1が感度のボトルネック**になっていた
- **T_1はQ_{loaded}^2にリミット**されていて、より感度の高い探索には
  より高いQ値のキャビティが必要 →**アニール**を実施
- 無酸素銅キャビティのQ_iを3.3×10^4 から **1.6×10^5**まで改善
- このとき**Q_{loaded}は~6,000から~20,000まで向上**したことも確認した
- これにより**期待信号上限は10倍になる**
- 今後はアニールした銅キャビティを用いて本探索の準備を進める

謝辞

大変お世話になっています

- 東京大学マテリアル先端
  リサーチインフラ・データハブ拠点の皆さま
- 東京大学低温科学研究センター 極低温量子プラットフォーム …
  福山寛 氏、戸田亮　氏
- 東京大学工学系研究科 総合研究機構ナノ工学研究センター
  府川和弘 氏、飯盛桂子 氏
- 東京大学理学部物理学科試作室
  大塚茂巳　氏、下澤東吾　氏
- 沖縄科学技術大学院大学エンジニアリングユニット
  宮澤拓也 氏
- スイス連邦工科大学ローザンヌ校
  河野信吾 氏 、CMiクリーンルームの皆さま
- 産業総合研究所
  超伝導量子回路試作施設の皆様
- Fermi Lab
  Sara Sussman 氏, Fang Zhao 氏, Aaron Chou氏

希釈冷凍機を使った実験は
東京大学低温科学研究センター
共同利用装置を使用して行いました。