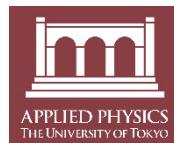


2024年3月26日

超伝導量子コンピュータの研究開発

中村 泰信

理化学研究所量子コンピュータ研究センター
東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻



2021年4月設立

野口篤史 (ハイブリッド系)

古澤明 (副センター長、光子)

米澤英宏 (光子)

福原武 (冷却原子)

川上恵里加 (浮揚電子)



中村泰信 (センター長)

蔡兆申

阿部英介

田渕豊



萬伸一 (副センター長)



樽茶清悟



光子
原子
電子

超伝導

半導体

理論

LOSS Daniel



藤井啓祐

NORI Franco

柚木清司

後藤隼人

REGULA Bartosz

桑原知剛



佐藤信太郎

(理研RQC-富士通連携センター副センター長)

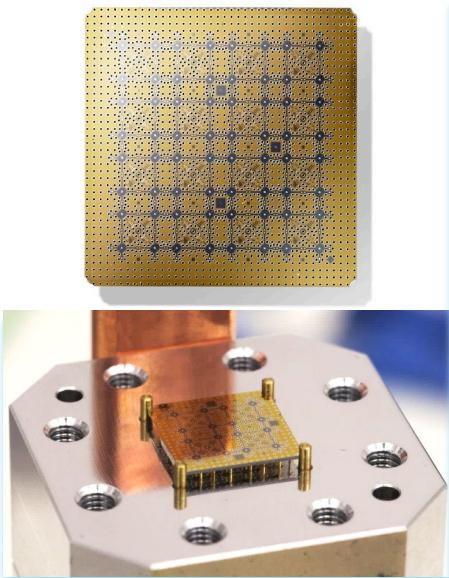
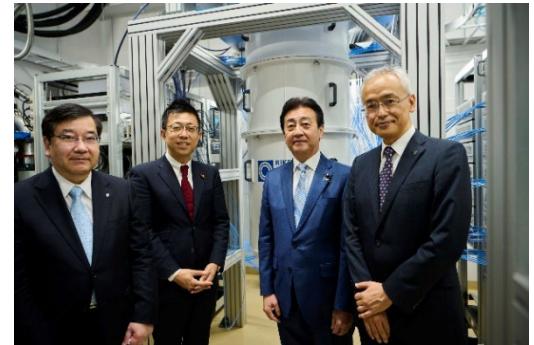
- ・ 量子コンピュータ実現に向け、フルスタックの研究開発を推進
- ・ ブレークスルーを目指して、基礎から応用まで多様な人材が協働
- ・ 開かれた拠点として、産官学・国内外の諸機関と広く連携
- ・ 次世代の量子技術を担う人材を育成

超伝導量子コンピュータ実機公開



理化学研究所量子コンピュータ研究センターにおける
国産初の実機立ち上げとクラウド公開

2023年3月27日



『叡』

64量子ビット超伝導量子コンピュータシステム

超伝導量子コンピュータ実機公開



RIKEN
QUANTUM
COMPUTING

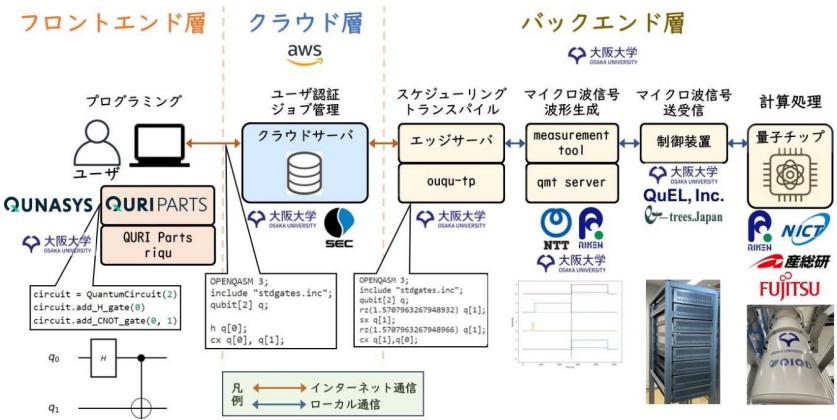
理研RQC－富士通連携センターにおける2号機公開

2023年10月5日



大阪大学量子情報・量子生命研究 センターにおける3号機公開

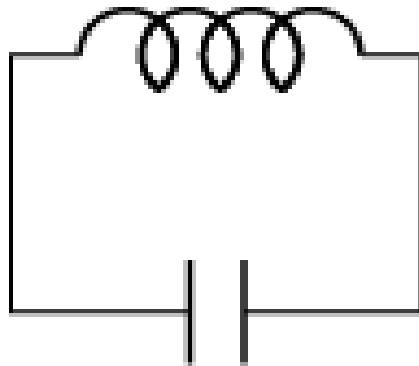
2023年12月20日



64量子ビット超伝導量子コンピュータシステム

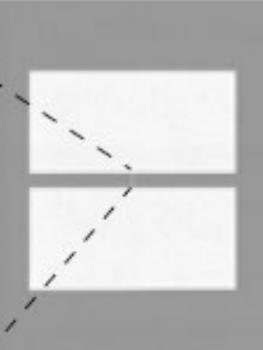
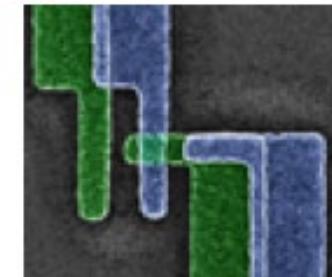
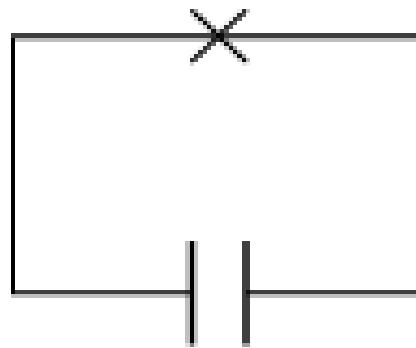
超伝導量子ビット = 非調和振動子

LC共振回路



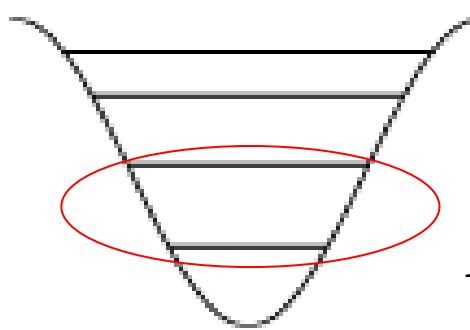
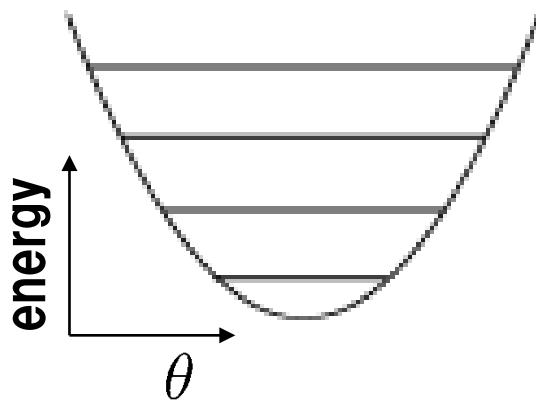
ジョセフソン接合共振回路

ジョセフソン接合 = 非線形インダクタ



$0.5 \mu\text{m}$ 0.5 mm

非調和性 \Rightarrow 有効2準位系



$E_{01} \sim 10 \text{ GHz} \sim 0.5 \text{ K}$

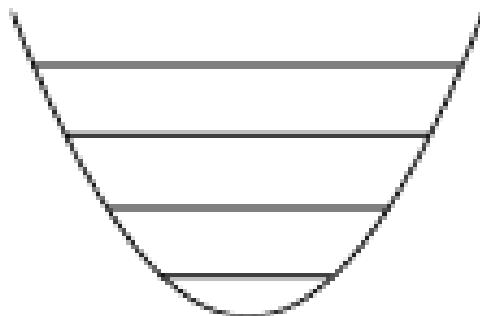
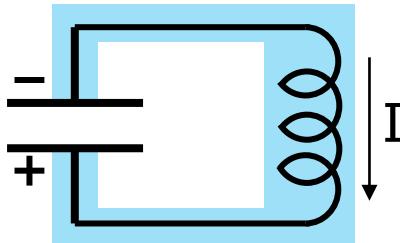
$T \sim 0.01 \text{ K}$

誘導エネルギー = 閉じ込めポテンシャル

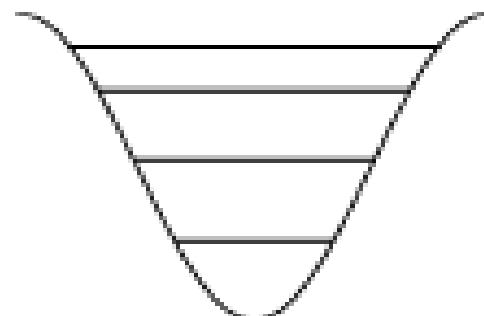
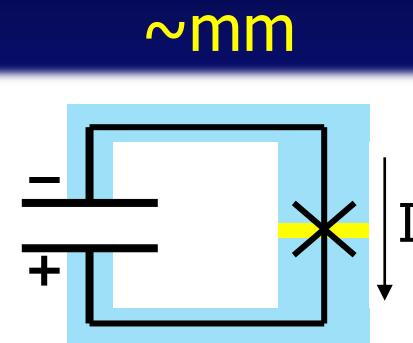
帯電エネルギー = 運動エネルギー \Rightarrow エネルギー準位の量子化

原子と人工原子

LC共振回路

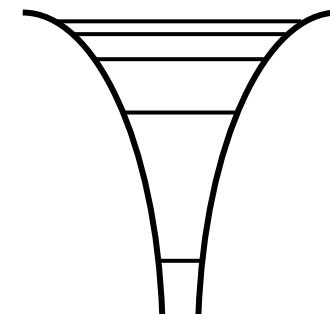
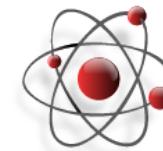


超伝導量子ビット
= 人工原子



原子

$\sim \text{\AA}$



- ・超伝導 \Rightarrow 低損失
- ・ジョセフソン効果 \Rightarrow 強い非線形性
- ・巨視的サイズ \Rightarrow 電磁場と強く結合

デコヒーレンス要因

磁場揺らぎ?

トラップされた磁束?

電子 / 核スピン?

電荷揺らぎ?

周辺回路モード?

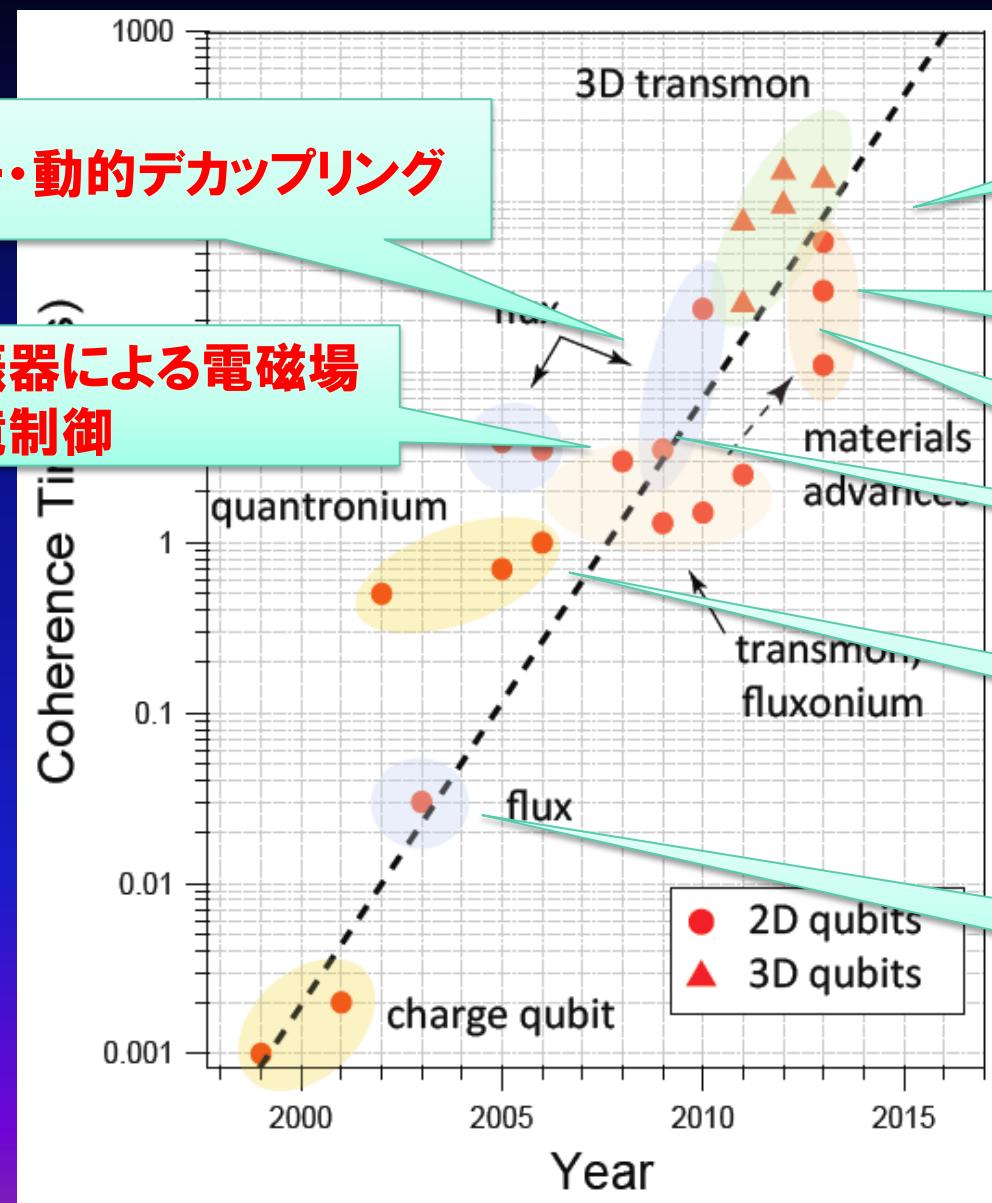
フォノン?

準粒子トンネリング?

光子?

電荷 / ジョセフソンエネルギー揺らぎ?

超伝導量子ビットのコヒーレンス時間



低エネルギー化

非平衡準粒子対策

高周波雑音シールド

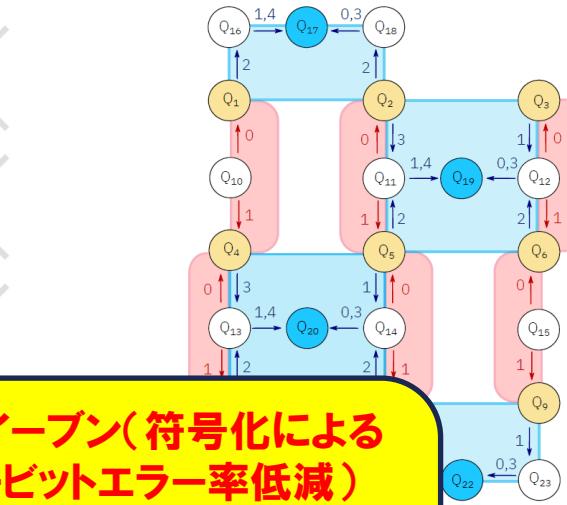
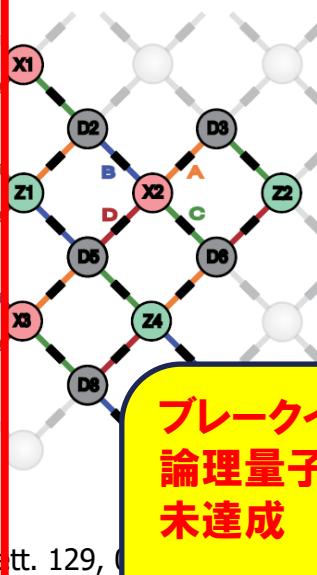
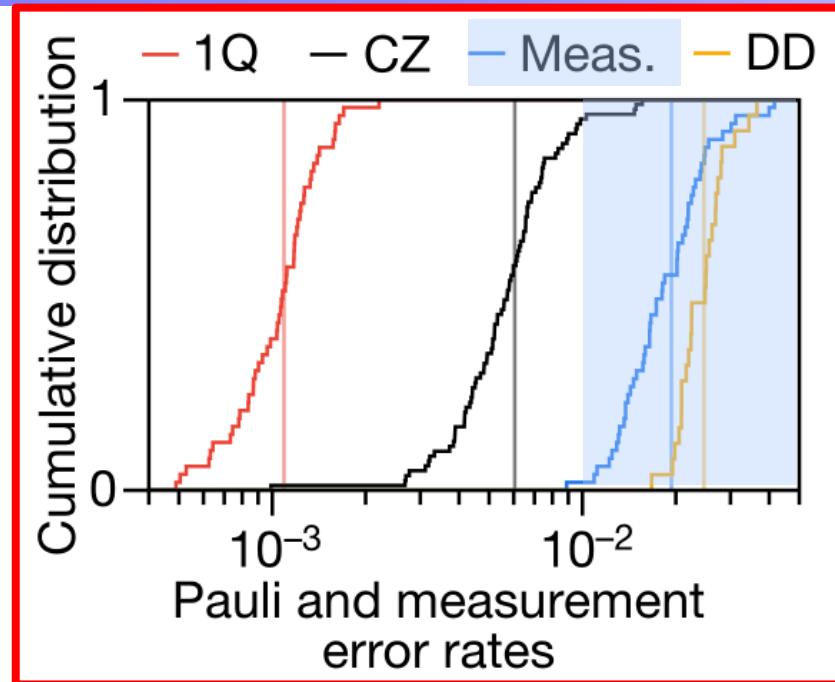
表面・界面欠陥の影響希釈

表面・界面・誘電体の改善

エネルギー準位構造最適化

電荷ノイズの影響抑制

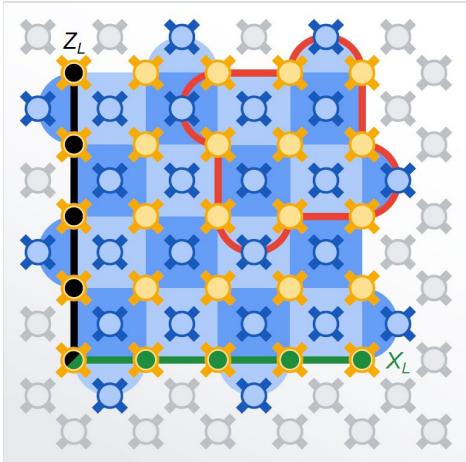
量子誤り訂正の実現に向けて



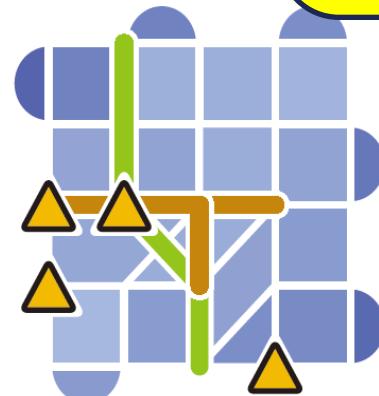
ブレークイーブン(符号化による
論理量子ビットエラー率低減)
未達成

cf. ボゾニック符号では実現済
(GKP, binomial, cat, etc.)

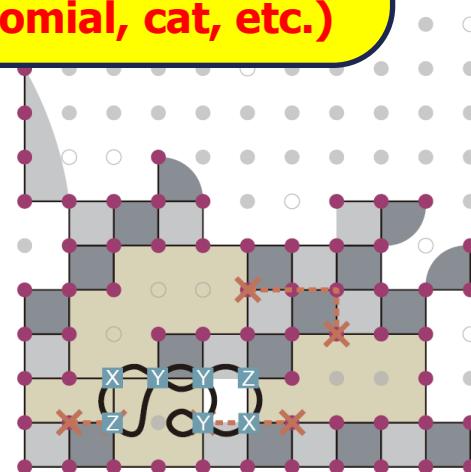
Surface code $d=5$



Google AI Quantum
Nature 614, 676 (2023)



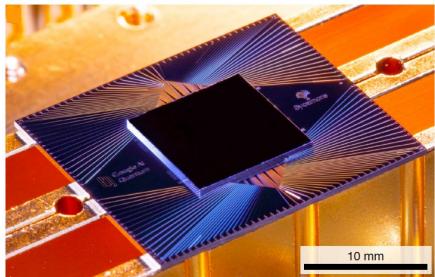
Google AI Quantum
Nature 618, 264 (2023)



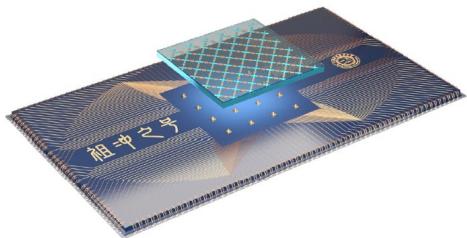
Zhejiang Univ.
Chinese Phys. Lett. 40, 060301 (2023)

可変周波数 vs 固定周波数量子ビット

可変周波数量子ビット・可変結合回路

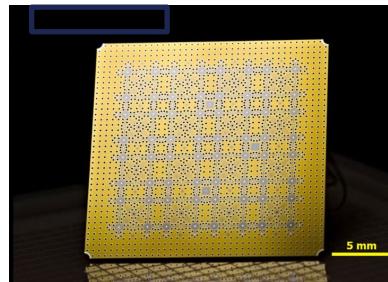


Google

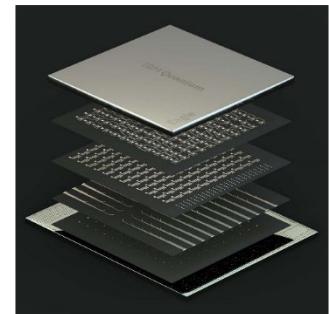


USTC

固定周波数量子ビット・固定結合回路



RIKEN



IBM

- 回路構成が複雑化
- 高い配線コスト
- 磁束バイアスの必要性
- 短いコヒーレンス時間
- 高速2量子ビットゲート
- 残留結合の抑制
- プロセスばらつきの補償可能

- 単純な回路構成
- 低い配線コスト
- 磁束バイアス不要
- 長いコヒーレンス時間
- 2量子ビットゲート低速
- 量子ビット間の残留結合
- プロセスばらつきによる周波数衝突

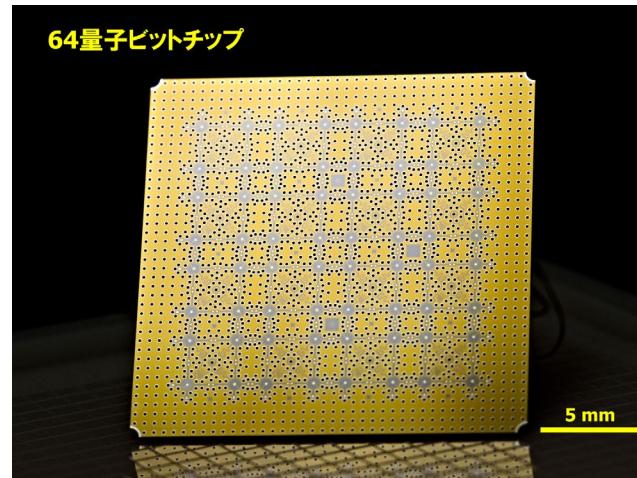
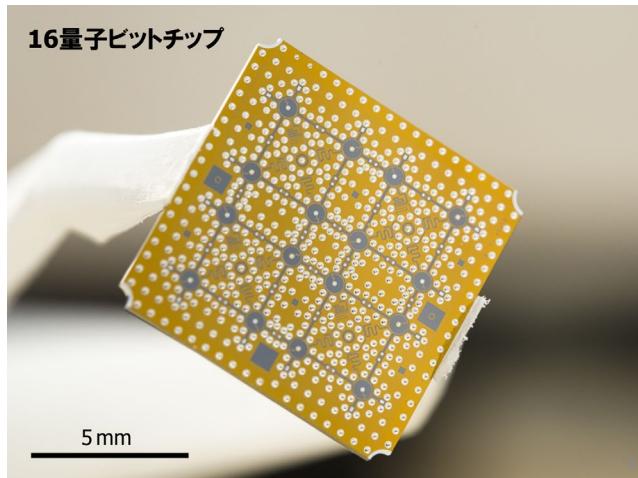
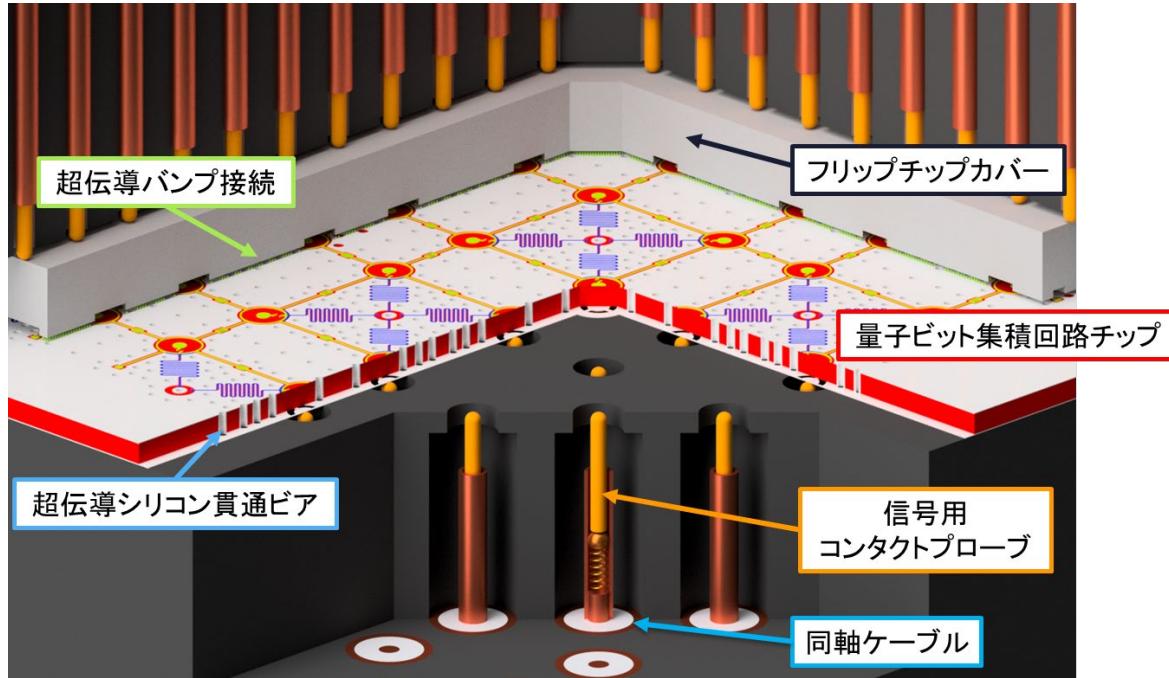
固定周波数量子ビット・可変結合回路

共振器(ボゾニックモード)・可変結合回路

Q-LEAPでの取り組み

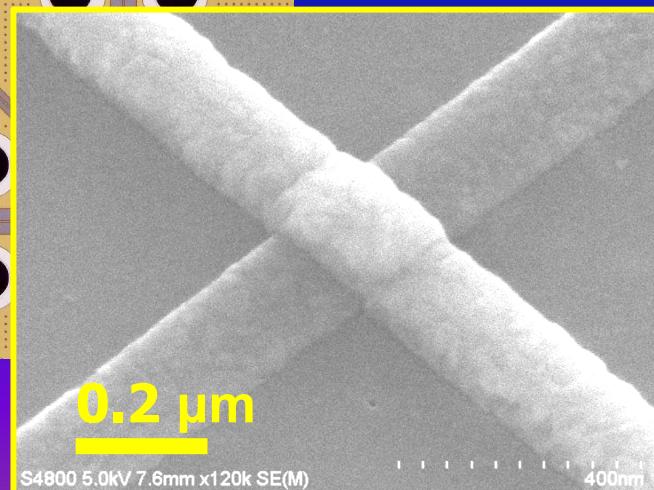
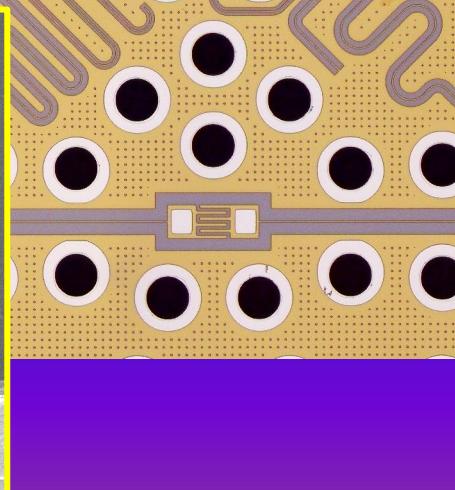
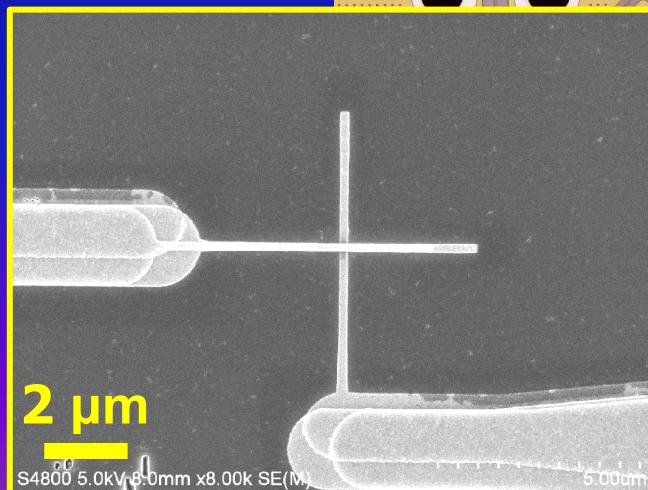


NISQ応用への
プラットフォーム
を提供しつつ、
誤り耐性量子計
算実現への道筋
を探求



独自方式 超伝導量子ビット2次元集積回路+垂直配線パッケージ

ユニットセル構造



ユニットセル構造

ユニットセル構造 量子ビット 読み出し共振器

ジョセフソン接合

金色: TiN

銀色: Al

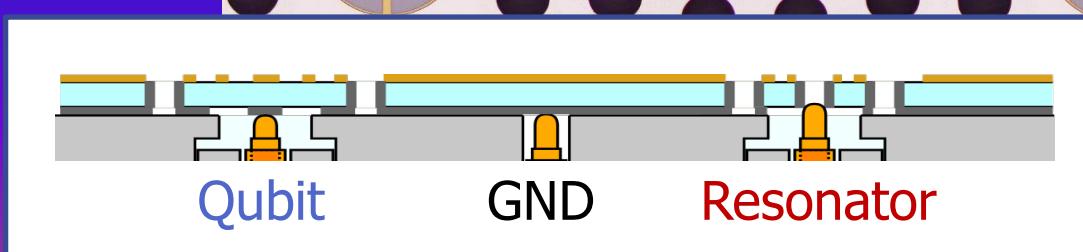
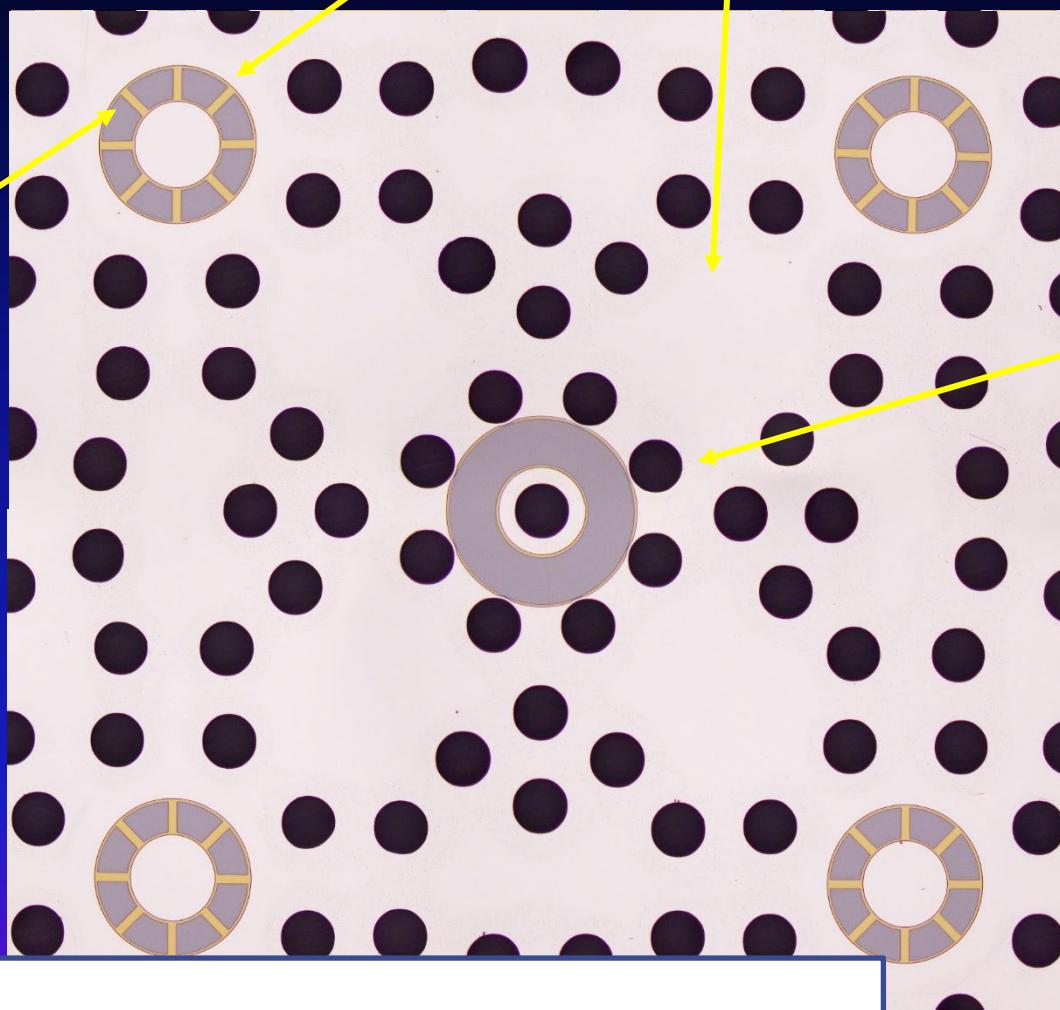
灰色: Si

黒: 貢通穴

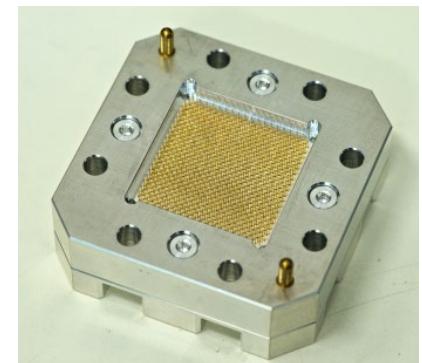
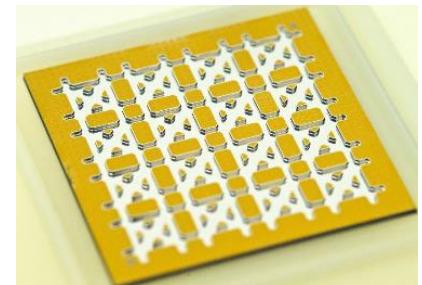
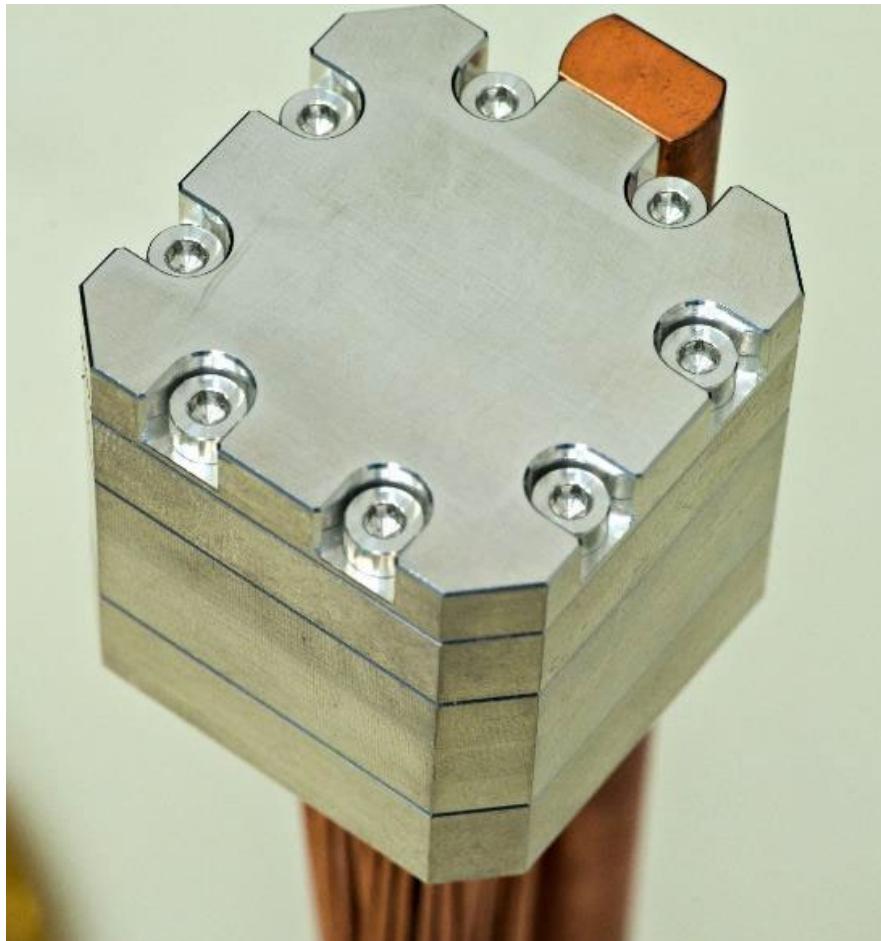
0.5 mm

フィルタ共振器

裏面



垂直配線パッケージング



64量子ビット実験用大型希釈冷却機

- 入力配線 96本*、出力配線 16本
計112本
- 低温低雑音増幅器 (16台)
- 低温ジョセフソンパラメトリック
増幅器(JPA) (16台)
- 磁気遮蔽付き試料パッケージ
- 極低温熱輻射遮蔽
- 極低温環境 ~10 mK

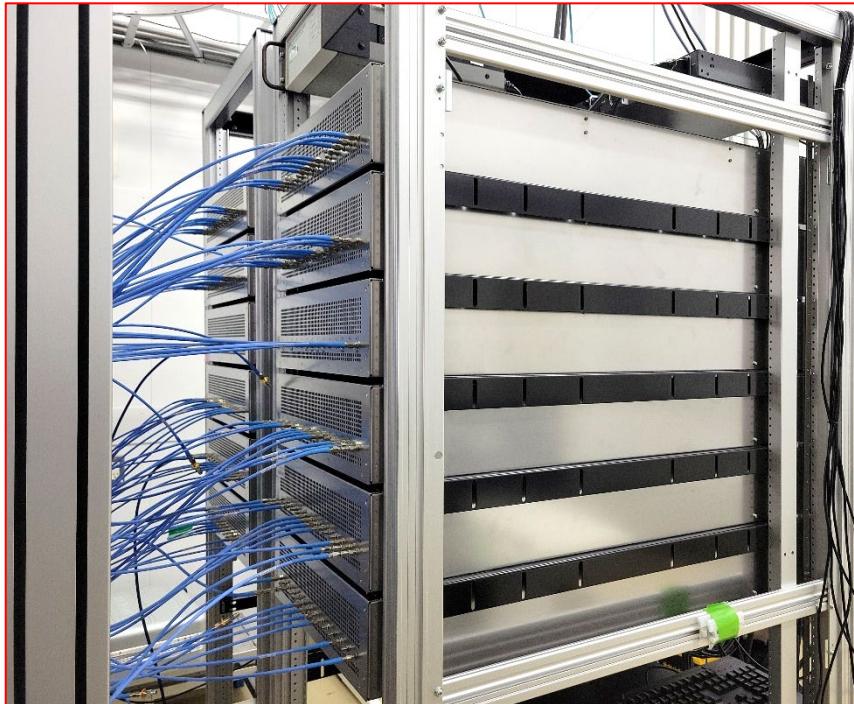
* 量子ビット制御 64本
読み出し信号入力 16本
JPA駆動マイクロ波入力 16本



制御装置開発:多チャンネルマイクロ波制御・読み出し



量子ビット制御
64本
読み出し信号入力
16本
JPA駆動
マイクロ波入力
16本



計測ソフトウェア開発協力



→
スタートアップ

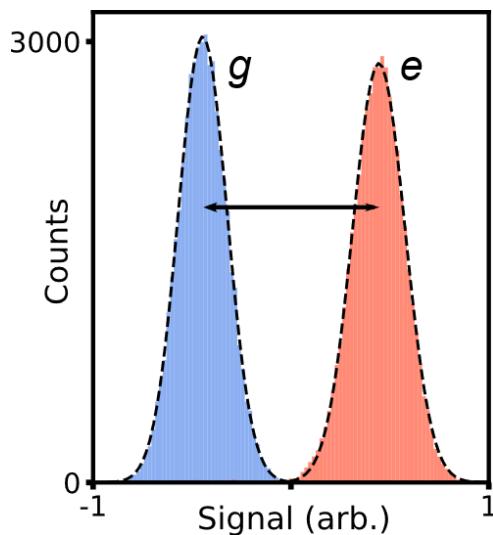
QuEL

コヒーレンス時間 : $T_1 \sim 90 \mu\text{s}$, $T_{2E} \sim 100 \mu\text{s}$
单一事象読み出し : 0.9967 ($\sim 96 \text{ ns}$)
1量子ビットゲート : 0.9996 ($\sim 17 \text{ ns}$)
2量子ビットゲート : 0.991 ($\sim 170 \text{ ns}$)

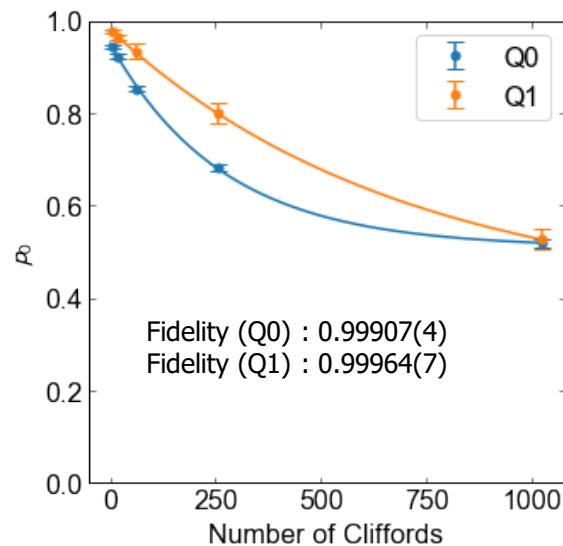
@ ~8 GHz

Best values

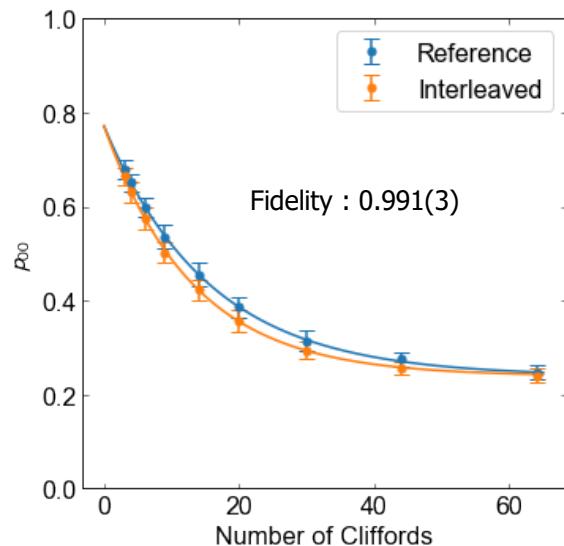
单一事象読み出し



1量子ビットゲート

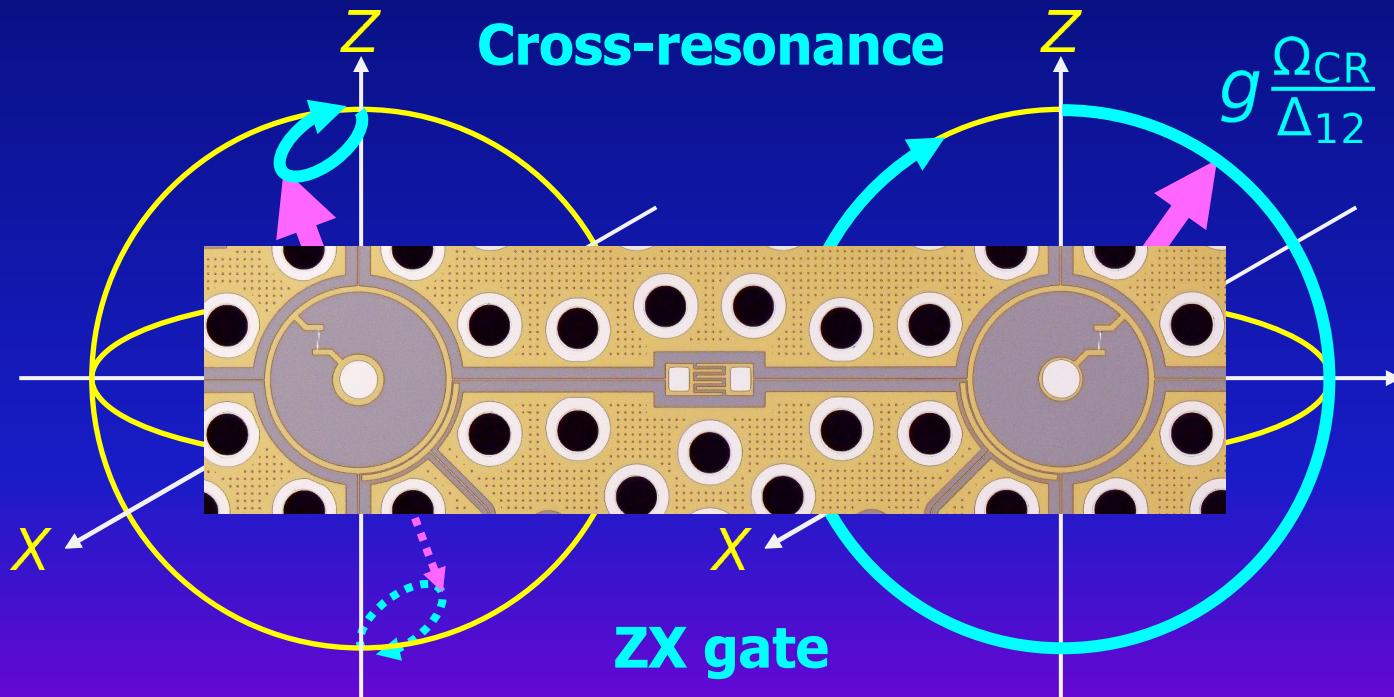


2量子ビットゲート (交差共鳴ゲート)



2量子ビットゲート

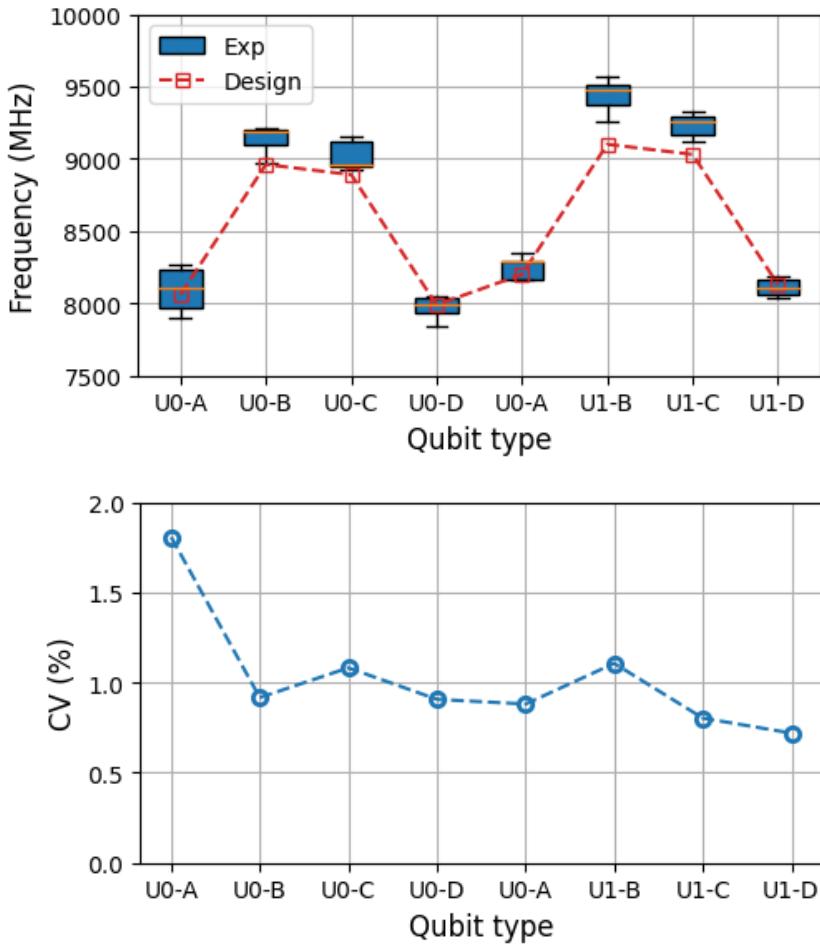
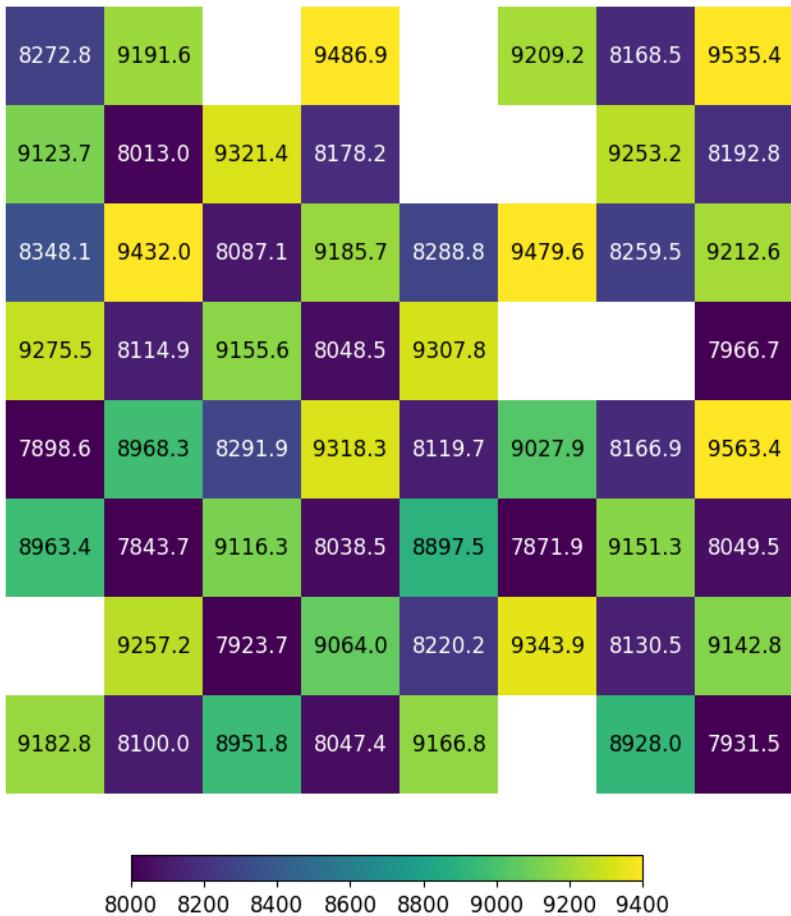
$$\frac{H}{\hbar} = \frac{\omega_{q1}}{2} \sigma_{z1} + \frac{\omega_{q2}}{2} \sigma_{z2} + g \sigma_{x1} \sigma_{x2} + \Omega_{CR} \cos \omega_{q2} t \sigma_{x1} \quad \Delta_{12} \equiv \omega_{q1} - \omega_{q2} \gg g$$



量子ビット周波数ばらつき抑制



量子ビット周波数 (MHz)



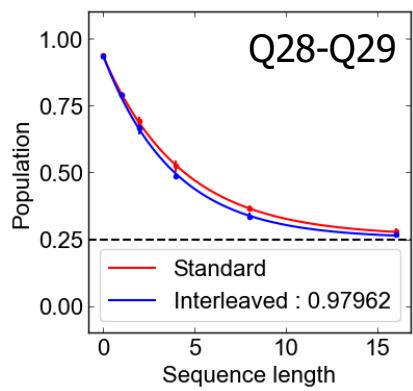
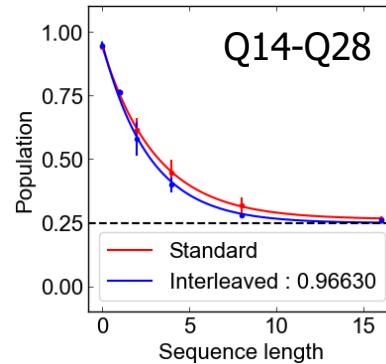
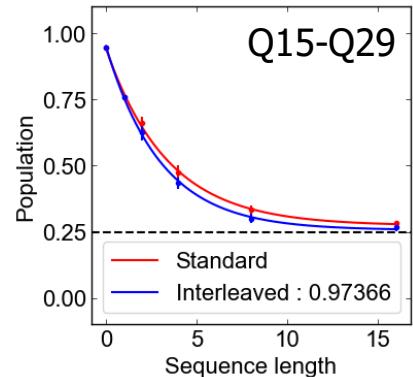
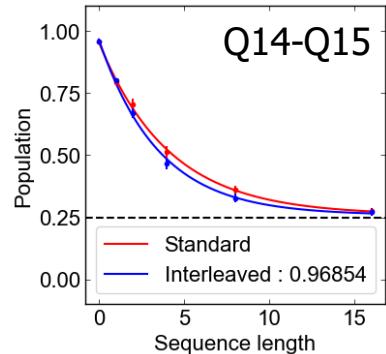
量子ビット周波数ばらつき: $\frac{\sigma_\omega}{\langle \omega \rangle} \sim 1\%$

殘留ZZ相互作用低減

Residual ZZ coupling $\Omega_{ZZ}/(2\pi)$ (kHz)



2Q-gate performance



$$\Omega_{ZX}/(2\pi) \sim 1.5 \text{ MHz}$$

- 2Q gate time = 150 ~ 200 ns
 - 2Q fidelity ~ 97%, limited by T_1

ジョセフソン接合電圧パルスアニーリング

Alternating Bias Assisted Annealing of Amorphous Oxide Tunnel Junctions

D. P. Pappas,^{1,*} M. Field,¹ C. Kopas,¹ J. A. Howard,¹ X. Wang,¹ E. Lachman,¹ Lin Zhou,^{2,3} Jinsu Oh,^{2,3} K. Yadavalli,¹ E. A. Sete,¹ A. Bestwick,¹ M.J. Kramer,^{2,3} and J. Y. Mutus¹

¹Rigetti Computing, 775 Heinz Avenue, Berkeley

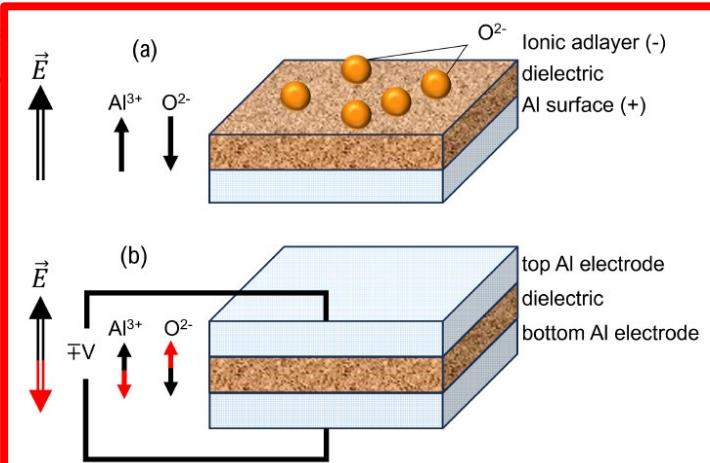
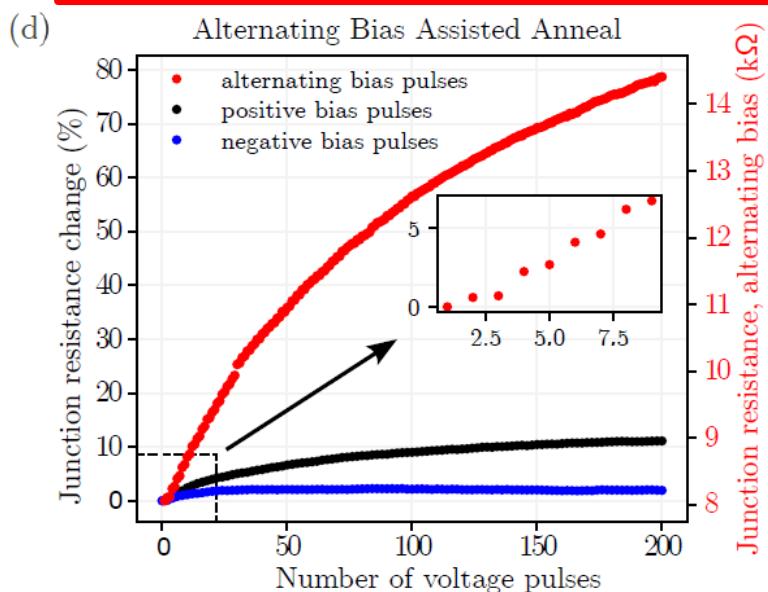
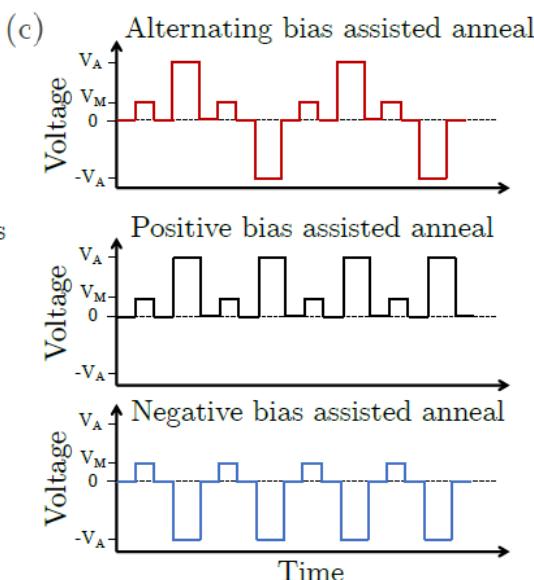
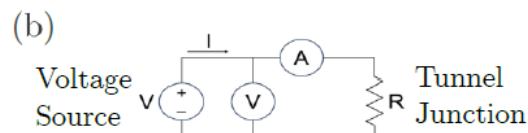
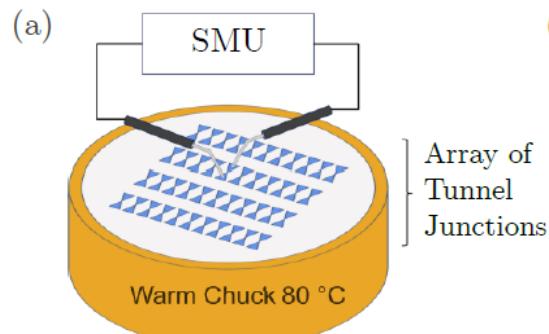
²Ames National Laboratory, Ames, IA

³Department of Materials Science and Engineering, Iowa State

(Dated: January 17, 2024)

arXiv:2401.07415 (Rigetti Computing)

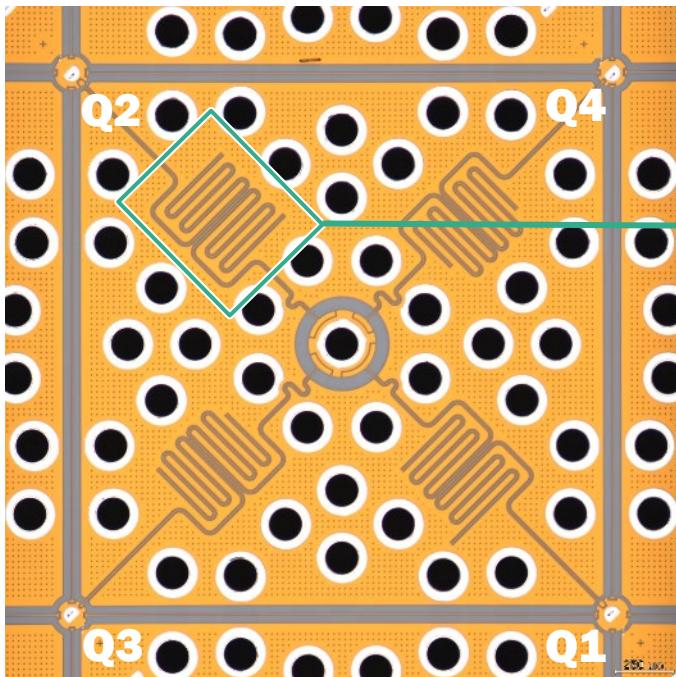
ジョセフソン接合抵抗値および量子ビット周波数の個別精密制御



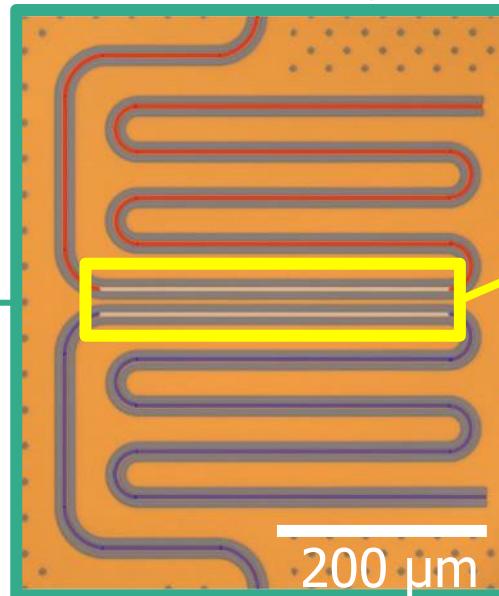
個別パーセルフィルタの実装



4量子ビット単位セル



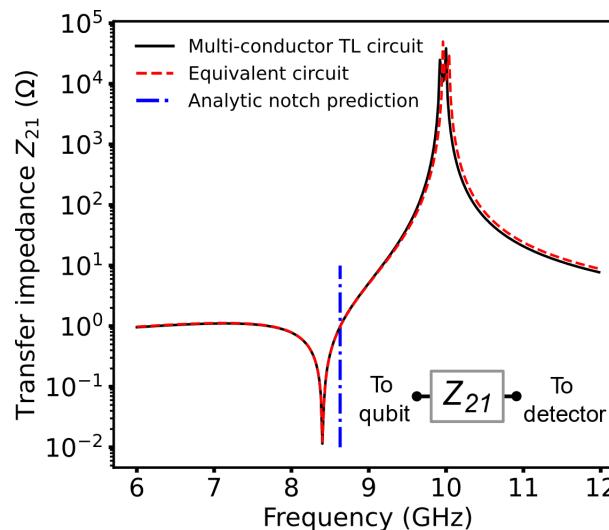
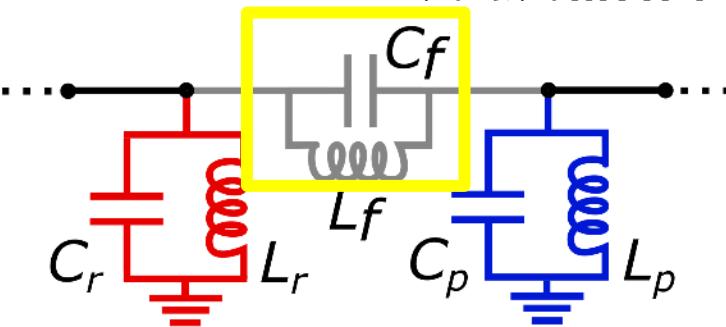
読み出し共振器



内在型ノッチフィルタ

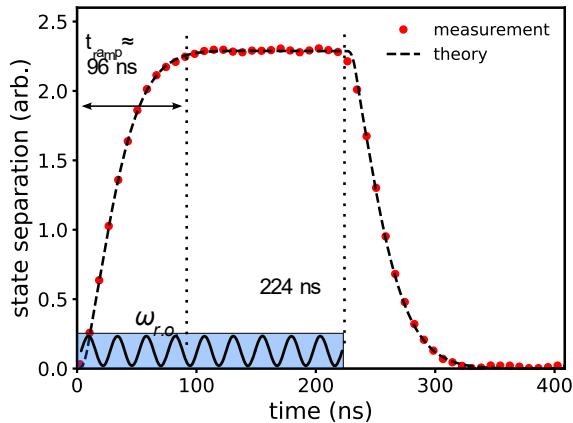
フィルタ共振器

等価回路 電気磁気結合回路



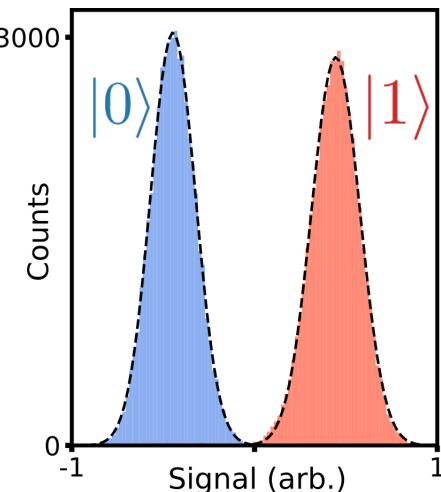
個別パーセルフィルタの効果

- 高速読み出し



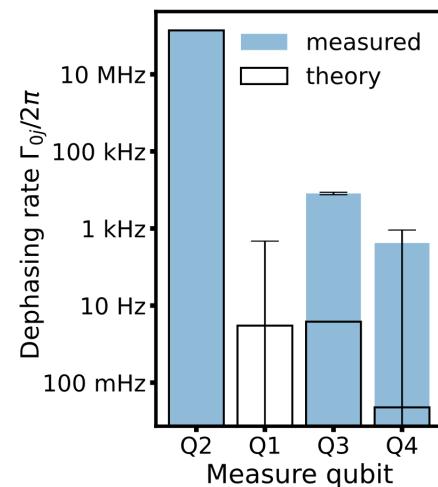
96nsの読み出しが可能

- 高忠実度読み出し

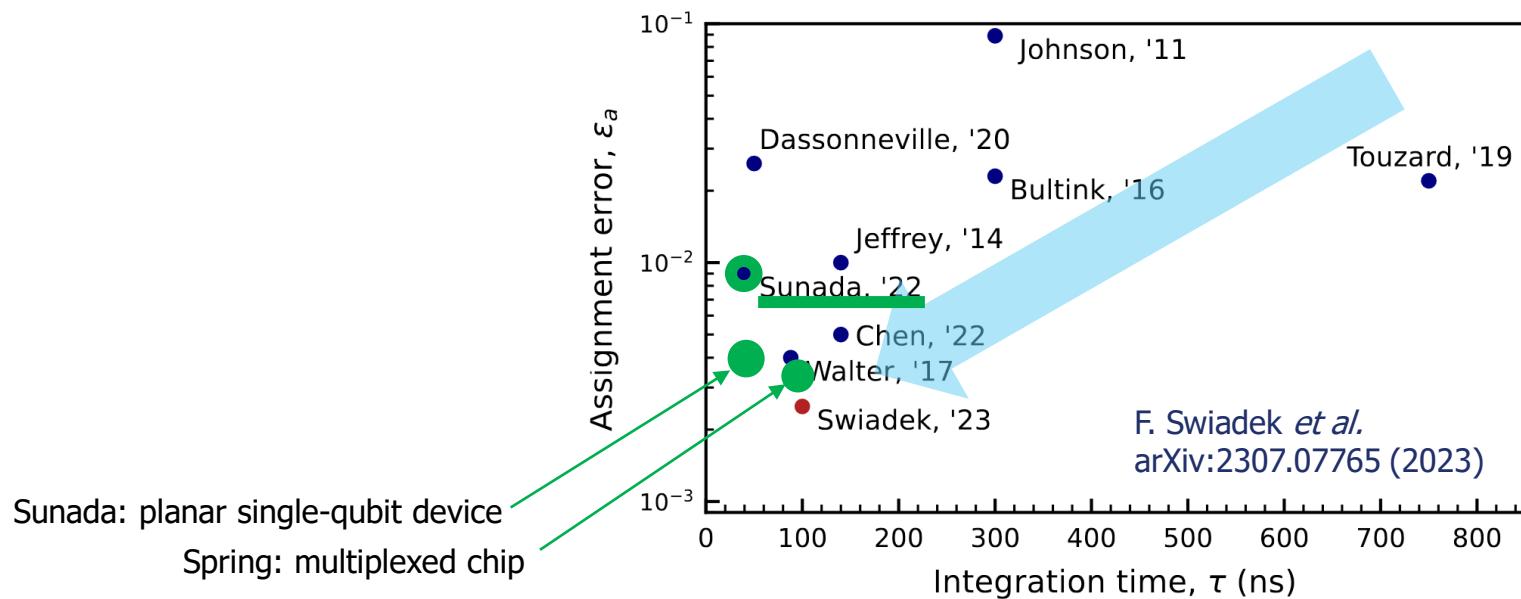


忠実度: 99.67 %

- 低クロストーク



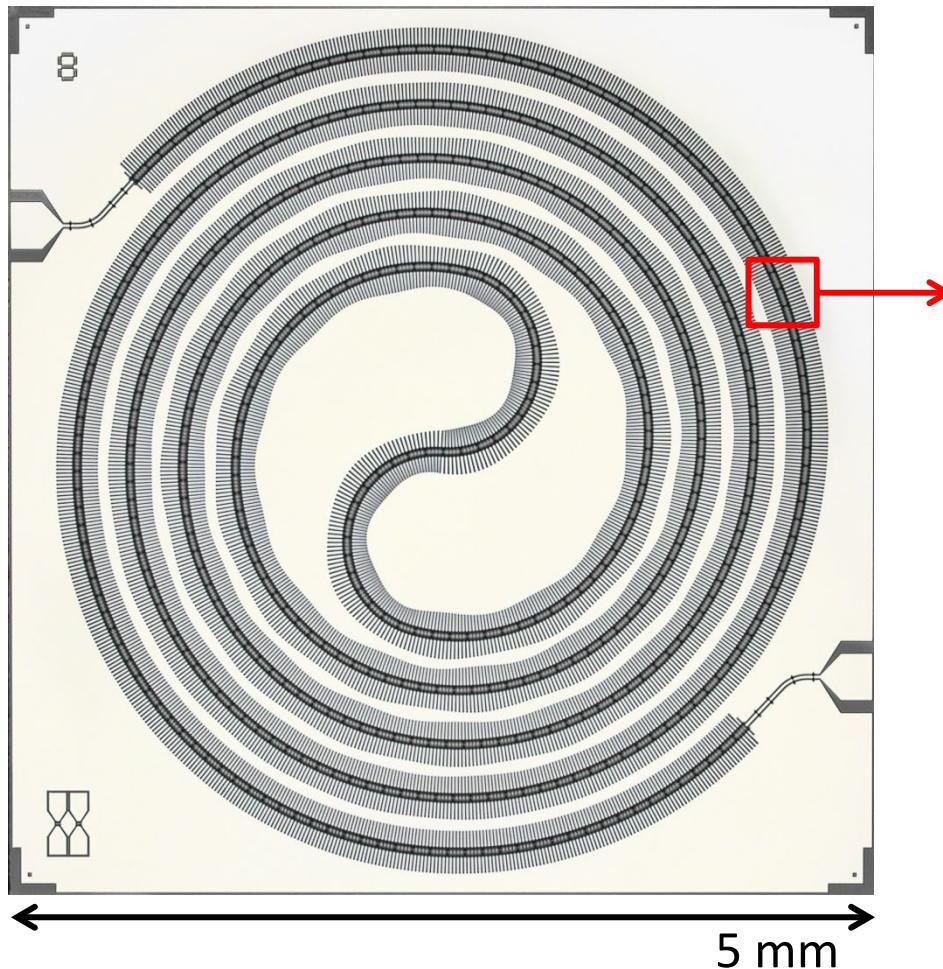
クロストーク < -40dB



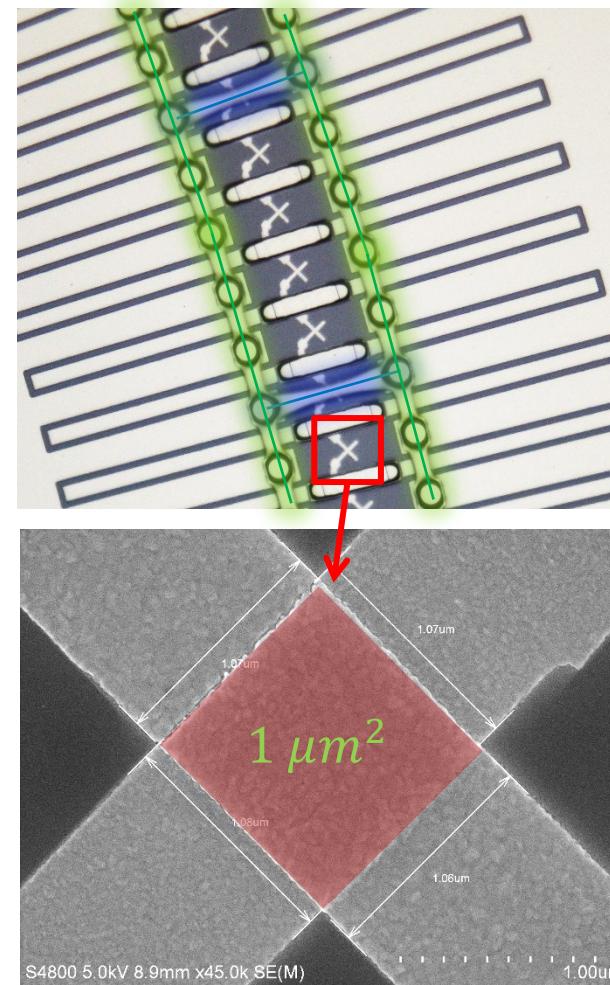
伝搬型ジョセフソンパラメトリック増幅器開発



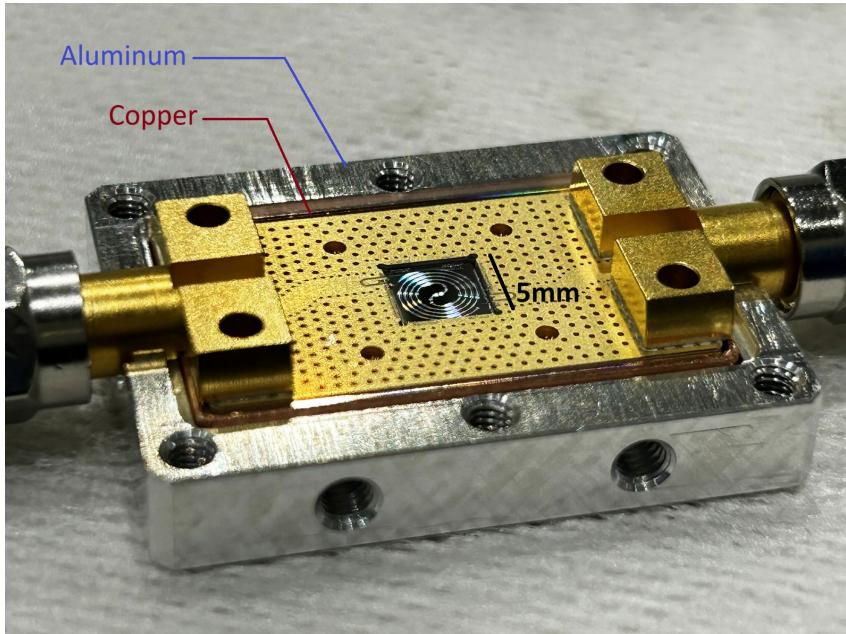
RIKEN
QUANTUM
COMPUTING



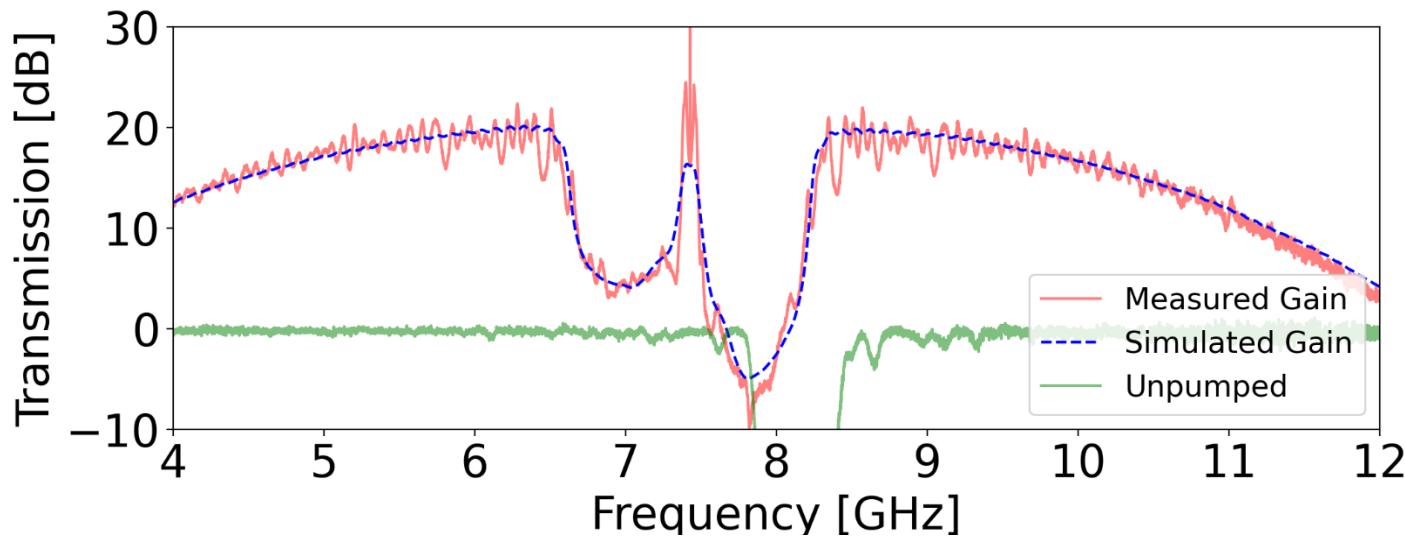
dcバイアス不要の4光波混合方式
伝搬型ジョセフソンパラメトリック増幅器
モード整合条件: $\omega_s + \omega_i = 2\omega_p$
 $k_s + k_i = 2k_p$



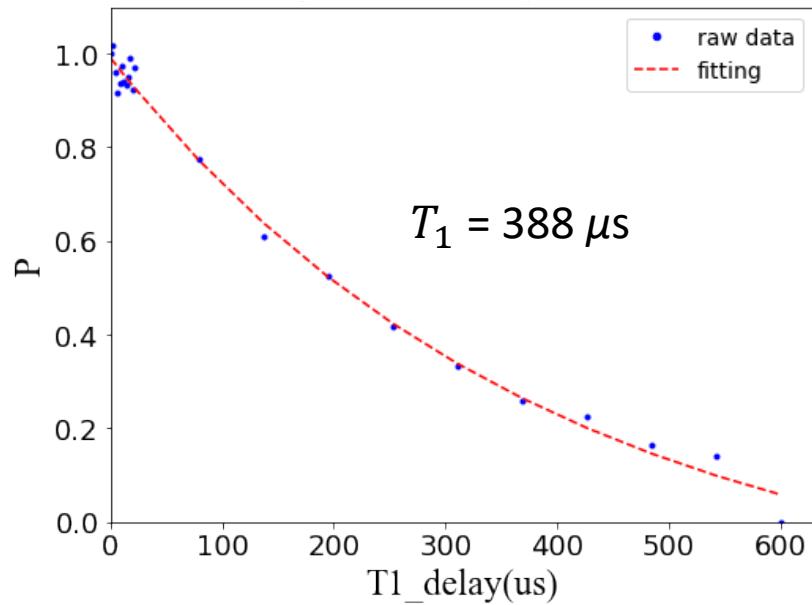
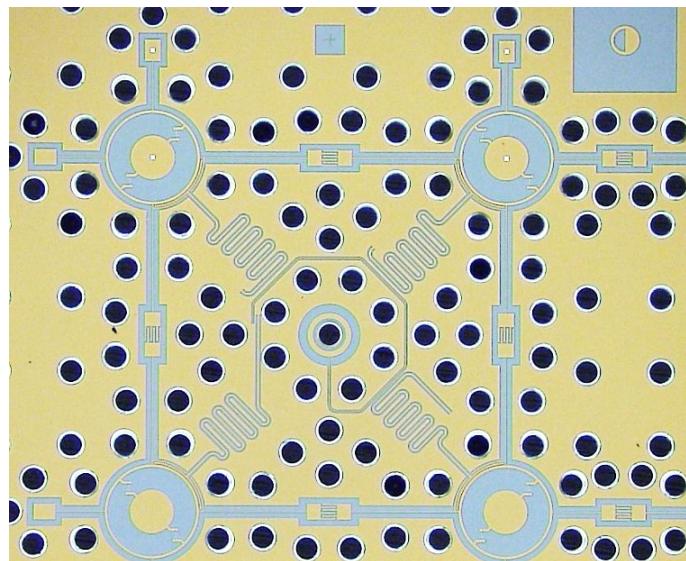
平面型Alジョセフソン接合プロセスにより誘電損失を低減
5x5 mm² チップ上の2400セル



- ・ポンプ強度: - 65 dBm @ 7.43 GHz
- ・利得: 16 - 18 dB (帯域 4 GHz 以上)
- ・ポンプオフ時挿入損失: 0.2 - 0.4 dB @ 4-12 GHz
- ・付加雑音: 0.84 photon @ 16 dB gain
- ・飽和パワー: -94 dBm @ 16 dB gain
- ・後方利得: < 0 dB

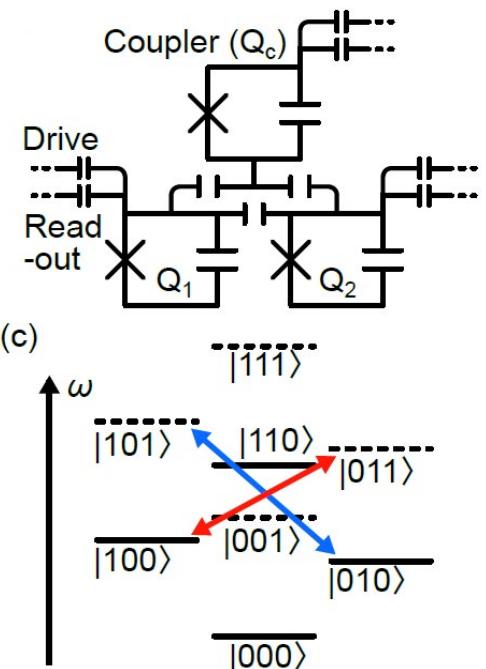
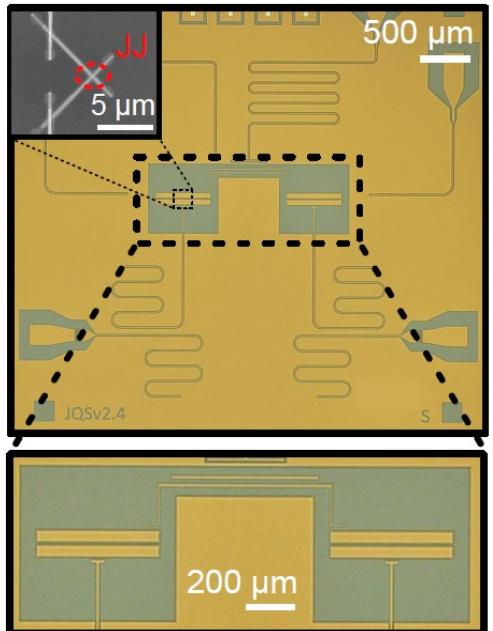


TiN電極を用いた集積回路チップ(16Q)上の量子ビット (周波数 ~ 4 GHz)

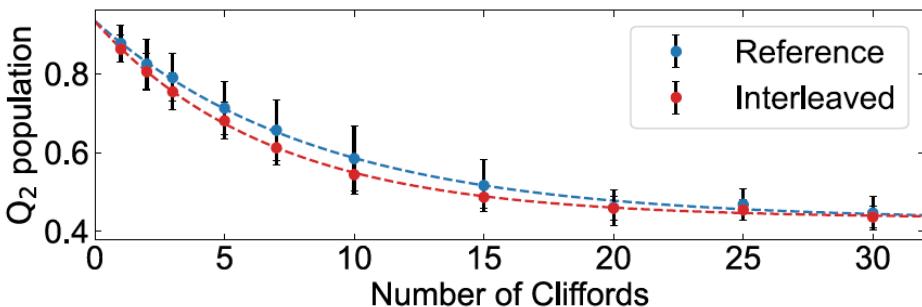
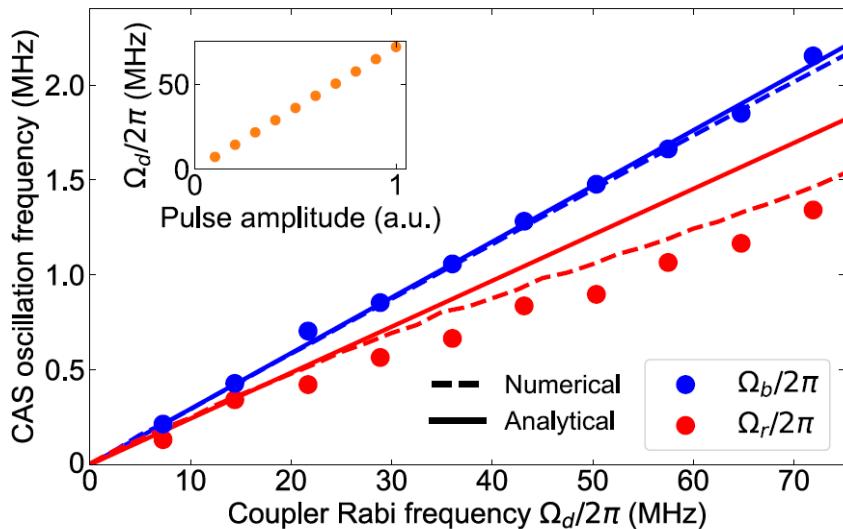


- ・高品質超伝導薄膜成膜
- ・表面・界面クリーニング
- ・**低周波数化**
- ・マイクロ波浮遊モードとの結合抑制
- ・極低温環境における高周波電磁シールド
- etc.

非線形結合器を介したマイクロ波駆動2量子ビットゲート



S. Shirai et al. Phys. Rev. Lett. 130, 260601 (2023)
in collaboration with Noguchi Team at RIKEN

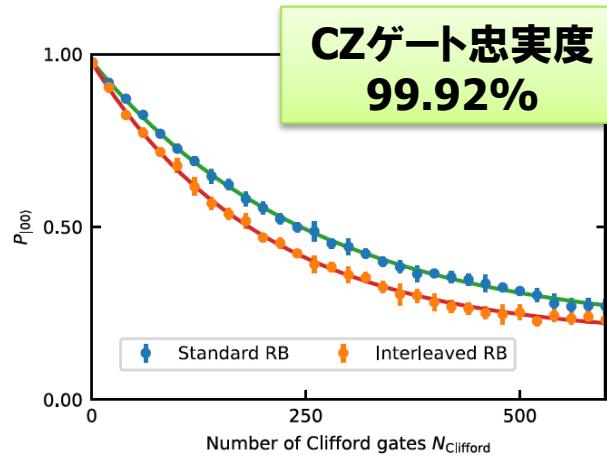
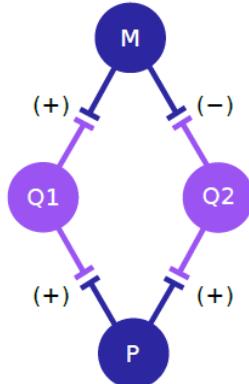
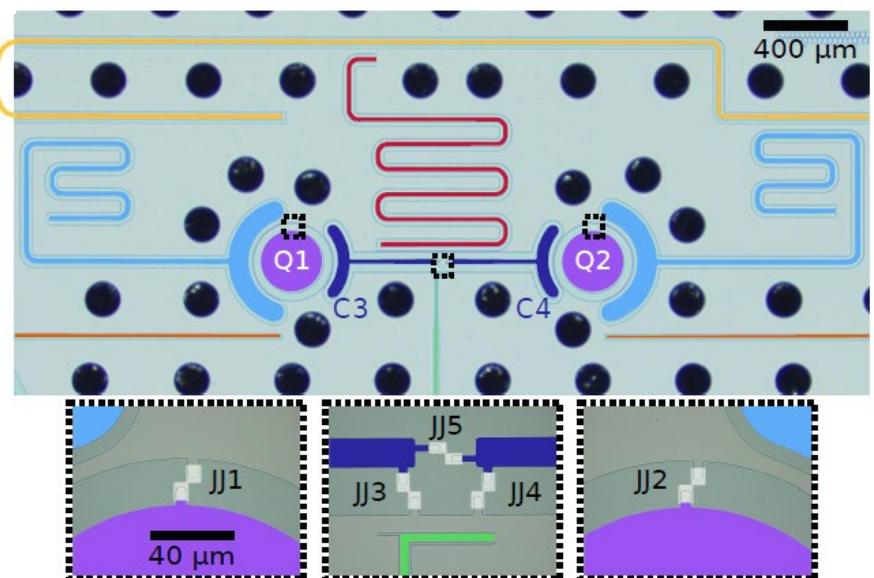
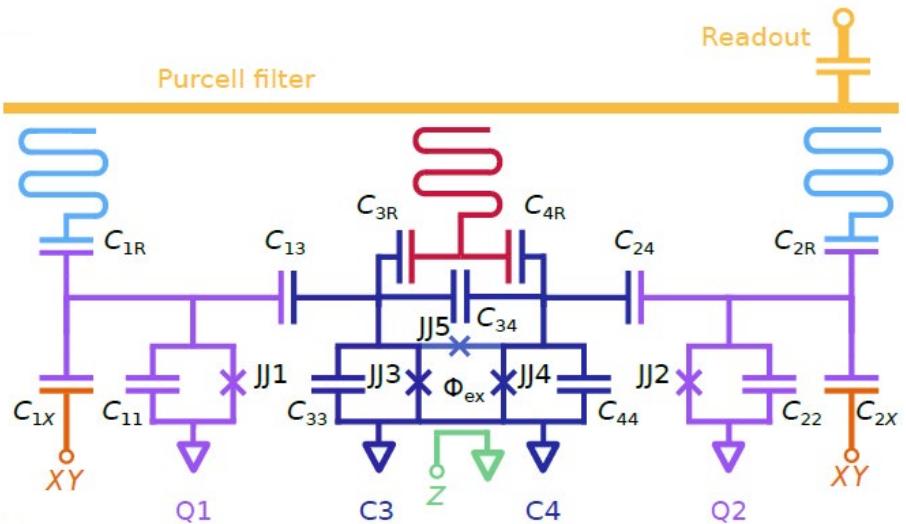


- ・周波数固定トランズモン型量子ビットのみを用いた全マイクロ波制御方式
- ・結合用量子ビットの非線形性を利用したマイクロ波誘起相互作用
- ・駆動パワー抑制・周波数混雑回避に利点

制御Zゲート忠実度 97.8%

高忠実度2量子ビットゲート実現

東芝との共同研究 TOSHIBA

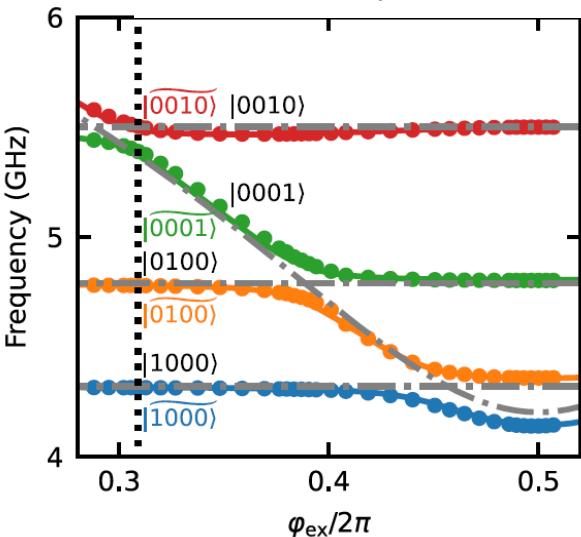
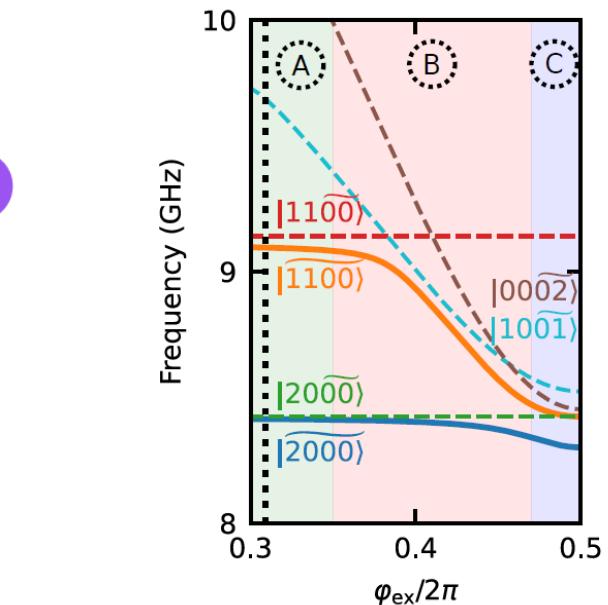
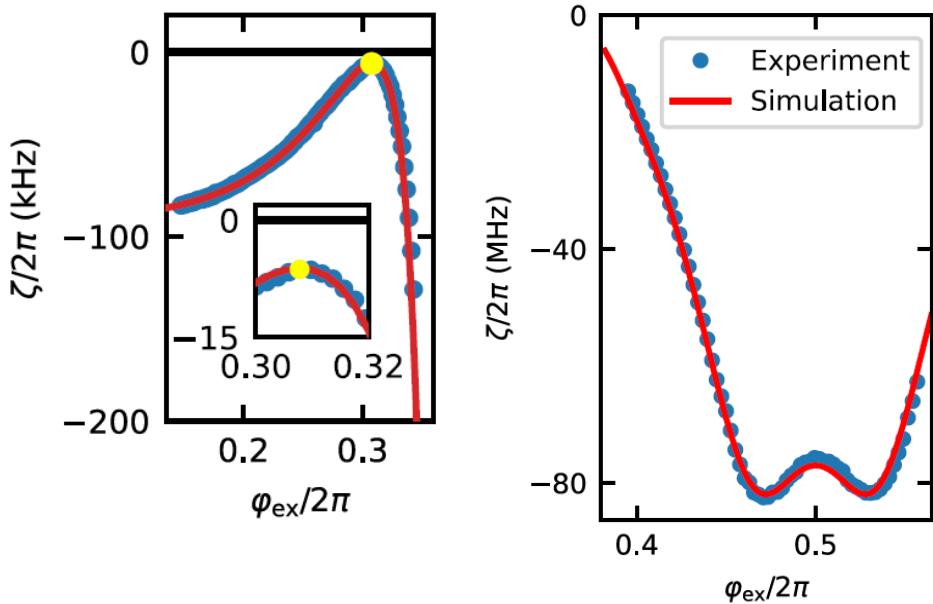
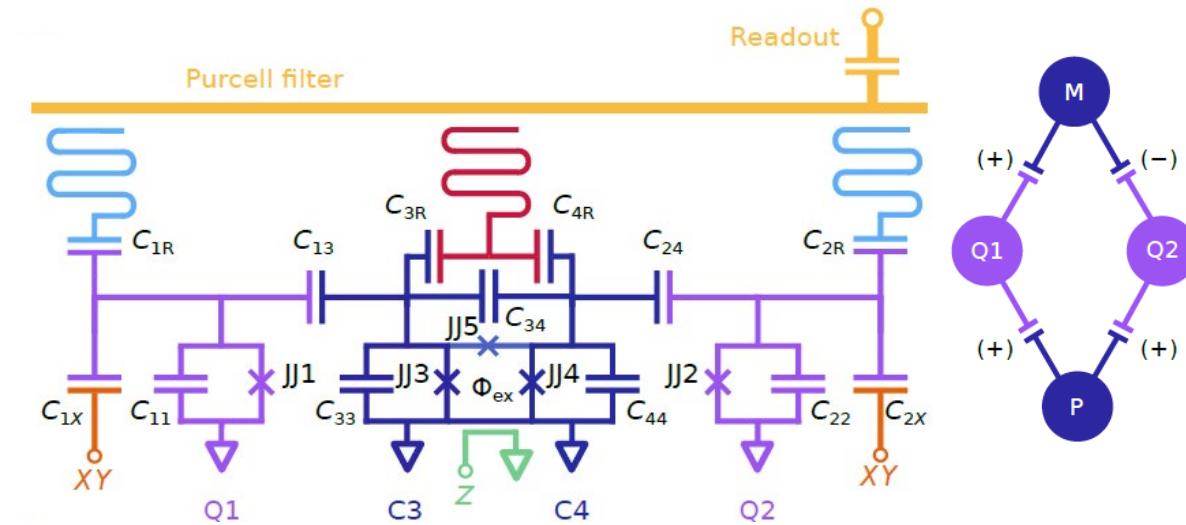


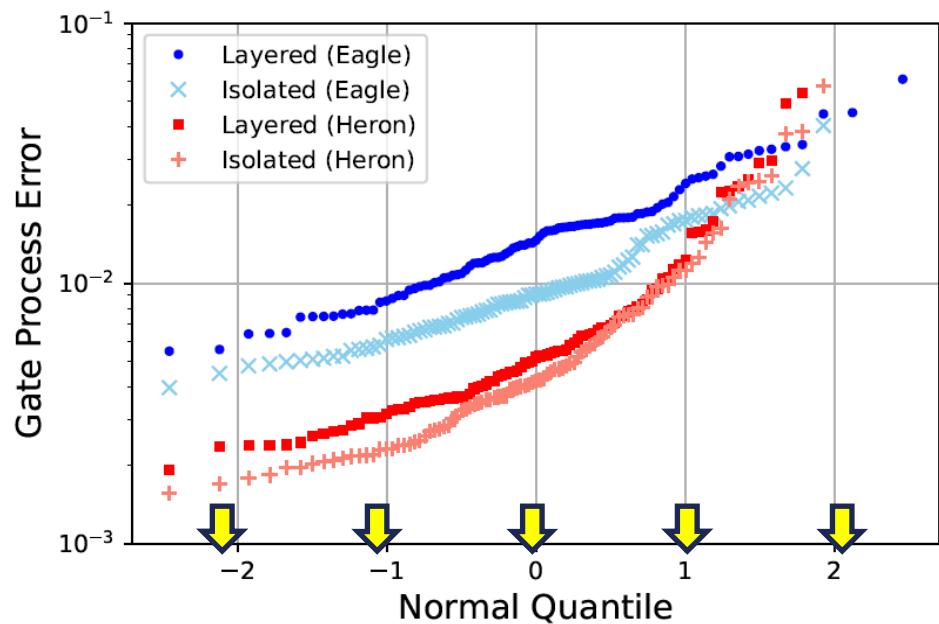
$$g_{\text{eff}} = \frac{g_{1p}g_{2p}}{2} \left(\frac{1}{\Delta_{1p}} + \frac{1}{\Delta_{2p}} \right) - \frac{g_{1m}g_{2m}}{2} \left(\frac{1}{\Delta_{1m}} + \frac{1}{\Delta_{2m}} \right)$$

- ・二重トランズモン結合器
- ・高速 (48 ns) 断熱的磁束バイアスパルスによる制御位相ゲート実装
- ・結合の高いオンオフ比 ($>10^4$) 実現

高忠実度2量子ビットゲート実現

東芝との共同研究 TOSHIBA





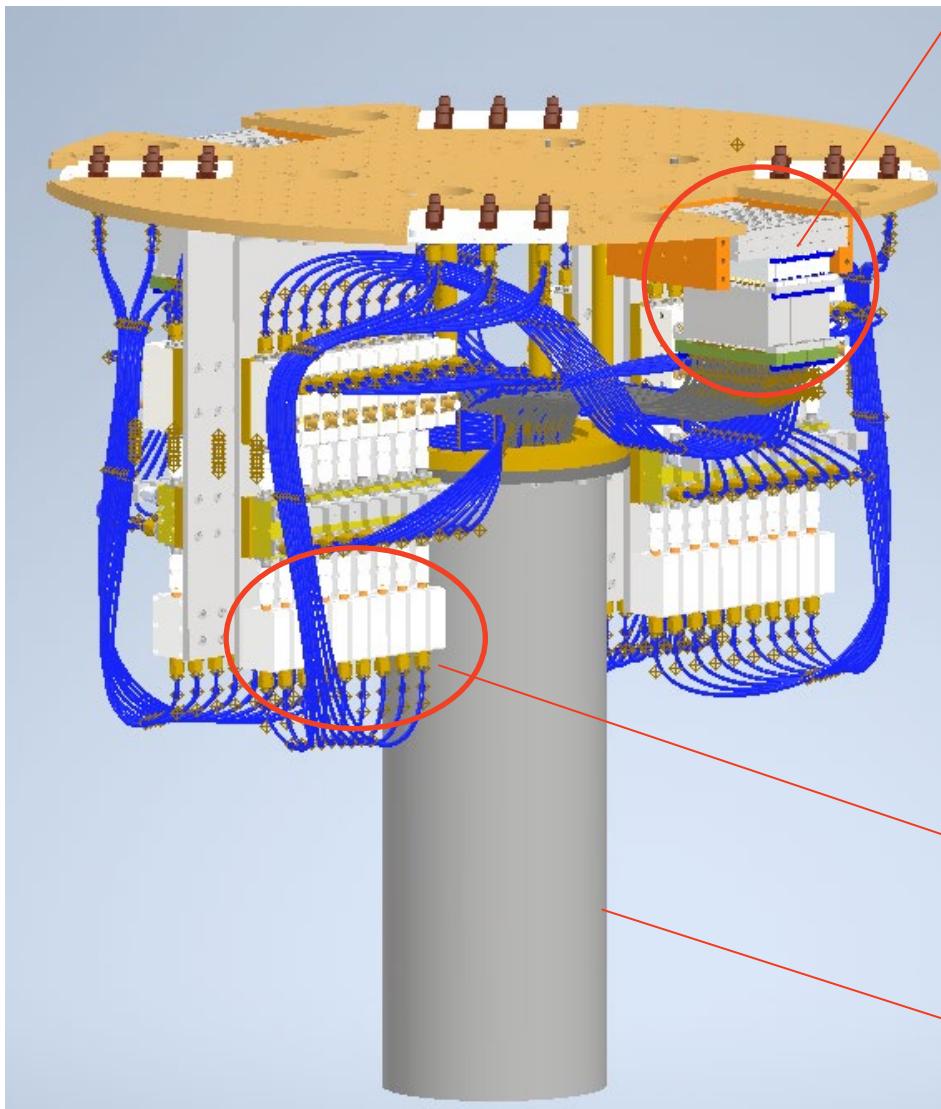
<https://newsroom.ibm.com/2023-12-04-IBM-Debuts-Next-Generation-Quantum-Processor-IBM-Quantum-System-Two,-Extends-Roadmap-to-Advance-Era-of-Quantum-Utility>

<https://arxiv.org/abs/2311.05933>

144量子ビットチップ用冷凍機設計・実装



全体図（10mKプレート以下）



マイクロ波コンポーネントの集積化



- アッテネータ
- Eccosorbフィルタ
- Low-passフィルタ
- 配線用集合コネクタ

入力配線 216本
出力配線 36本

使用帯域低周波化 4-8 GHz

TWPAパッケージ 36個

磁気シールド

- ・ 64量子ビット超伝導量子コンピュータ『叡』の公開と運用
- ・ 理研RQC－富士通連携センター・阪大QIQBでも実機公開
- ・ 一層の高忠実度化・大規模化を目指したハードウェア・ソフトウェア技術開発
 - ・ 読み出し用共振器フィルタの改良により読み出し忠実度99.67%実現
 - ・ 量子ビット周波数の均一性向上
 - ・ 残留ZZ相互作用低減
 - ・ 独自設計JTWPAの低損失動作実証

今後の展開

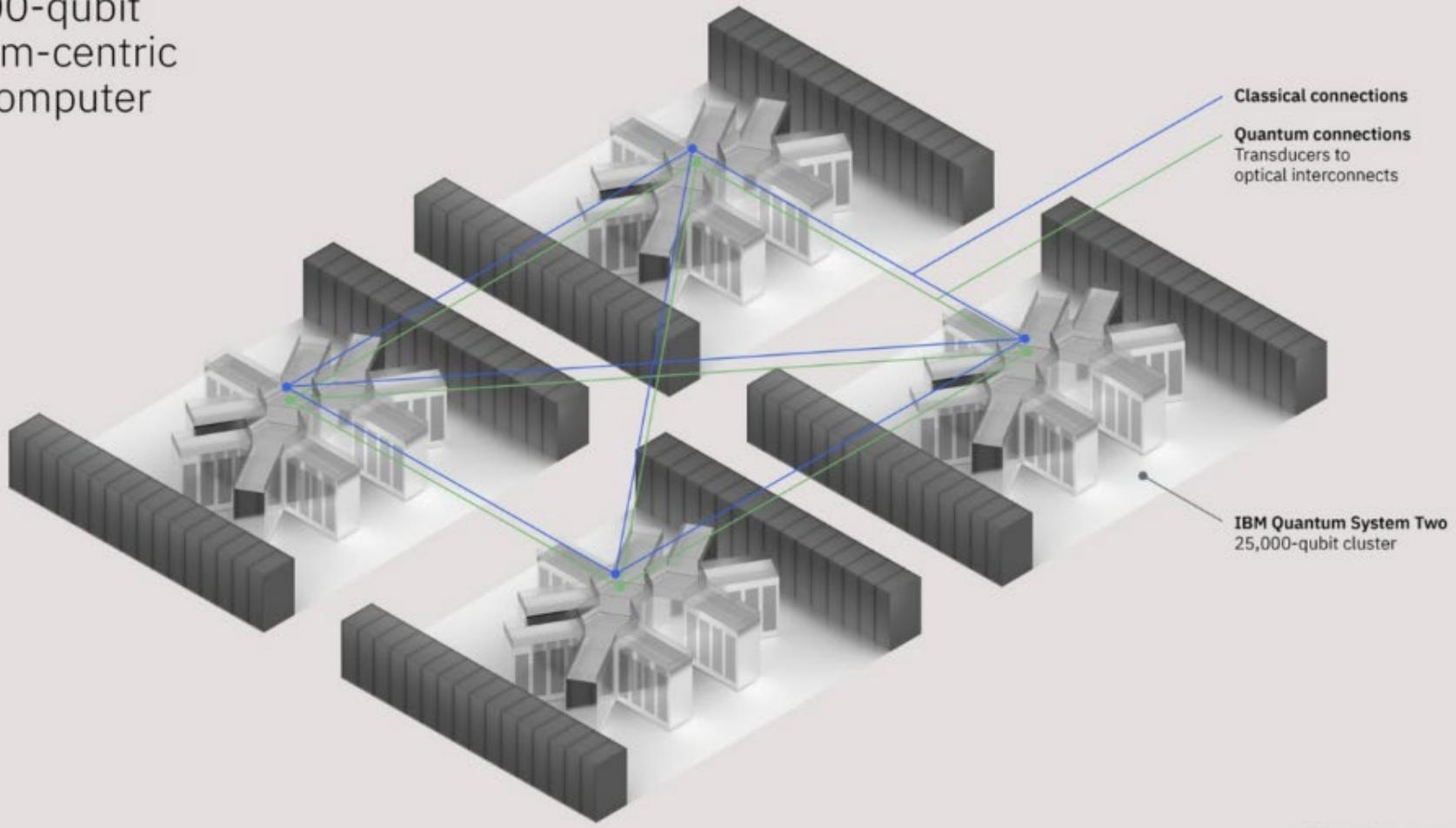
- ・ 量子ビット低周波数化によるコヒーレンスと忠実度の大幅改善
- ・ 量子ビット周波数ばらつきの低減と収率向上
- ・ 144量子ビットシステムの立ち上げ
- ・ JTWPAの導入により、多重化読み出し実装の高忠実度化
- ・ 実機を利用した、エンドユーザーを巻き込んでのアプリケーション開発
- ・ ハードウェア・ソフトウェア量子人材育成のプラットフォームとして運用

- ・複数チップ間接続・複数モジュール間マイクロ波量子ネットワーク
- ・量子ビット接続性の向上 表面符号より効率的な符号化に対応
- ・誤り耐性量子計算に向けた低レイテンシ制御エレクトロニクスとの広帯域接続
- ・大規模化($>10^6$)へ向けたパッケージング技術
- ・光ファイバーを用いた量子ビットの制御・読み出し 光波長多重化

IBM Quantum distributed system

100,000-qubit
quantum-centric
supercomputer

—
2033



IBM Quantum

