

超伝導回路を用いた オンライン量子誤り訂正

Yosuke Ueno, Masaaki Kondo, Masamitsu Tanaka, **Yasunari Suzuki**, Yutaka Tabuchi

[1] QECool: On-Line Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder for Surface Code, DAC2021.

[2] QULATIS: A Quantum Error Correction Methodology toward Lattice Surgery, HPCA2022.

上野のresearchmapで資料公開

本発表資料: <https://researchmap.jp/y-ueno/presentations/42930433>

より詳細な発表資料 (英語) : <https://researchmap.jp/y-ueno/presentations/42717344>

理研量子コンピュータ研究センター
超伝導量子計算システム研究ユニット
基礎科学特別研究員

上野 洋典

発表内容

- 研究概要 (p.3)
- 背景 (pp.4-8)
 - 超伝導量子ビット
 - 量子誤り訂正符号
- 超伝導古典回路を用いた極低温量子誤り訂正手法 (pp.9-15) DAC2021
- 論理演算を対象とする極低温誤り訂正アーキテクチャ (pp.16-17) HPCA2022
- 国内外の量子計算機アーキテクチャ研究動向 (pp.18-21)

研究概要

- 量子ビット

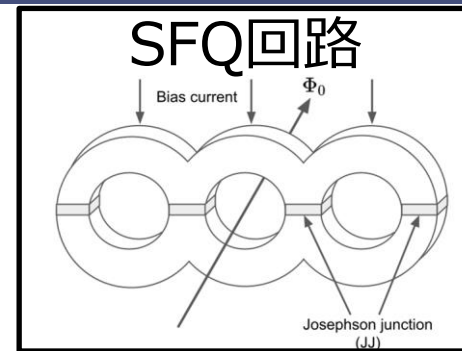
- 超伝導のものは極低温環境（冷凍機内）で動作
- エラー率が高い -> 量子誤り訂正符号

- 量子誤り訂正符号の復号はグラフ問題に帰着

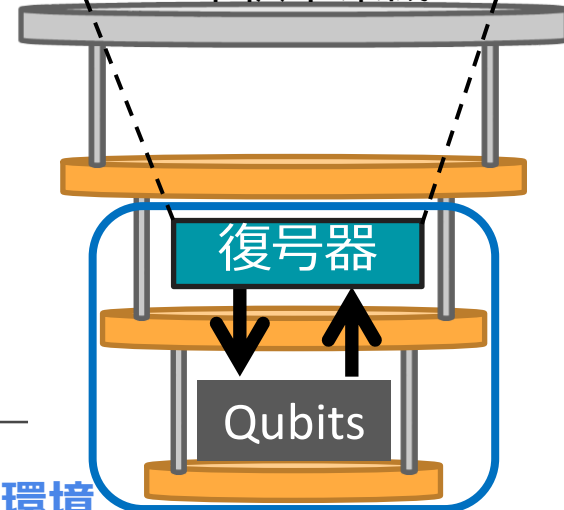
- 誤り耐性量子計算機
= 量子ビット + 復号器（グラフ問題を解く古典計算機）

- 冷凍機内外の配線を低減するため
冷凍機内で動作する復号器が望ましい

- 高速・低消費電力で動作する超伝導古典回路（SFQ回路）
を用いて復号器を設計



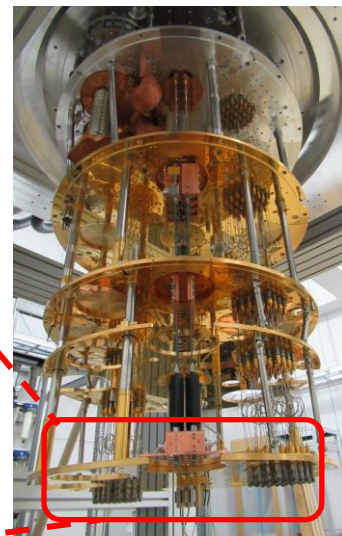
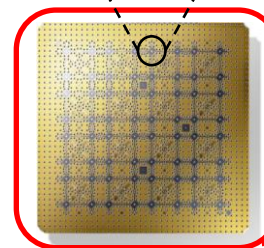
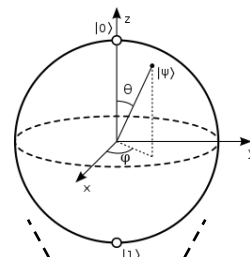
希釈冷凍機



極低温環境

超伝導量子ビット

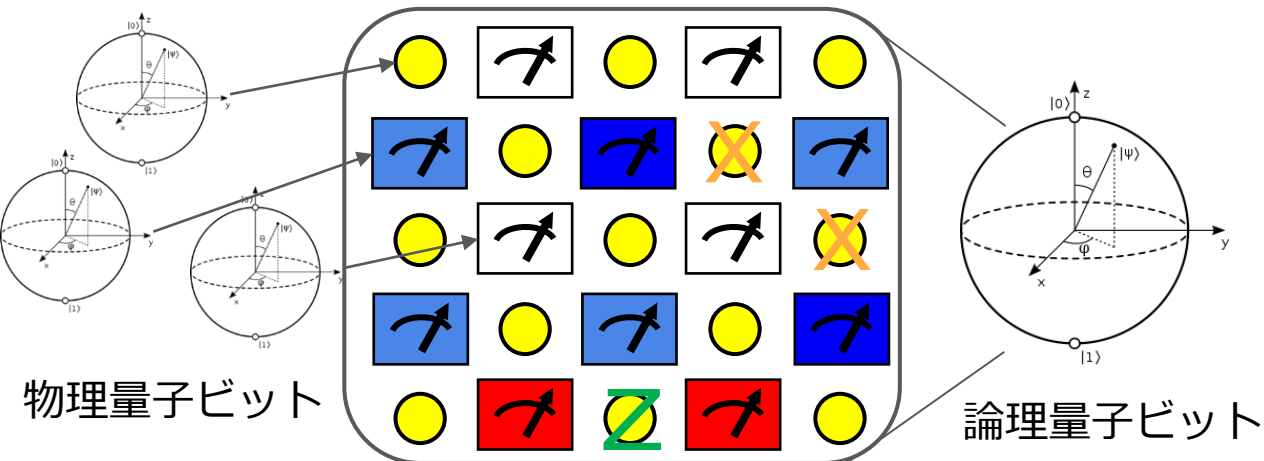
- 量子ビットの有望な実現方法の1つ
 - 極低温環境（希釈冷凍機内）で動作
- 通常の計算機に比べてエラー率が高い
 - 1回の操作で0.1~1%程度
 - X （ビット反転）と Z （位相）の **2種類のエラー**が生じる
- 直接観測すると量子状態が破壊される
 - **間接的な測定**によるエラー検出・訂正必要



理研RQCの64量子ビットチップ（左）と希釈冷凍機（右）

Copyright; RIKEN Center for Quantum Computing

量子誤り訂正符号: 表面符号



物理量子ビット

表面符号

(符号距離 $d = 3$)

論理量子ビット

	データ量子ビット	
		X/Zエラー
	補助量子ビット	
	(Zエラー検出)	
	補助量子ビット	
	(Xエラー検出)	

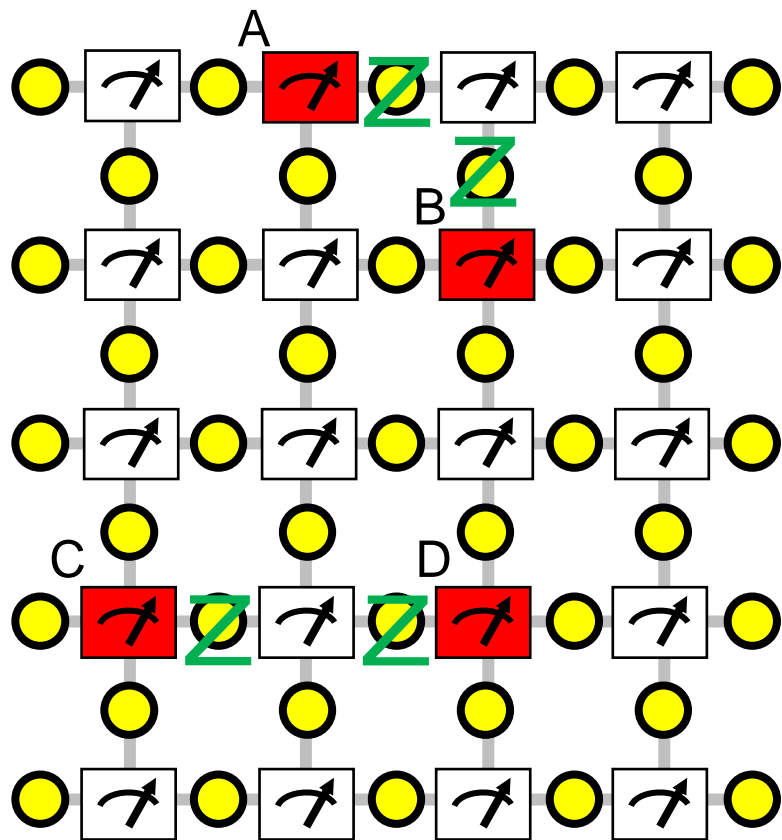
- データ量子ビット (論理状態) + 補助量子ビット (パリティチェック)
- 復号 = エラーパリティ情報からエラーの種類・位置を推定

Cf. 古典計算機における
パリティビットを使った誤り訂正

100 -> 000
 $\begin{matrix} \vee & \vee \\ 1 & 0 \end{matrix}$

??? -> ??
 $\begin{matrix} \vee & \vee \\ 1 & 1 \end{matrix}$

表面符号の復号

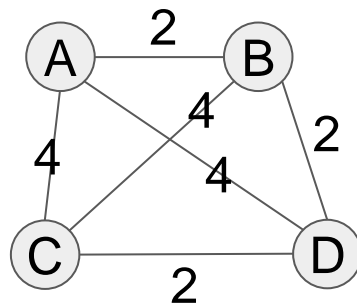


仮定

- XとZのエラーは独立に復号できる
- なるべく短いエラー鎖が生じる



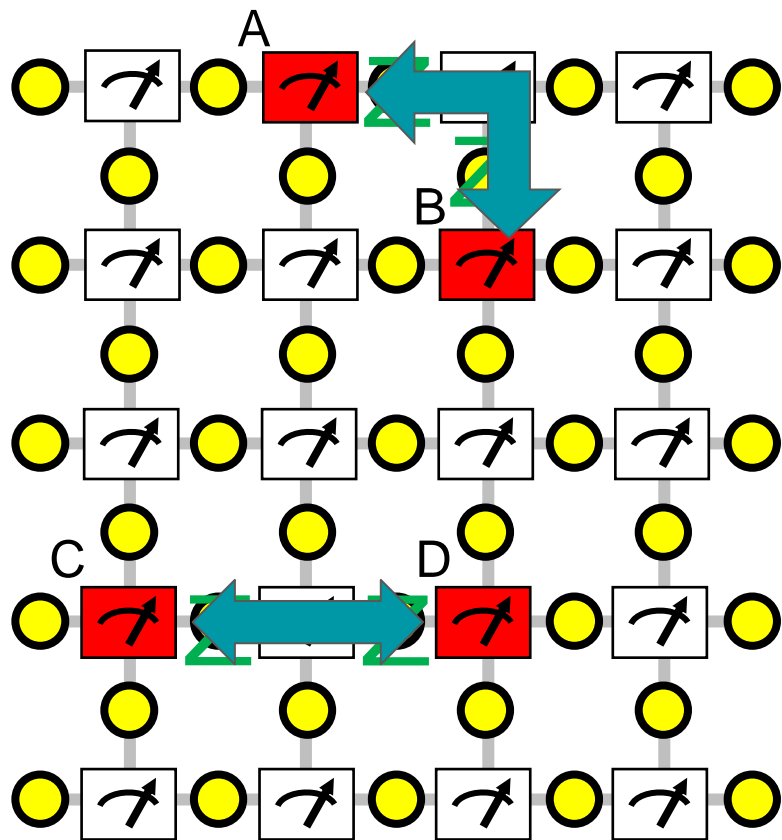
Minimum Weight Perfect Matching (MWPM)



V : Hot syndromes
 W_e : Manhattan distance

Exact solution: **Blossom algorithm ($O(n^3)$)**

表面符号の復号

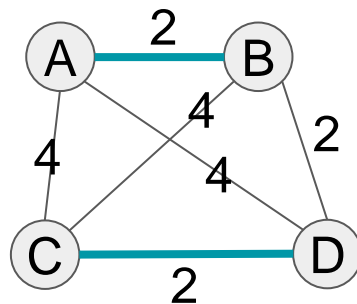


仮定

- XとZのエラーは独立に復号できる
- なるべく短いエラー鎖が生じる



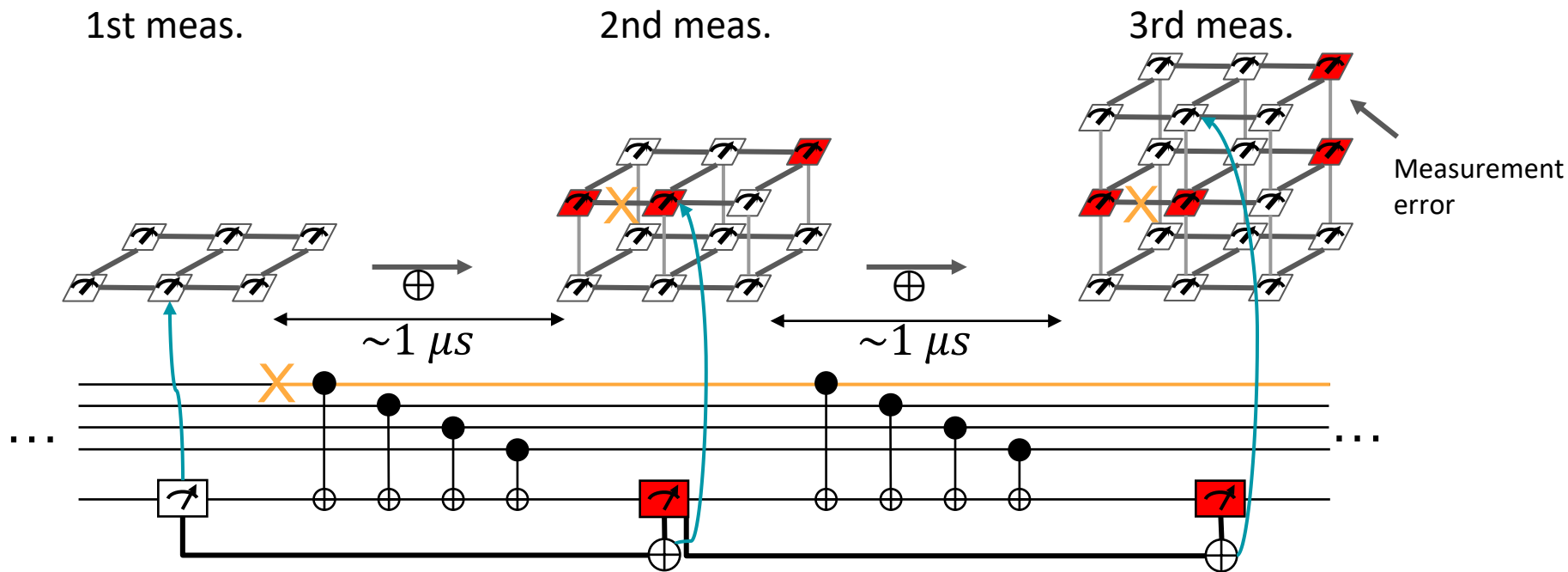
Minimum Weight Perfect Matching (MWPM)



V : Hot syndromes
 W_e : Manhattan distance

Exact solution: **Blossom algorithm ($O(n^3)$)**

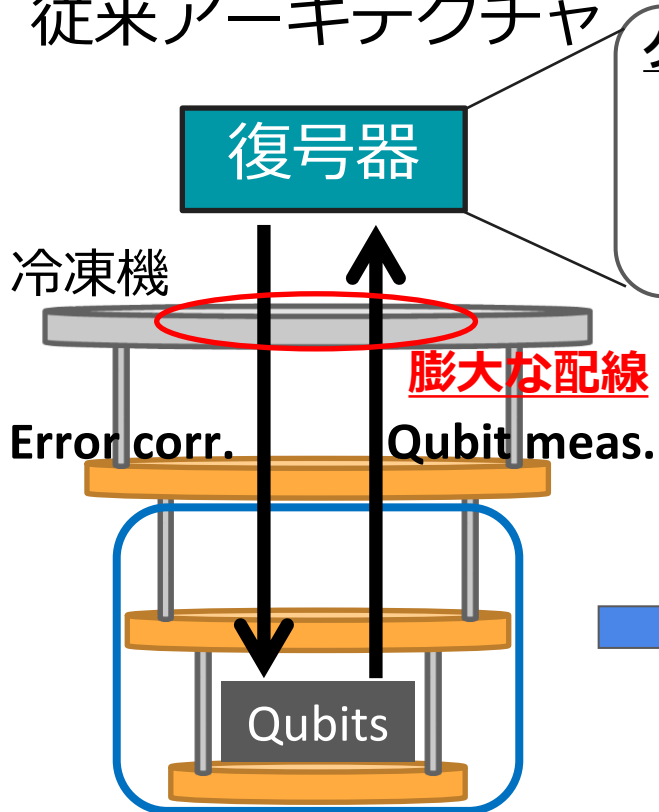
補助量子ビットの観測エラー



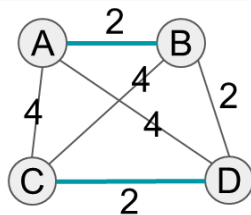
- 補助量子ビットに観測エラーが生じる場合は複数回観測を繰り返して3次元のシンドローム格子を構築

極低温で動作するQECアーキテクチャ

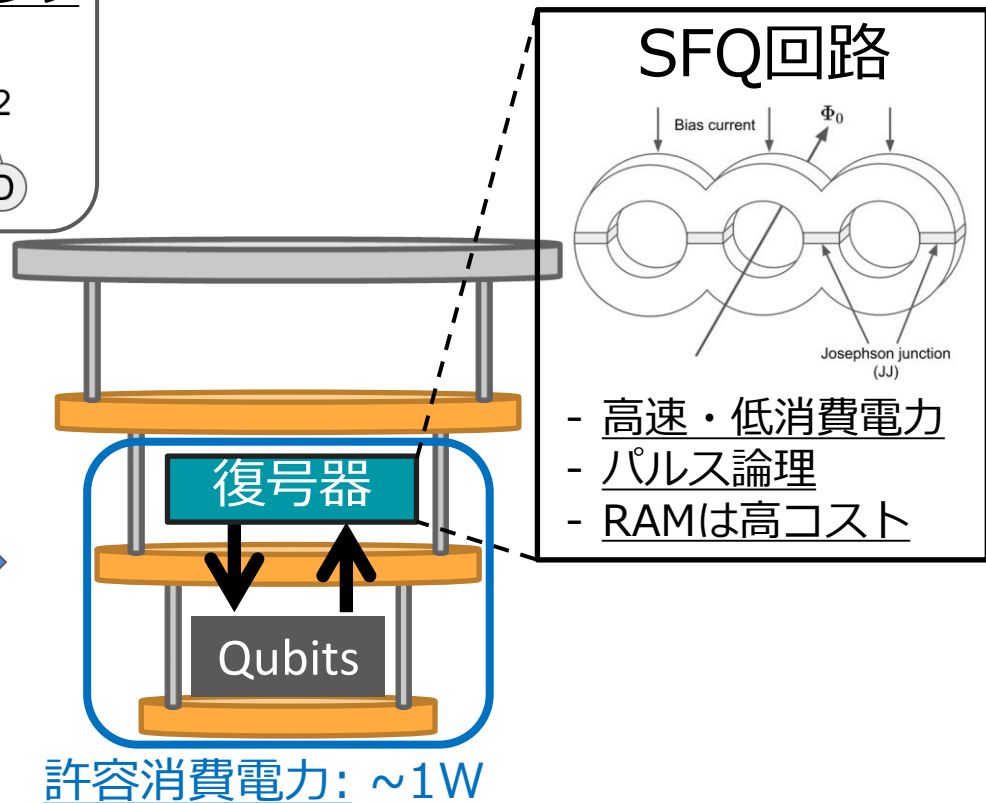
従来アーキテクチャ



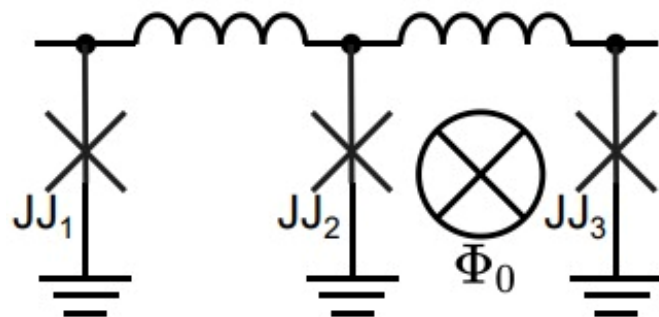
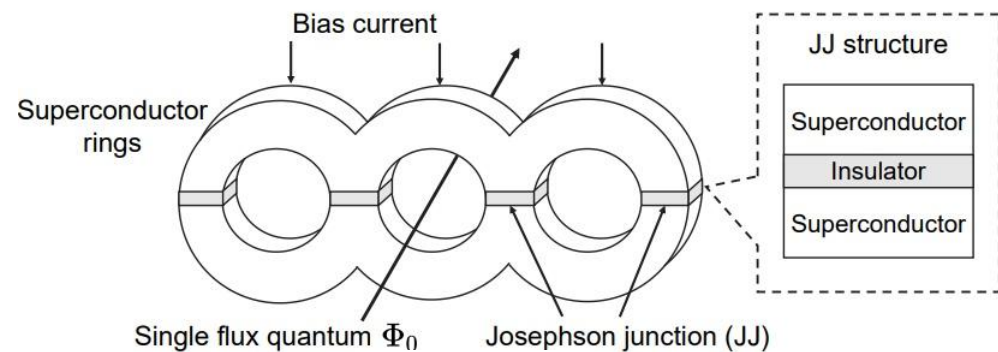
グラフマッチング



提案アーキテクチャ



単一磁束量子 (SFQ: Single Flux Quantum) 回路



利点

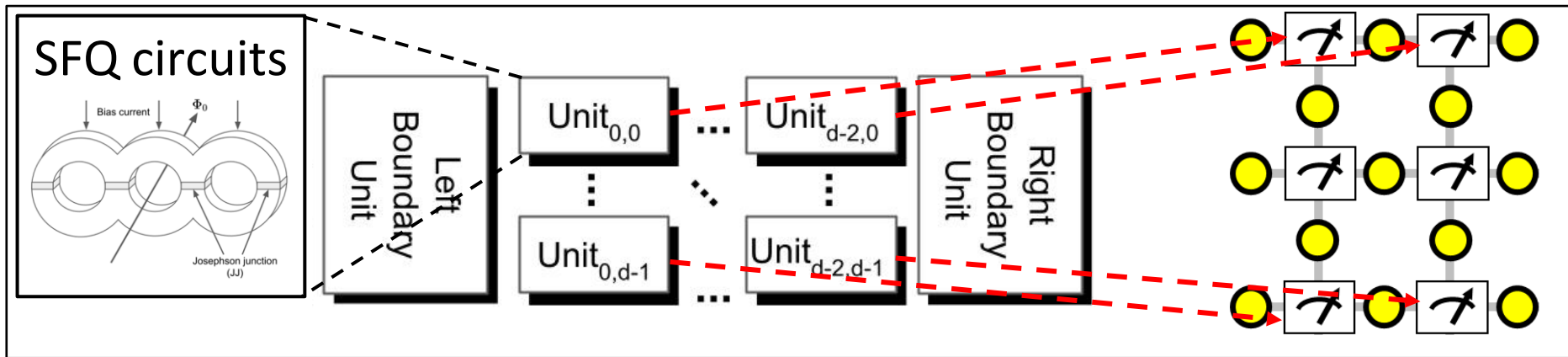
- 高速
 - 動作周波数: $\sim 100\text{GHz}$
- 低消費電力
 - スイッチング: 1 aJ (10^{-18}) 程度

欠点

- 極低温環境で動作
 - 通常は冷却コストが大きい
- 大規模なメモリの構築が困難
 - Blossom法の実行は現実的でない

➡ アルゴリズム-ハードウェア協調設計によるSFQ復号器

提案手法: QECOOOL

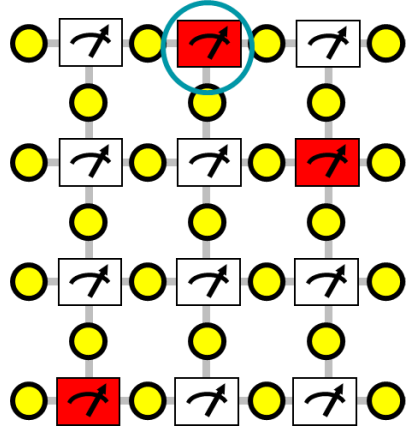


QECOOOLのアーキテクチャ

- Quantum Error COrrrection by On-Line decoding algorithm
- 大規模なRAMを必要としない 分散型のアーキテクチャ
 - 補助量子ビットに1対1に対応する Unit を導入
 - Unit同士の3種類の信号伝播によりマッチング問題を解く

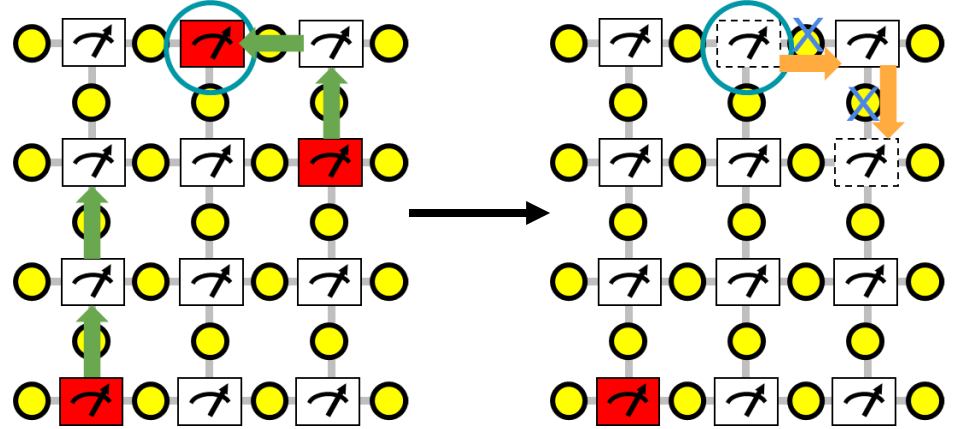
QECCOOLの処理の概要

Step 1



ホットシンδροームのペアを探す起点を決定

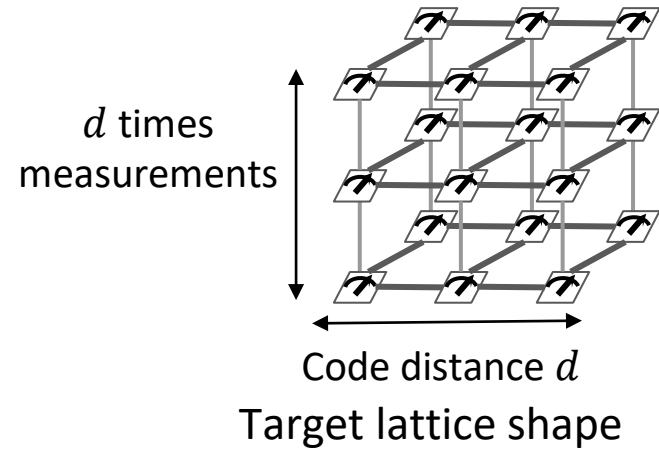
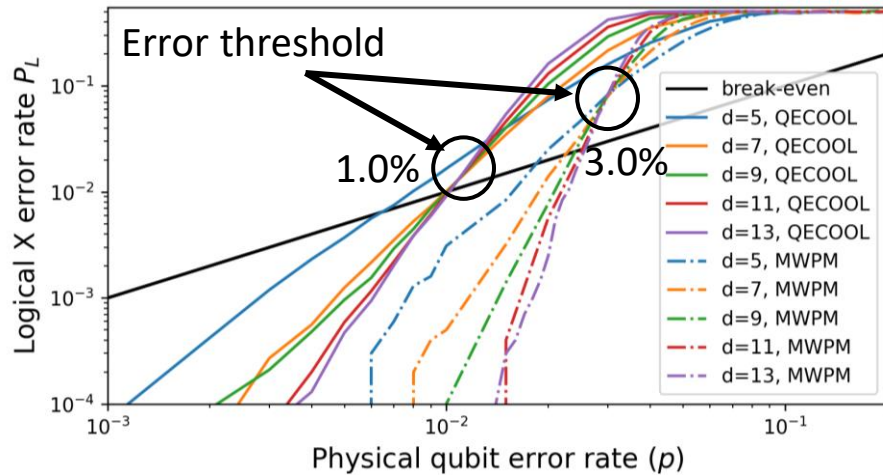
Step 2



2種類の信号の伝播により最近傍のホットシンδροームを見つける

MWPMの貪欲な近似アルゴリズム

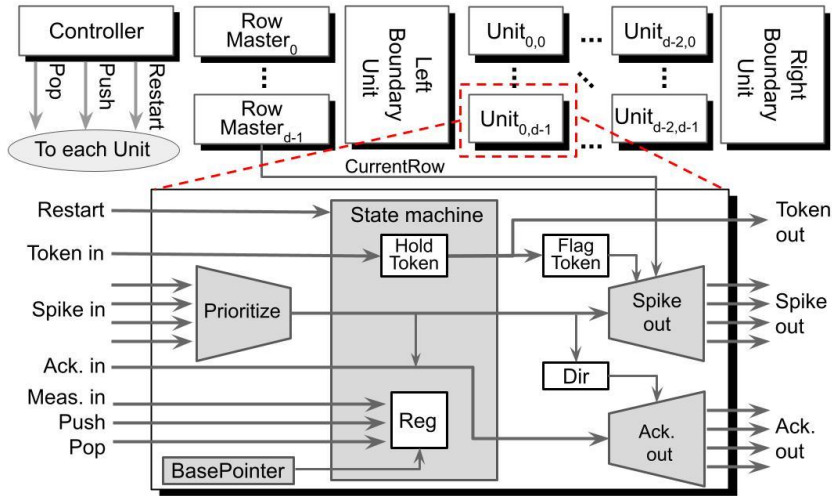
QECOOLの復号性能



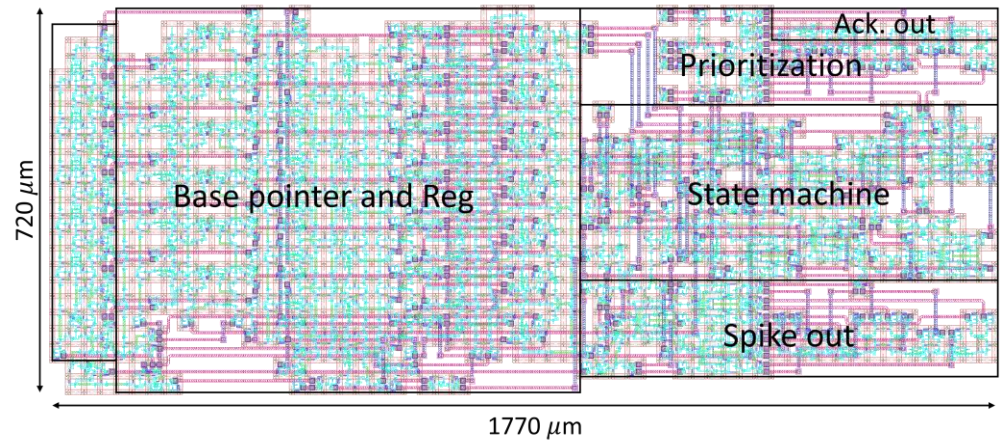
Experimental condition

- Measurement process is performed **once every $1 \mu\text{s}$**
- Each QECOOL Unit has a **7-bit** buffer to store syndrome values
- If buffer entry size is greater than $K = 3$, QECOOL is performed; otherwise, each Unit waits for measurement process
- MWPM operates with batch-QEC manner
- **しきい値: QECOOL $p = 0.01$, MWPM $p = 0.03$**

QECool復号器のSFQ回路による実装



Architecture overview of QECool



SFQ design layout of QECool Unit

JJs: 3177	Area: 1.274 mm ²	Latency: 215 ps	Power cons.: 2.78 μW
-----------	-----------------------------	-----------------	-----------------------------

of protectable logical qubits on 4-K environment

Suppose $d = 9$, and power budget in 4-K env. is 1 W

$$1_{[W]} / (9 \times 8 \times 2 \times 2.78_{[\mu W]}) = \mathbf{2498 \text{ logical qubits}}$$

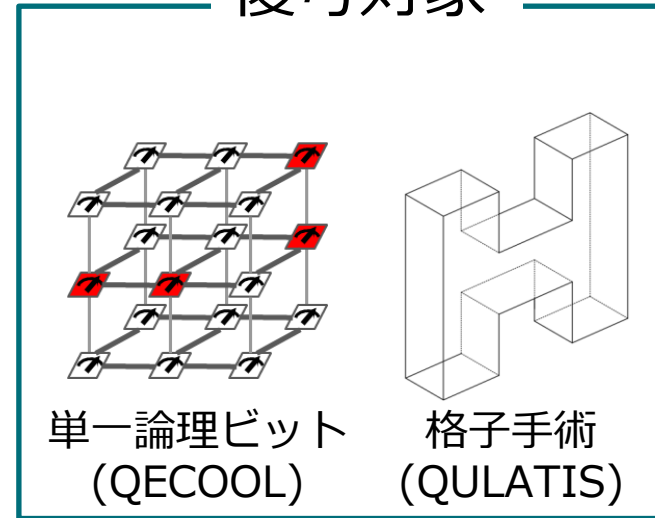
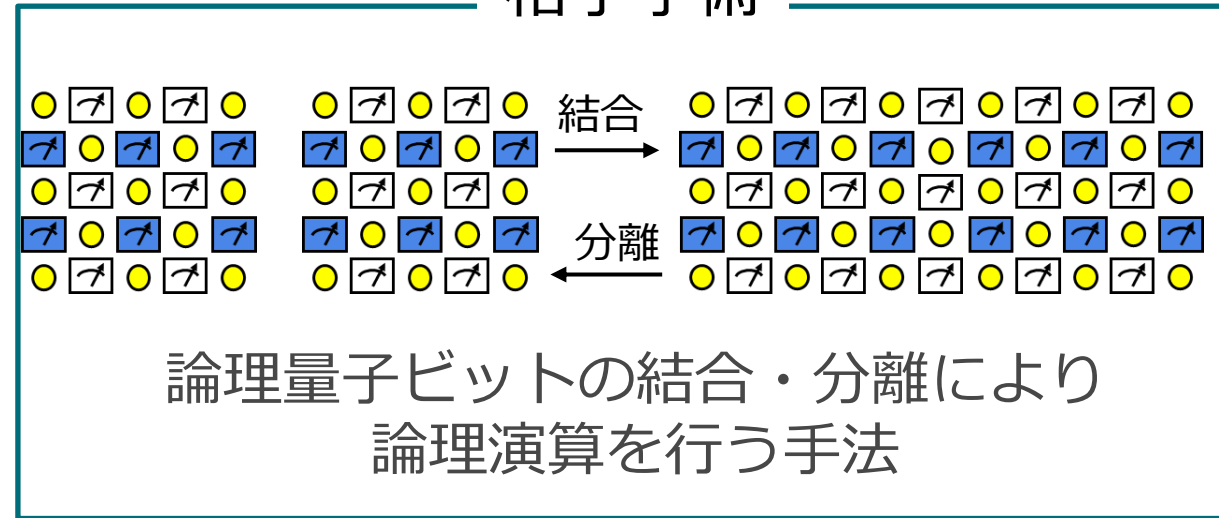
QECOOOLまとめ

- 極低温環境でのオンライン復号はスケーラブルな超伝導量子計算機の実現のために必須
- SFQ回路で実装した復号器はレイテンシ制約を満たしつつ極低温環境で動作する
- QECOOOLはデータ・観測エラーが生じる場合の単一論理量子ビットを保護できる
 - 量子情報の保護はできるが計算はサポートできない

QULATIS: QECOOLの格子手術向け拡張

格子手術

復号対象

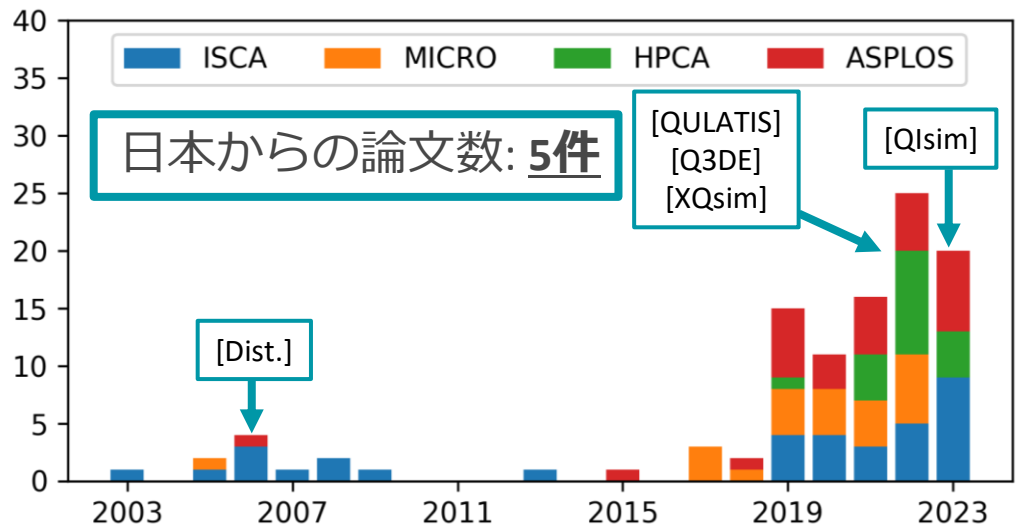


- 格子手術中の論理ビットの境界の動的な変化に対応するように拡張
 - 格子手術をサポートすればユニバーサルゲートセット $\{H, \text{CNOT}, T\}$ の誤り訂正が可能
- SFQ回路により極低温環境で高速に動作する誤り訂正アーキテクチャを設計

研究内容まとめ

- 極低温環境でのオンライン復号はスケーラブルな超伝導量子計算機の実現のために必須
- SFQ回路で実装した復号器はレイテンシ制約を満たしつつ極低温環境で動作する
- QECoolはデータ・観測エラーが生じる場合の単一論理量子ビットを保護できる
 - 量子情報の保護はできるが計算はサポートできない
- QULATISは格子手術の復号を対象としており、任意の論理量子演算の誤り訂正をサポートできる

国内外の量子計算機アーキテクチャ研究動向



アーキ系のトップ国際会議 (ISCA, MICRO, HPCA, ASPLOS) における量子計算機関連論文数 (過去20年分)

年	量子関連論文割合
2003~2018	0~1%程度
2019	5.4% (15/276)
2020	3.6% (11/308)
2021	5.0% (16/323)
2022	7.7% (25/325)
2023 (除MICRO)	6.4% (20/311)

トップ国際会議における量子関連論文数割合

元データ: <https://yuteno.github.io/> または上野のresearchmapで公開中

[Dist.] R. Van Meter, W. Munro, K. Nemoto, K. Itoh, "Distributed Arithmetic on a Quantum Multicomputer", **ISCA2006**.
 [QULATIS] **Y. Ueno**, M. Kondo, M. Tanaka, Y. Suzuki, Y. Tabuchi, "QULATIS: A Quantum Error Correction Methodology toward Lattice Surgery", **HPCA2022**.
 [Q3DE] Y. Suzuki, ..., K. Inoue, T. Tanimoto, "Q3DE: A fault-tolerant quantum computer architecture for multi-bit burst errors by cosmic rays", **MICRO2022**.
 [XQsim] I. Byun, ..., T. Tanimoto, M. Tanaka, K. Inoue, J. Kim, "XQsim: modeling cross-technology control processors for 10+K qubit quantum computers", **ISCA2022**.
 [QIsim] D. Min, ..., M. Tanaka, K. Inoue, J. Kim, "QIsim: Architecting 10+K Qubit QC Interfaces Toward Quantum Supremacy", **ISCA2023**.

国内外の量子計算機アーキテクチャ研究動向

主要な研究グループ	論文数 (割合)	First quantum paper in top conferences
University of Chicago (Fred Chong (@UCSB until 2015))	32本 (29.1%)	ISCA2003
Georgia Tech. (Moinuddin Qureshi, Swamit Tannu (UW-Madison))	13+4 (16.5%)	MICRO2017
Princeton University (Margaret Martonosi)	13 (12.6%) (内Chicagoと共同5)	ISCA2007
UC Santa Barbara (Yuan Xie, Yufei Ding)	6 (5.8%)	ASPLOS2019

- 60%の論文が上位4グループから出ている

各グループの初期の量子関連論文

Chicago University

- [初期] M. Oskin, F. Chong, I. Chuang, J. Kubiatowicz, Building Quantum Wires: The Long and the Short of it, ISCA2003. (arXiv2001.06598)
- [最近] A. Litteken, L. Seifert, J. Chadwick, N. Nottingham, F. Chong, J. Baker, Qompress: Efficient Compilation for Ququarts Exploiting Partial and Mixed Radix Operations for Communication Reduction, ASPLOS2023.

Georgia Tech.

- [初期] P. Das, C. Pattison, S. Manne, D. Carmean, K. Svore, M. Qureshi N. Delfosse, AFS: Accurate, Fast, and Scalable Error-Decoding for Fault-Tolerant Quantum Computers, HPCA2022. (arXiv2001.06598)
- [最近] S. Vittal, P. Das, M. Qureshi, Astrea: Accurate Quantum Error-Decoding via Practical Minimum-Weight Perfect-Matching, ISCA2023.

最初は「**アーキわかる（興味ある）物理系研究者**」と併走
その過程で「**物理わかるアーキ研究者**」を育成
物理屋の実装下請けは評価されない

● 研究の意義

- 人類の計算能力の質的な向上への貢献
- ↑実現のためには計算機アーキテクチャの知見必須
- トップカンファに通しやすい(?)

● 参入方法

- 物理の人とチームを組む
 - (最初は) 難しいことは専門家に任せればいい
- (ほぼ) 量子のことを知らなくても貢献できる箇所はある

本数、割合ともに増加傾向
世界でも有カグループは少数
-> まだ狙い目あり?

最初は「**アーキわかる (興味ある) 物理系研究者**」と併走
その過程で「**物理わかるアーキ研究者**」を育成