

ムーンショット目標6 ミニシンポジウム2024

量子コンピュータは、未来をどう変えうるか ~FTQCとそこに至る過程で期待されるアプリケーション~

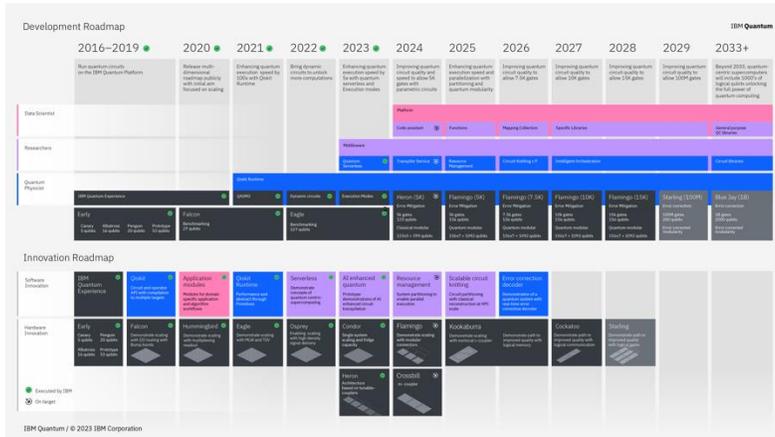
オーバービュー

嶋田 義皓 | Yoshi-aki Shimada, Ph.D.

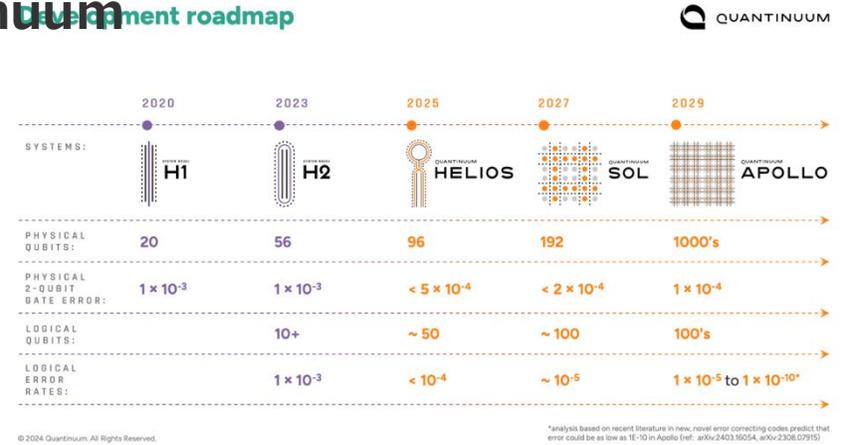
量子コンピュータ、誰得問題

FTQCに言及も、どのHWでなにができるのか正直よくわからない

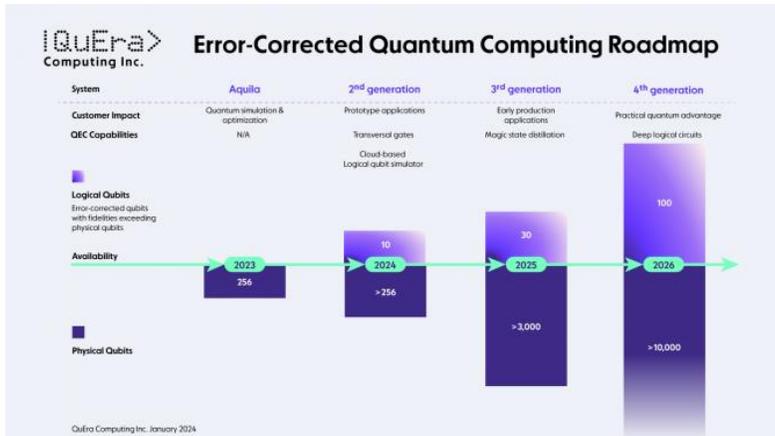
IBM



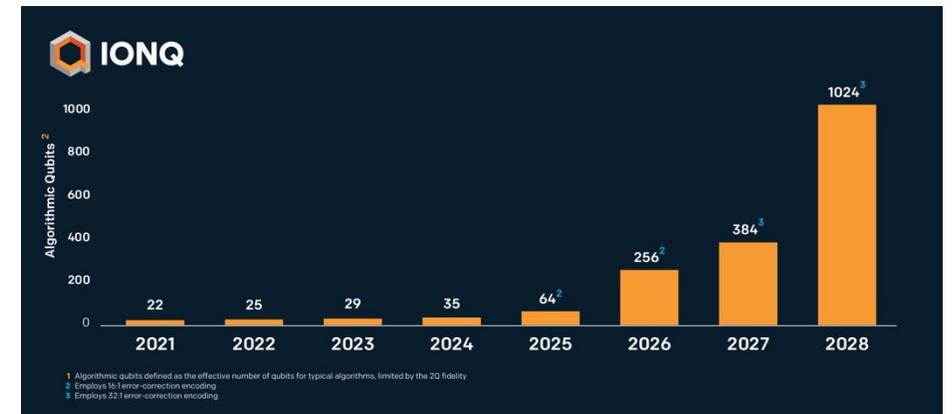
Quantinuum Development roadmap



QuEra



IonQ

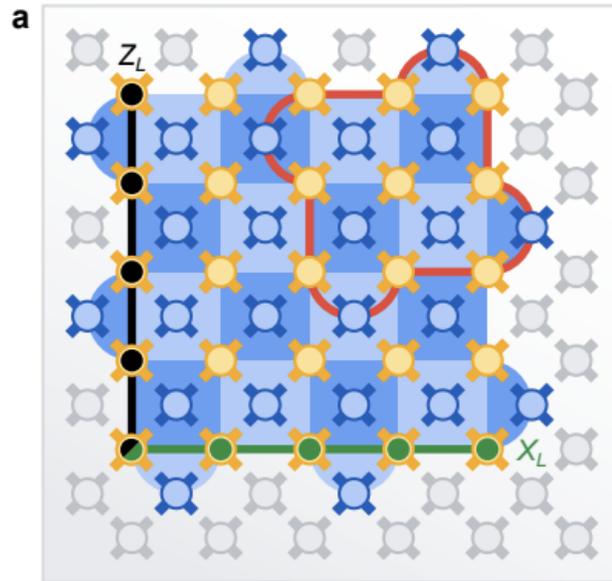


誤り訂正符号、誰得問題

誤り訂正符号の実験成功も、現状は符号化しないほうが計算能力が高そう？

Google

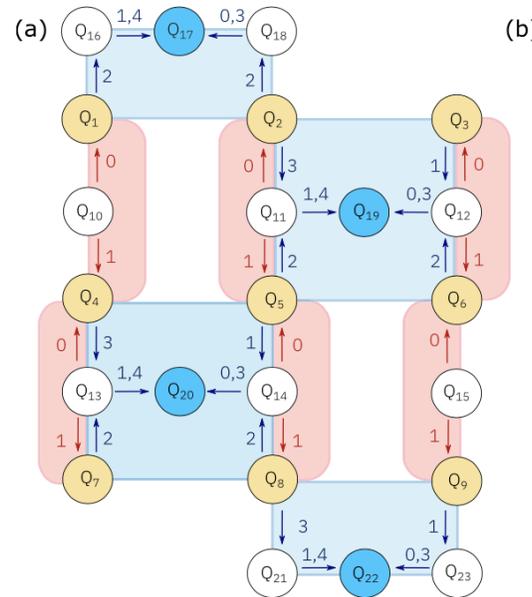
[[25, 1, 5]] Surface code



Google Quantum AI, Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit, Nature 614, 676-681 (2023).

IBM

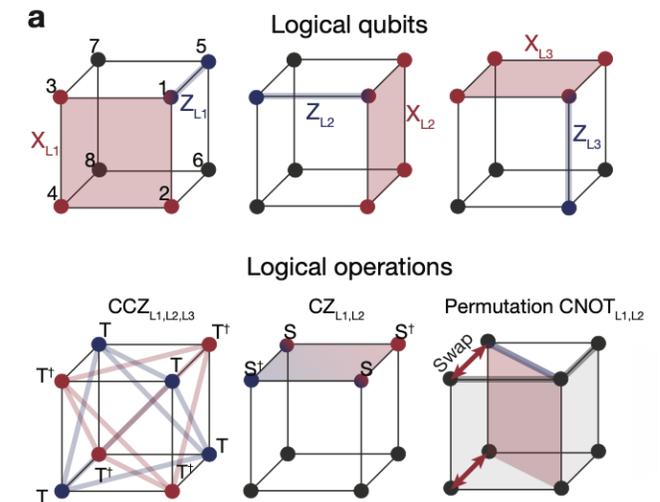
[[9, 1, 3]] Heavy-Hex code



N. Sundaresan et al., Demonstrating multi-round subsystem quantum error correction using matching and maximum likelihood decoders, Nature Communications 14, 2852 (2023).

Harvard, MIT ほか

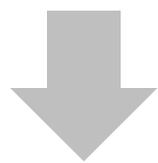
[[8, 3, 2]] Block code



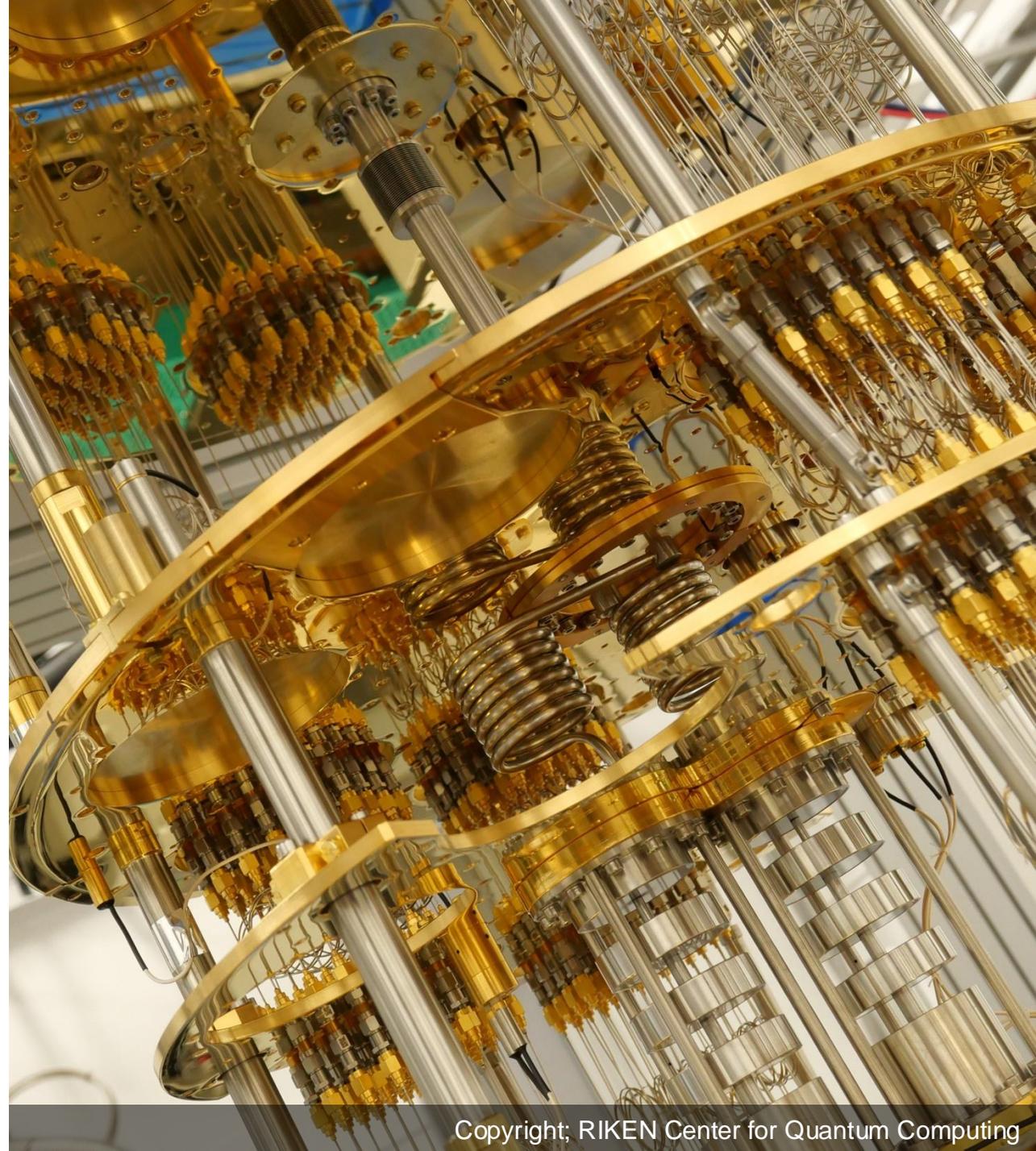
D. Bluvstein et al., Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays, Nature (unedited, arXiv:2312.03982) (2023).

本日のお題

どの規模・質のFTQCがあれば
どんなアプリが可能か？

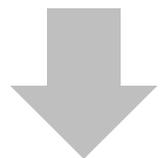


開発すべきFTQCの
ターゲットを絞る

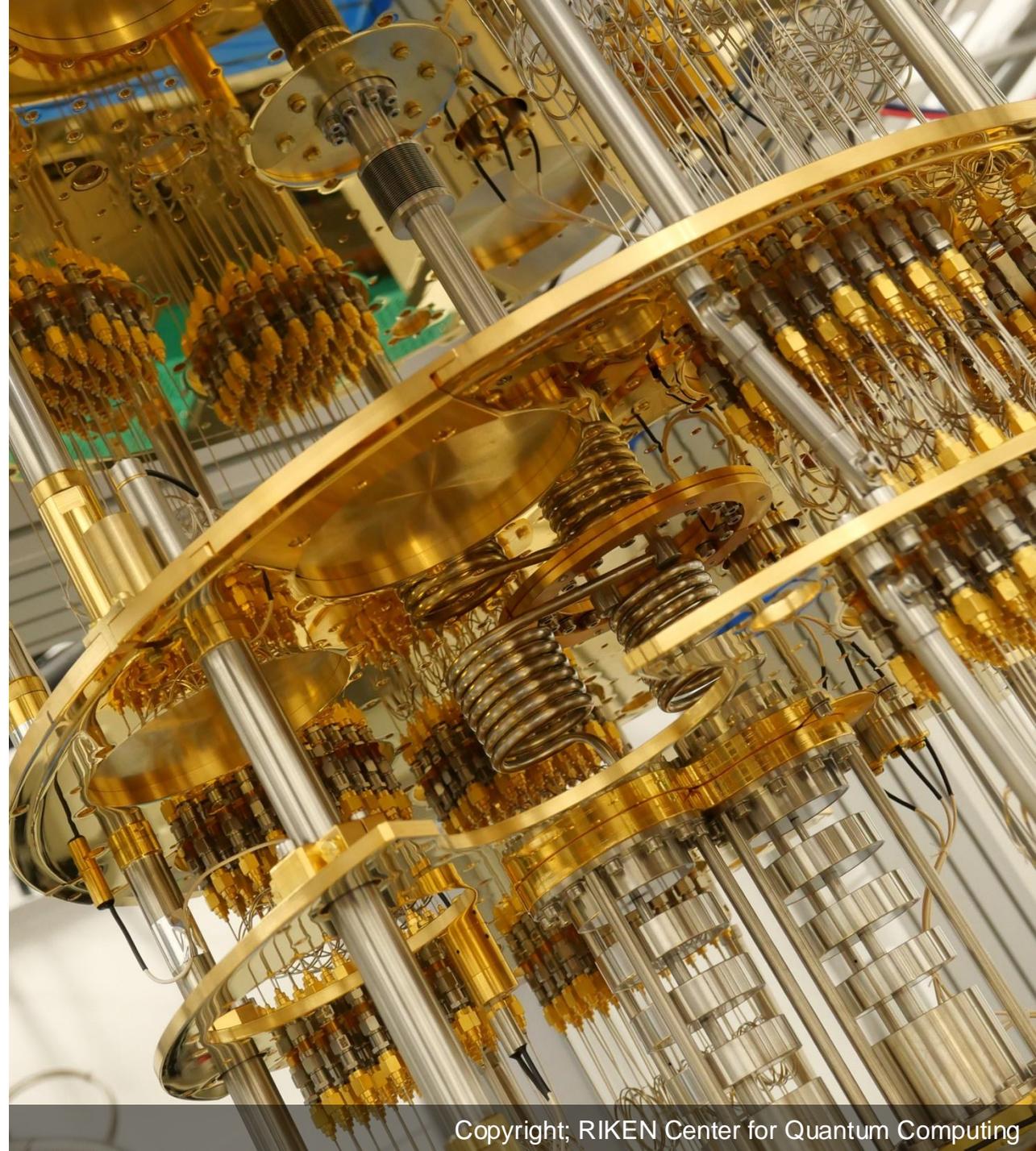


本日のお題 (嶋田提案)

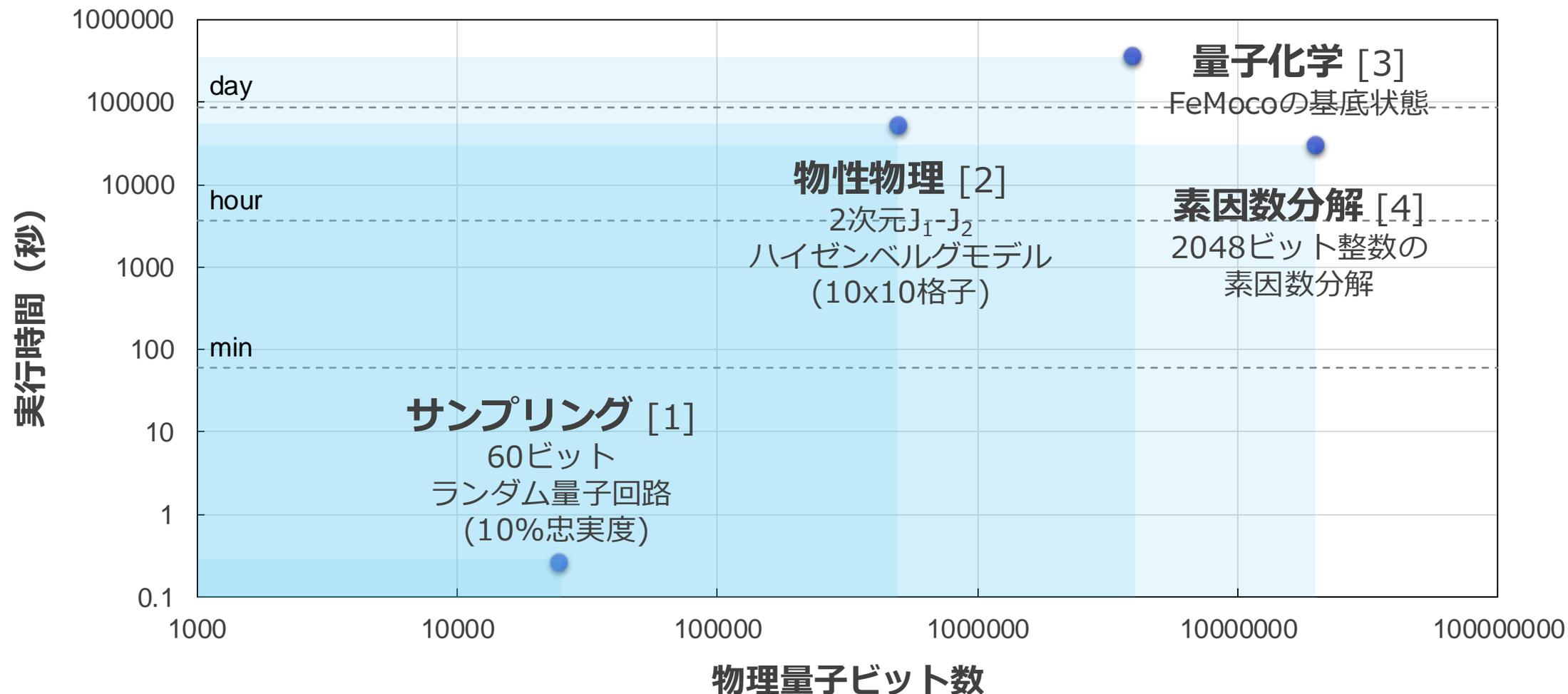
この5~10年のFTQCでは
どの規模・質のFTQCがあれば
どんなアプリが可能か？



開発すべきFTQCの
ターゲットを絞る
SW/HWのデザイン空間を議論



full-FTQCのリソースみつもり

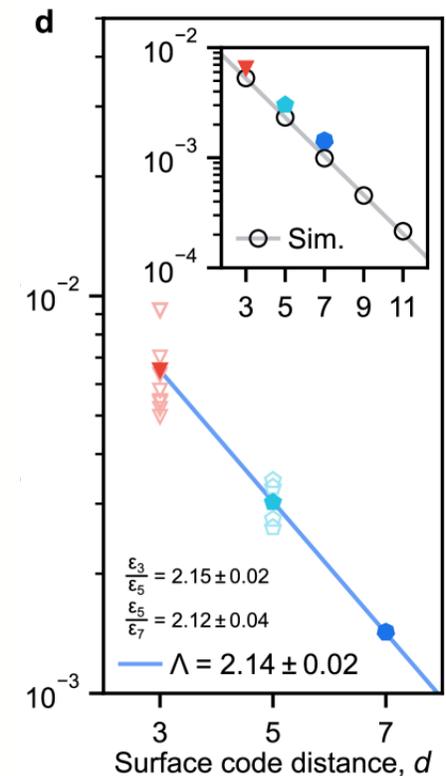
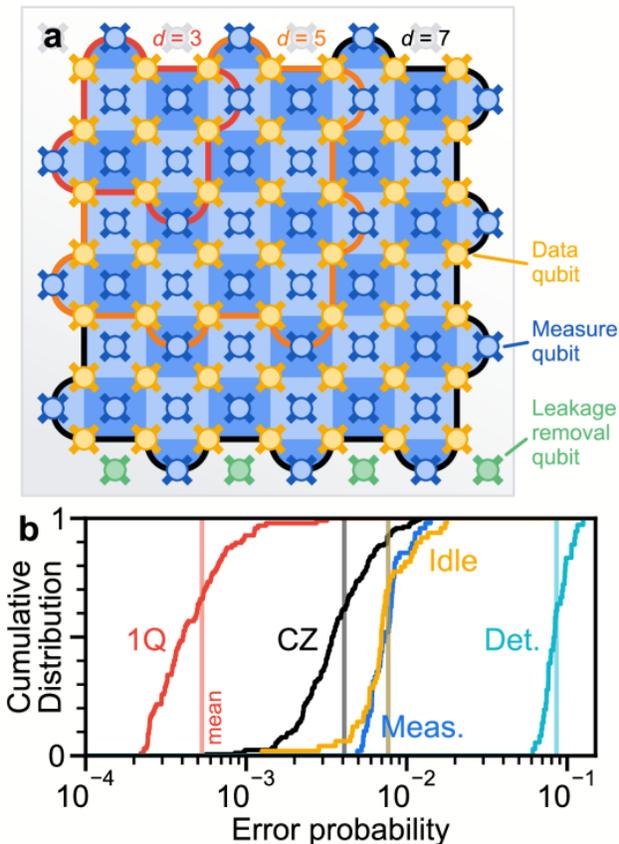


- [1] C. Gidney, Estimating the Fault Tolerant Cost of Classically Intractable Quantum Computations, Talks at Simon Institute (Feb. 27, 2020)
[2] N. Yoshioka et. al., Hunting for quantum-classical crossover in condensed matter problems, npj Quantum Information volume 10, 45 (2024).
[3] M. Reiher et al., Elucidating reaction mechanisms on quantum computers, PNAS 114 (29), 7555-7560 (2017).
[4] C. Gidney and M. Ekerä, How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits, Quantum 5, 433 (2021).

FTQCハードウェアの仮定

よくあるハードウェアの仮定は、まだまだ結構チャレンジングに見える
 そもそも、超伝導+表面符号以外のケースでは“定番”がまだないように思われる

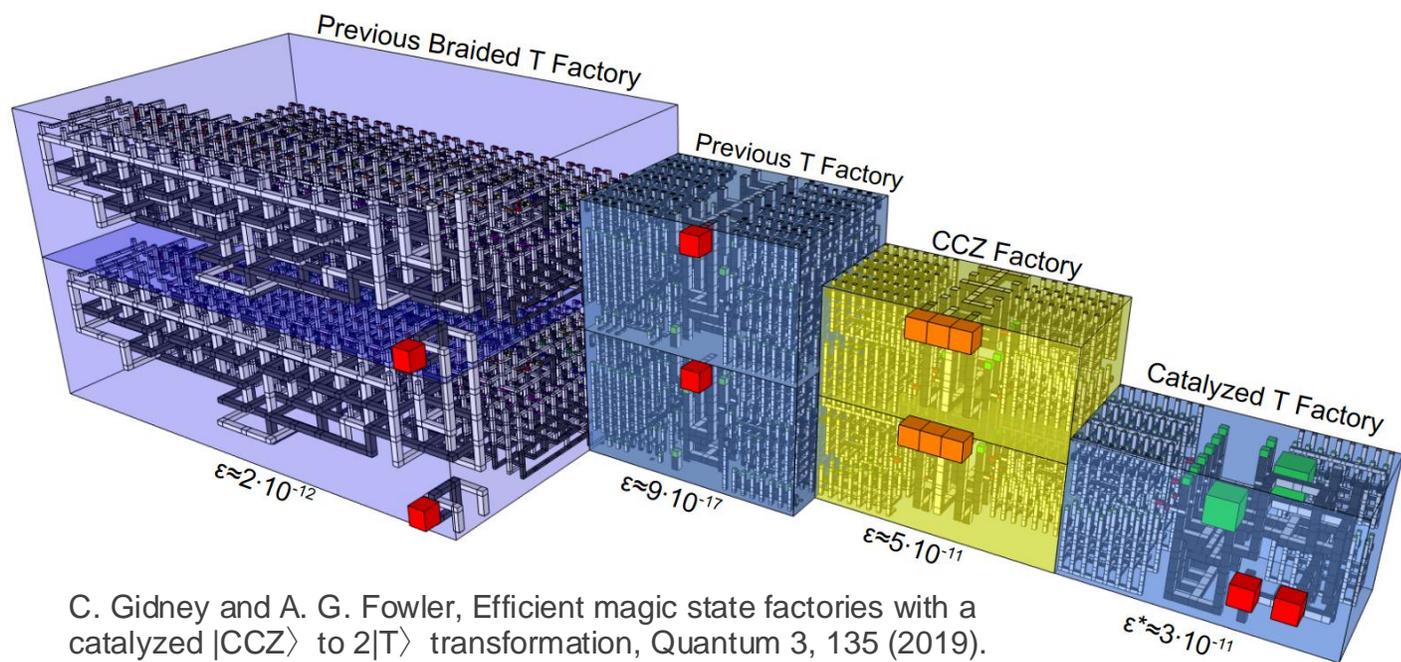
結合性	2次元格子、最近接
誤り訂正符号	2次元表面符号
物理ゲート操作忠実度	99.9%
ゲイン	5 dB/符号長 <small>符号長2あたり1/10</small>
コードサイクル	1 MHz
適応的測定 (遅延)	100 kHz



この5~10年で手が届くFTQC?

論理Tゲートは諦めたほうがいい?

符号上で万能量子計算をするために非クリフォードゲートが必要だが、表面符号ではTゲートはトランスバーサルではないため、魔法状態の準備などにリソースの大部分を割く羽目になる



C. Gidney and A. G. Fowler, Efficient magic state factories with a catalyzed $|CCZ\rangle$ to $2|T\rangle$ transformation, Quantum 3, 135 (2019).

Spin-Orbitalが N の量子化学計算
(精度 ϵ)に必要なTゲート数

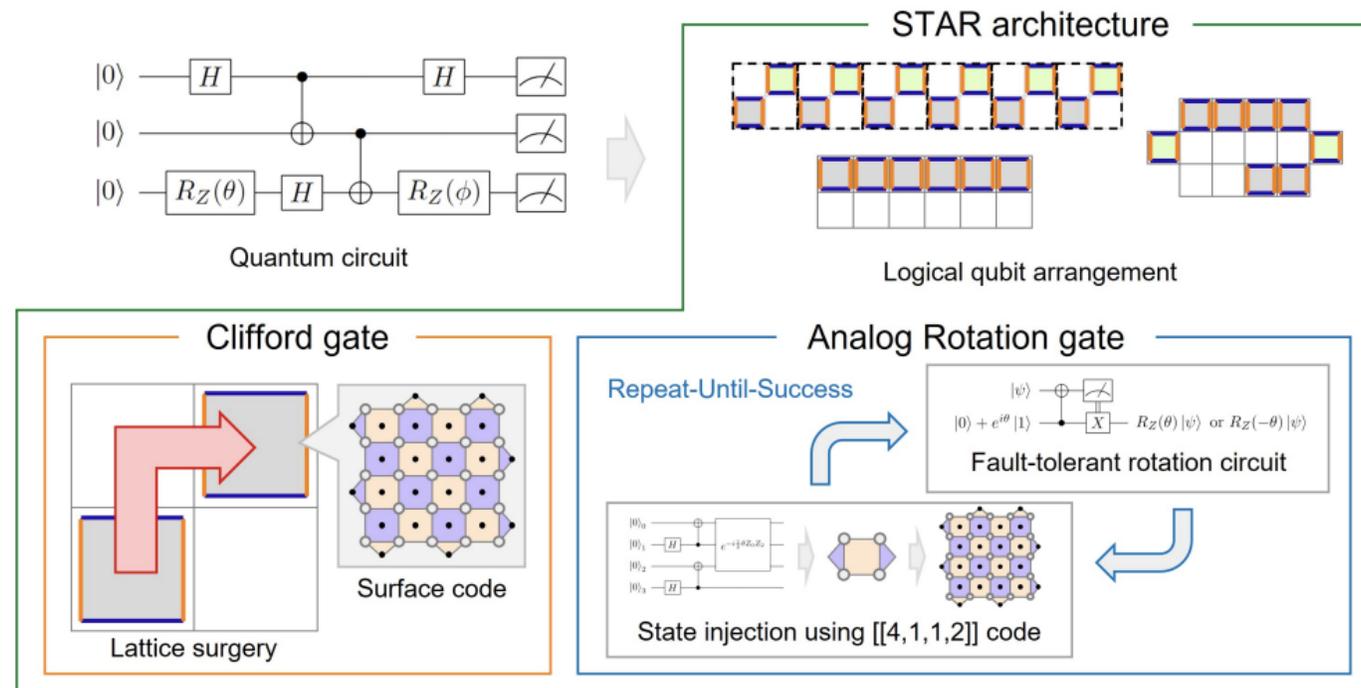
$$O\left(\frac{N^3 + N^2 \log(1/\epsilon)}{\epsilon}\right)$$

R. Babbush et al., Encoding Electronic Spectra in Quantum Circuits with Linear T Complexity, Phys. Rev. X 8, 041015 (2018).

この5~10年で手が届くFTQC?

STARアーキテクチャ (阪大、富士通)

- 論理Tゲート → 任意角度の位相回転ゲート
- 10000物理量子ビット = 64論理量子ビット



デザインは逆問題

ふつうのリソース推定 (順問題)

プログラムサイズ

- 問題設定
- アルゴリズム
- 回路幅×深さ
- (古典の反復や条件分岐の考慮?)

ハードウェア仮定

- 物理操作忠実度
- QECサイクル
- 測定サイクル
- QECゲイン

リソース推定器

$$f(C, \theta) = R$$

$R = \{\text{量子ビット数}, \text{ランタイム}\}$

今日の問題設定 (逆問題)

プログラムサイズ

- 問題設定
- アルゴリズム
- 回路幅×深さ
- (古典の反復や条件分岐の考慮?)

ハードウェア仮定

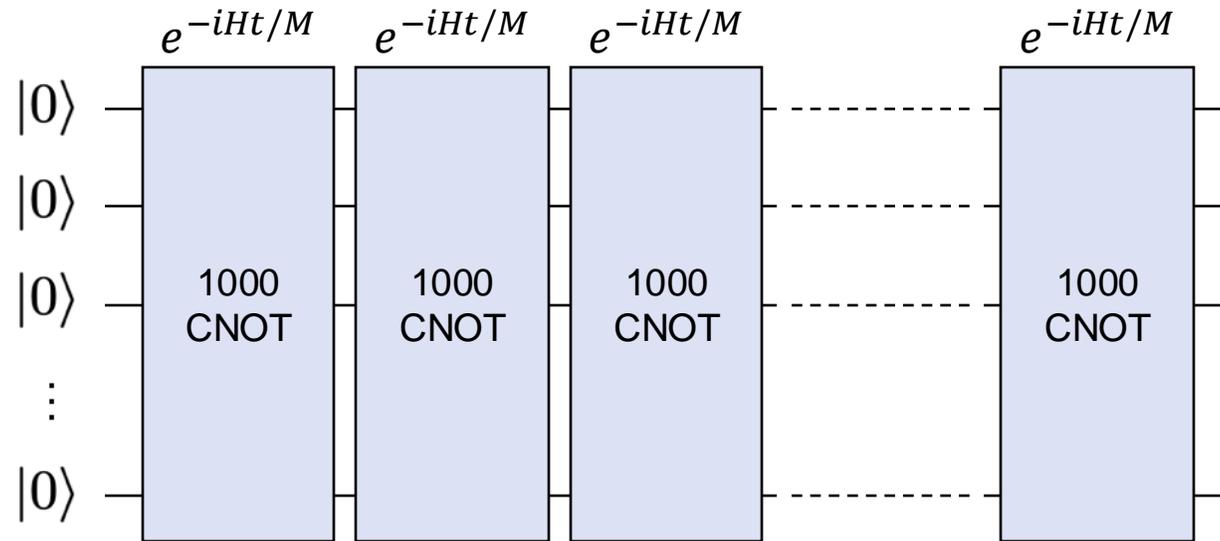
- 物理操作忠実度
- QECサイクル
- 測定サイクル
- QECゲイン

リソース逆推定器 $f^{-1}(R)$

$R = \{\text{量子ビット数}, \text{ランタイム}\}$

ざっくり、10000物理量子ビットを考える (私見)

例えば、あるサイズ・複雑度のハミルトニアン の時間発展シミュレーション



	量子ビット数	ステップ内のCNOT数	Trotterステップ数	合計CNOT数	要求CNOTエラー率
10x10ハバード模型 @early-FTQC	100	1000	20	20000	5×10^{-5}
2Dイジング模型 @IBMマシン*	127	144	20	2880	(3.5×10^{-4})

ハードウェアのデザインスペース

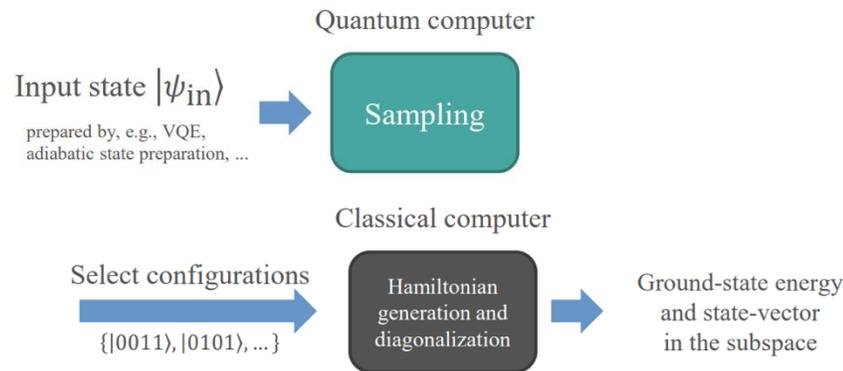
	NISQ	partial-FTQC			Full-FTQC	
物理量子ビット数	100		10000		1M	
物理操作誤り率	10^{-3}		10^{-3}		10^{-3}	
量子誤り訂正 Overhead		XX符号, $d=O$ 10	YY符号, $d=O$ 50	ZZ符号, $d=O$ 100	表面符号 ~1000	
論理量子ビット数	(100)	1000	200	100	1000	
論理 操作 誤り 率	1Q (Clifford, transversal)	アナログ (10^{-3})	誤り耐性 10^{-4}	誤り耐性 10^{-5}	誤り耐性 10^{-6}	誤り耐性 10^{-7}
	2Q (Clifford, transversal)	アナログ (10^{-3})	誤り耐性 10^{-4}	誤り耐性 10^{-5}	誤り耐性 10^{-6}	誤り耐性 10^{-7}
	Non- Clifford	アナログ (10^{-3})	アナログ (10^{-3})	アナログ (10^{-3})	アナログ (10^{-3})	誤り耐性 10^{-7}

量子誤り訂正・アーキテクチャのチョイス
(符号方式、符号距離、FT実装のゲート種)

ソフトウェアのデザインスペース

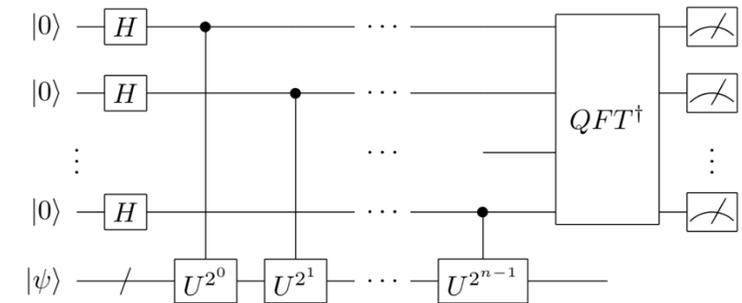
NISQでゴリ押し

e.g.) QSCIアルゴリズム
実機量子コンピュータの用途をサンプリングに限定し、高精度にエネルギー計算するアルゴリズム。



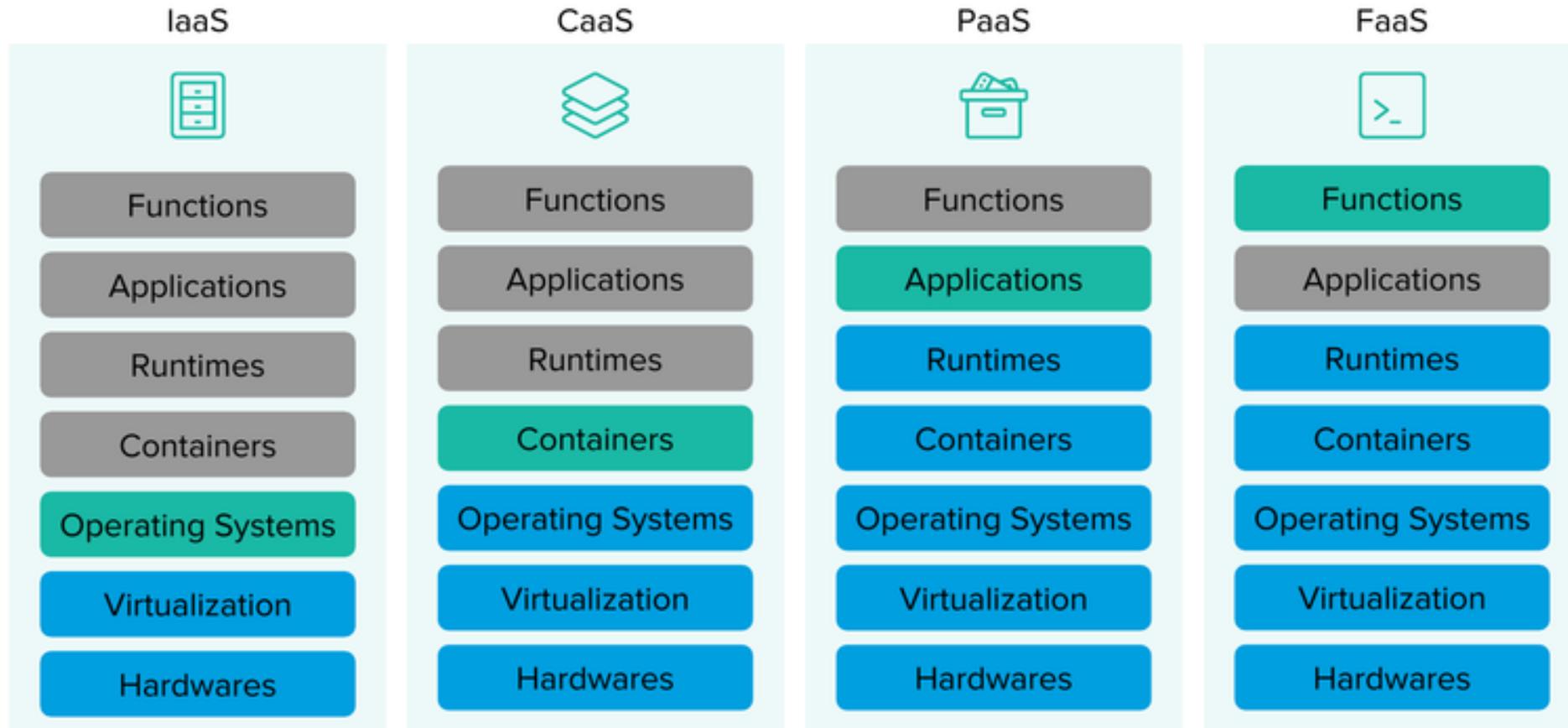
量子計算原理主義

e.g.) 位相推定
ユニタリ行列の固有値を求める量子アルゴリズム。指数加速が保証されているが、深い量子回路が必要。



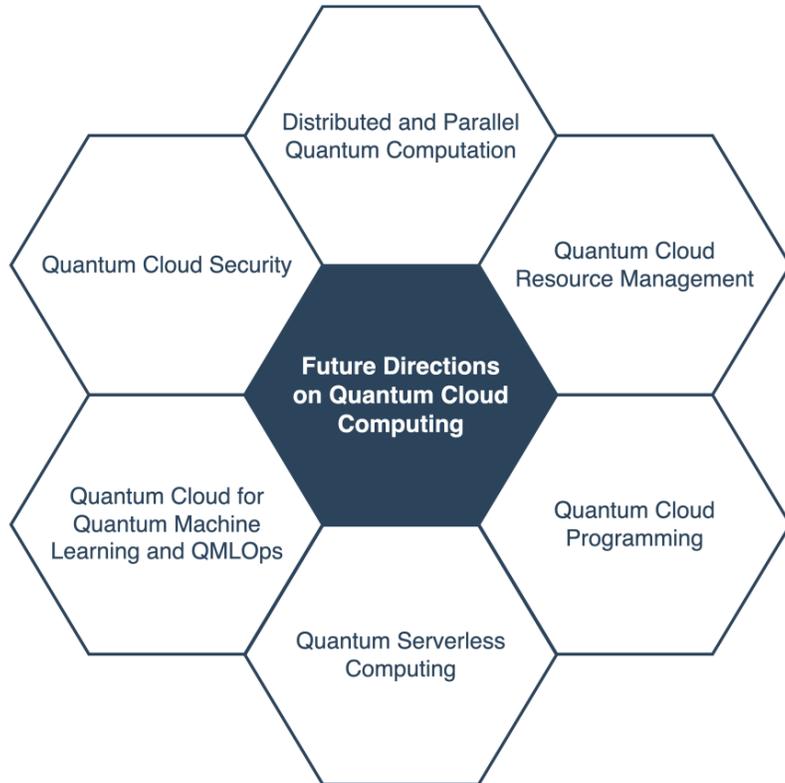
クラウド量子コンピュータのデザイン

XaaS



Pivotal.

リソース推定器は重要



Category	Reference	Highlights
Resource Estimation	Suracha et al. [178]	Propose QuRE for quantum resource estimation, enhancing design efficiency through error rate analysis and various error correction strategies.
	JavadiAbhari et al. [85]	Propose ScaffCC, a scalable framework for quantum circuit analysis and resource estimation, optimizing hardware-agnostic implementations.
	Salm et al. [165]	Propose NISQ Analyzer for optimizing quantum backend selection based on task-specific requirements and available resources.
Resource Allocation & Task Scheduling	Ravi et al. [156]	Propose the first statistical-based resource management strategy for quantum job using IBM Quantum
	Ngoenriang et al. [129]	Propose a two-stage stochastic resource allocation technique for distributed quantum computing
	Kaewpuang et al. [87]	Propose a stochastic qubit allocation for quantum cloud under multiple uncertainties of circuit characteristics and waiting time
	Cicconetti et al. [29]	Propose a network resource allocation for distributed quantum computing base on Weighted Round Robin algorithm
	Zhang et al. [204]	Proposed a task scheduling method to classify users and tasks and provide differentiated service opportunities
	Weder et al. [192]	Proposed an automated quantum hardware selection for quantum workflows based on quantum circuit properties
	Liu et al. [107]	Propose QuCloud for efficient multi-programming in quantum cloud computing, enhancing resource utilization and reducing error rates
	Liu et al. [108]	Extend QuCloud with QuCloud+, incorporating advanced quantum program profiling to improve qubit fidelity and reduce SWAP overhead.
Modeling & Simulation	Nguyen et al. [131]	Propose iQuantum toolkit for support the modeling and simulation of quantum resource management in cloud-based environments

量子ハードウェア

量子ソフトウェア

(1993/8/26完成)