

量子計算・量子アルゴリズム研究の最前線

吉岡信行

2026.06.05

研究の進め方

大学院 = 研究をする場所

研究の進め方

~~大学院 = 研究をする場所~~

大学院 = 良い研究を知り、その方法論を学び、実践する場所

Four golden lessons

Steven Weinberg



Dive right in: exploring the unclear, uncharted areas of science can lead to creative work.

(1) 全てを知る必要はない

研究しながら知れば良い

(2) 混沌とした分野に飛び込む

良い問題が残っている分野を選ぶ

(3) 時間の浪費を恐れない

新しいことをするには試行錯誤が不可欠

(4) 科学の歴史を知る

= 問題の重要さを知る

なぜ量子計算に取り組むか？

1. 量子計算でこそ効率的に解ける問題があるから
2. 多様な分野の総力戦でチャレンジングな問題だから
3. 量子デバイスそのものが新しい物理の舞台だから

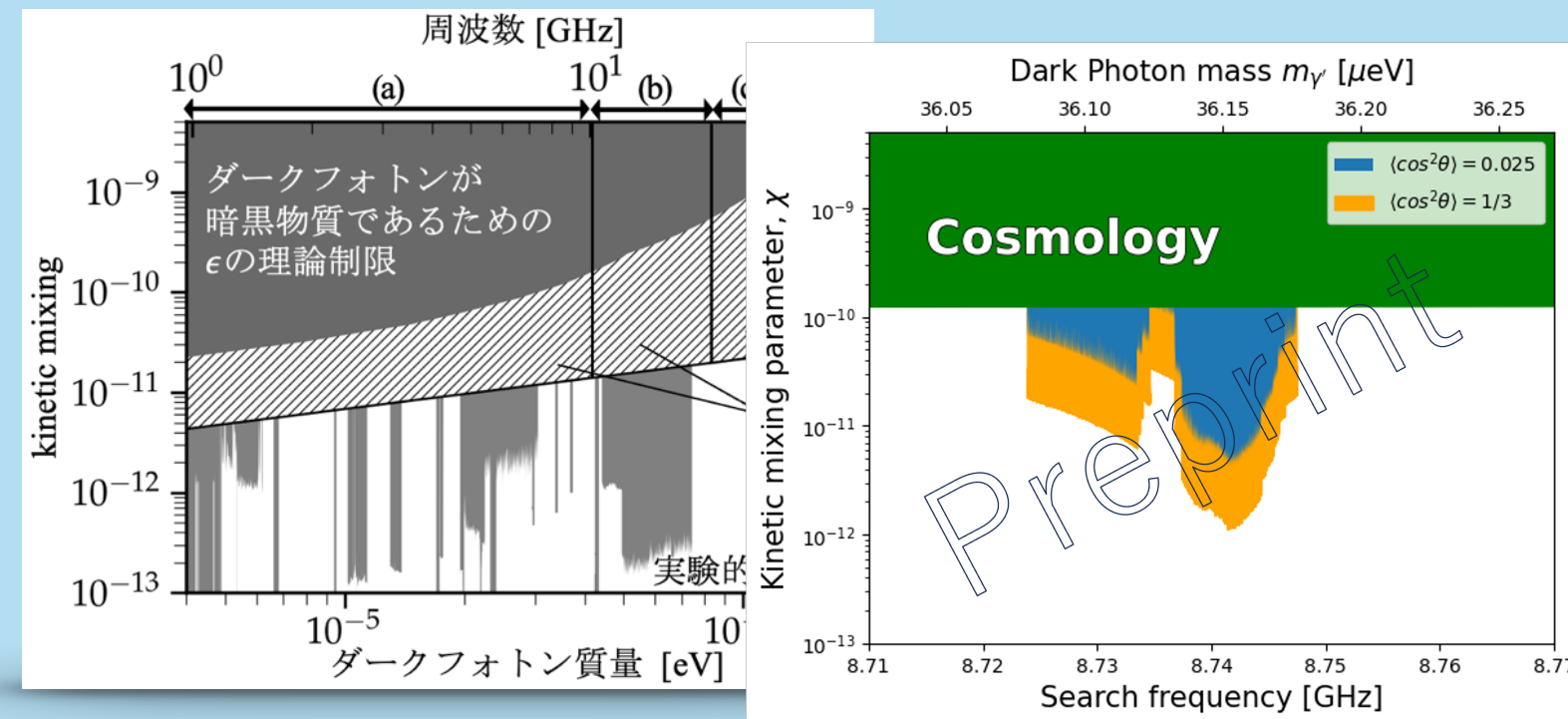
量子情報処理の目的

量子力学に基づく動作原理を活用 → 森羅万象を理解・制御したい

- (1) 情報処理の高速化
- (2) 科学現象の精密測定・計算

センサ・解析の量子強化

e.g. 暗黒物質の未到パラメータ探索



Nakazono et al., arXiv:2505.15619

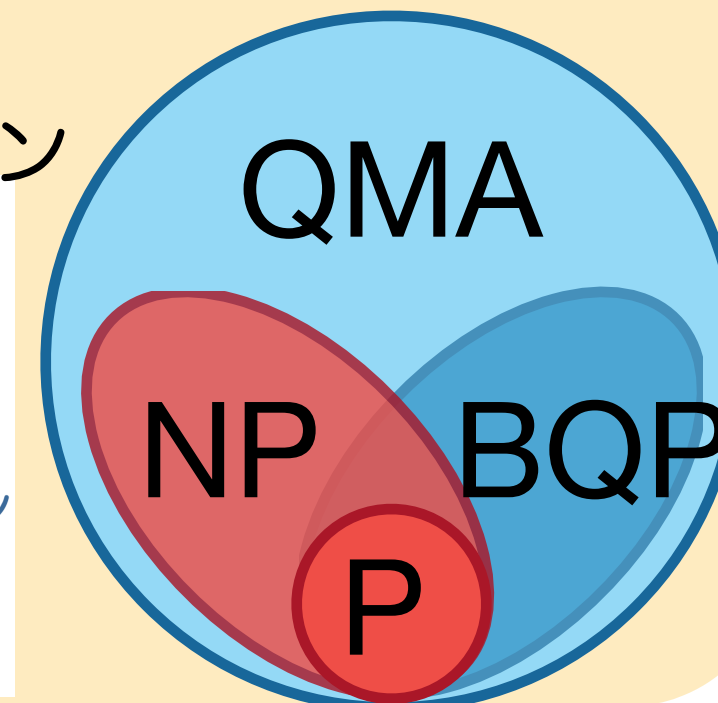
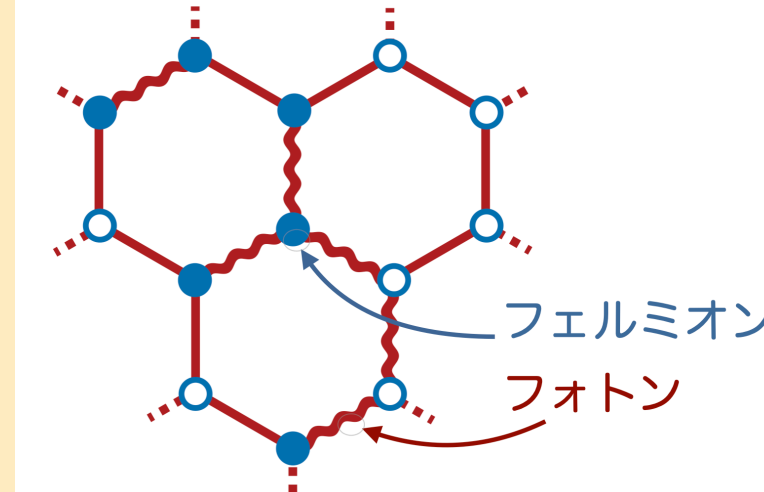
量子アルゴによる高速計算

e.g. 量子優位性の要件

Problems	ランダム回路	物性物理	量子化学	素因数分解
#Qubits (physical qubits)	$O(10^4)$	$O(10^5)$	$O(10^6)$	$O(10^7)$
実行時間	$O(\text{Secs-Hours})$	$O(\text{Hours})$	$O(\text{Days})$	$O(\text{Hours-Days})$

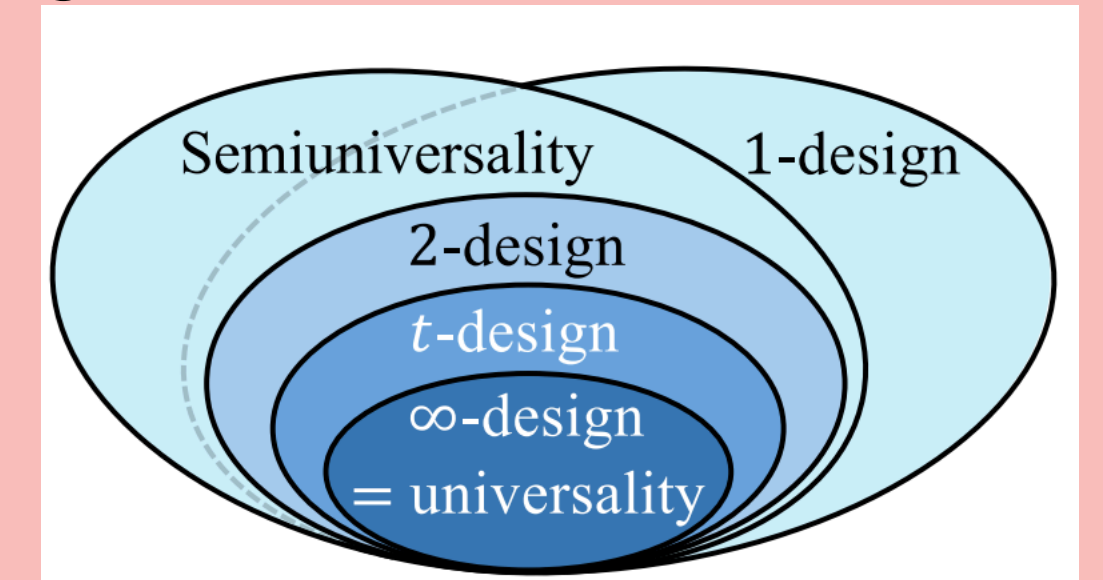
Yoshioka et al., npj Quantum Info ('2024)

e.g. 素粒子模型の量子シミュレーション

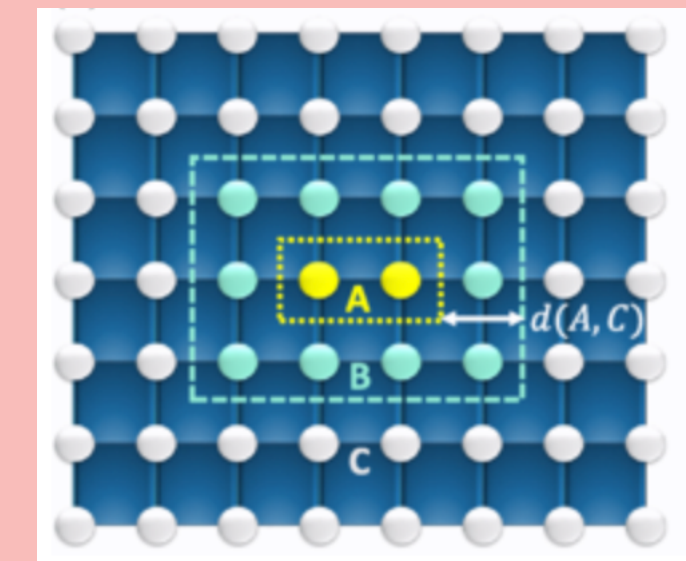


新奇量子物理の舞台

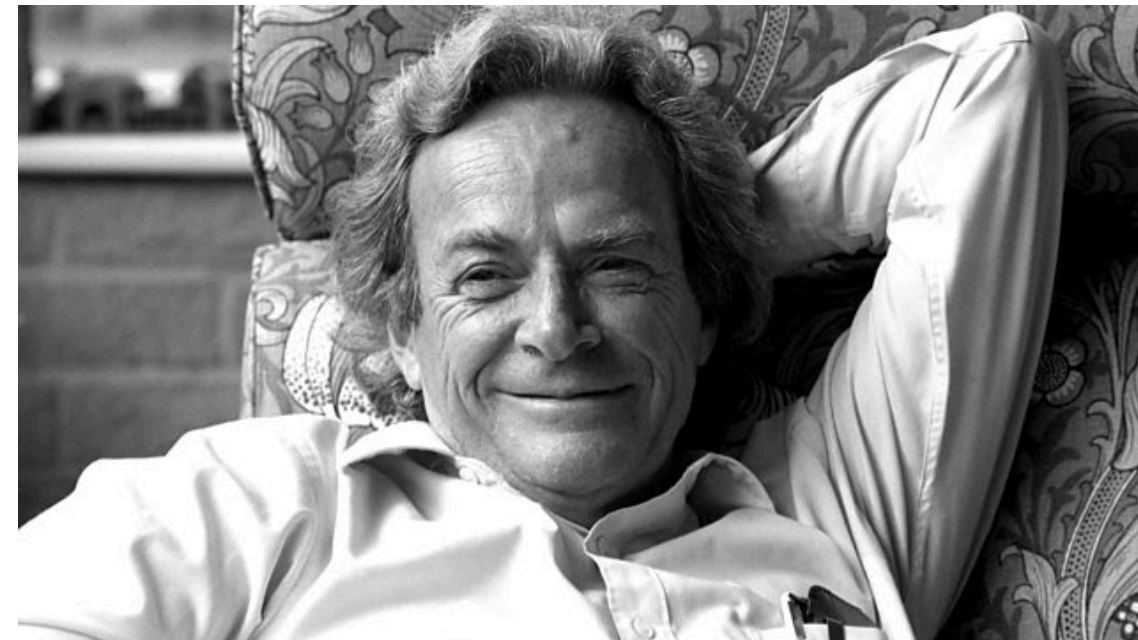
e.g. 量子ランダムネスの階層性



e.g. 局所性と量子相関

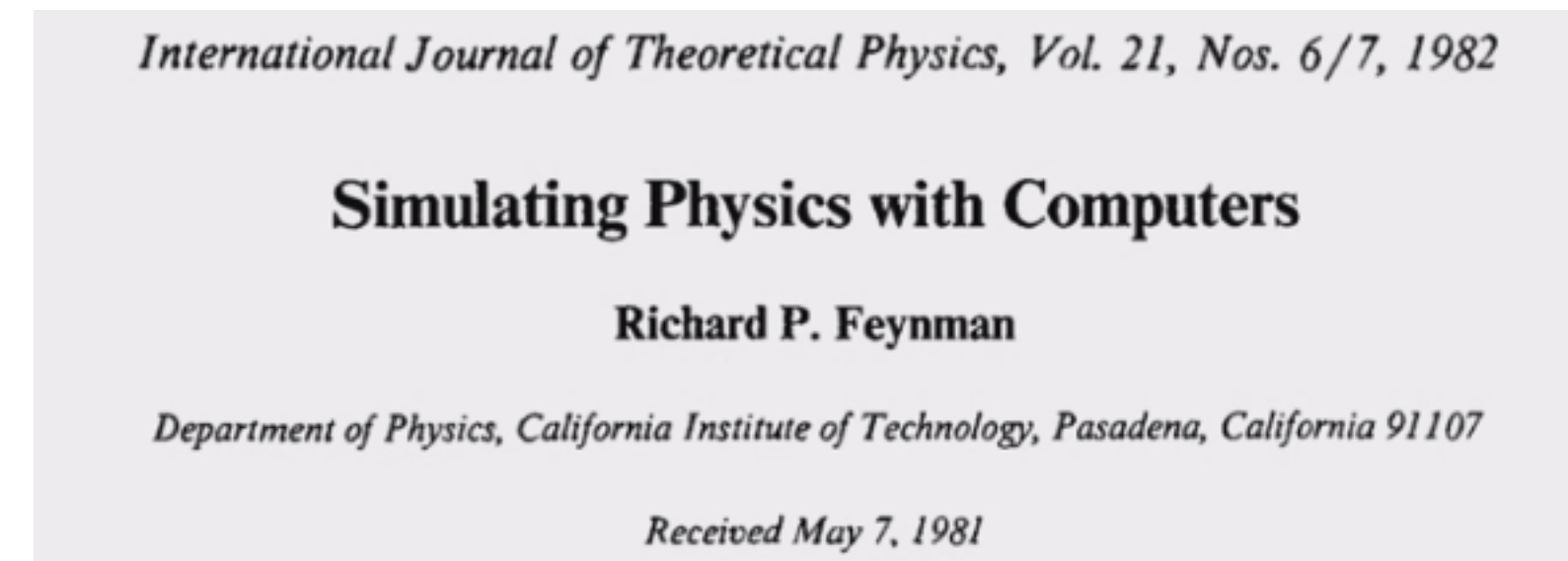


量子多体系の「シミュレーション」



Richard. P. Feynman (1918 - 1988)

量子系の古典計算が難しいなら、
制御可能な量子系自体を使って計算してやればいい



量子シミュレーション

- 人工量子系の相互作用を制御することで
量子多体ハミルトニアンを実験室に作り出す

e.g.) 2d Fermion Hubbard with Li atom

Mazurenko et al., Nature (2017)

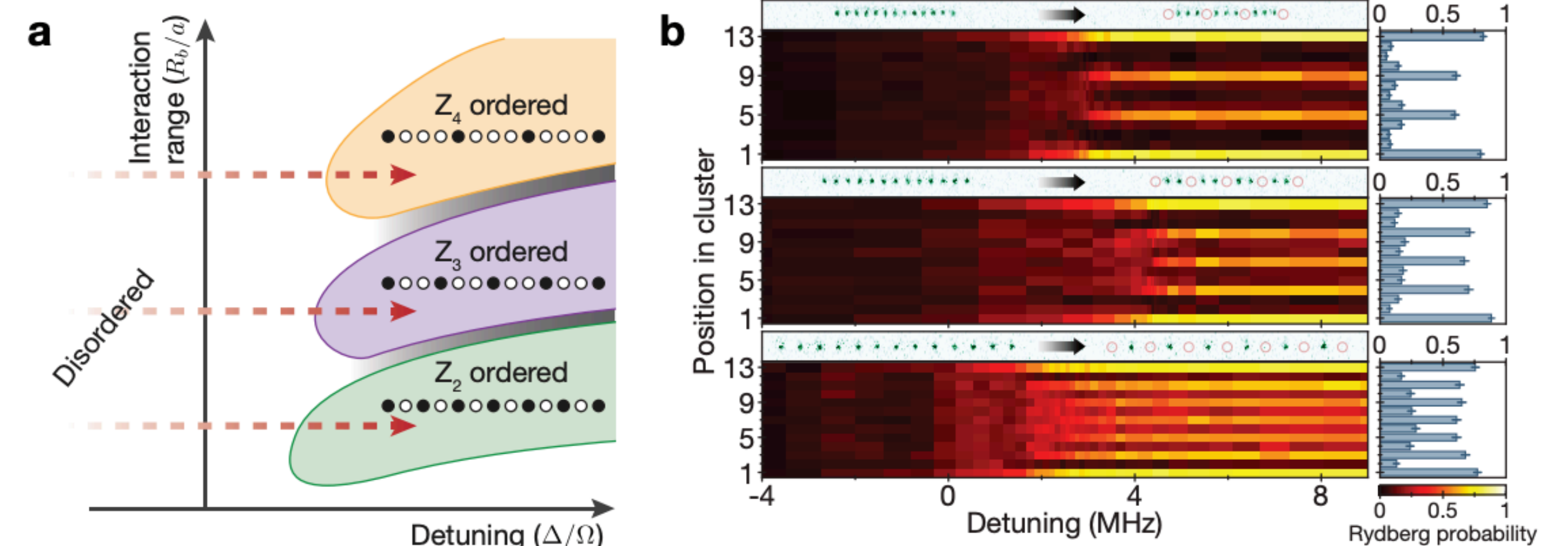
- dynamicalな性質へのプローブとして期待大

e.g.) 量子クエンチ・動的量子相転移

- 実現可能なハミルトニアンに制約あり

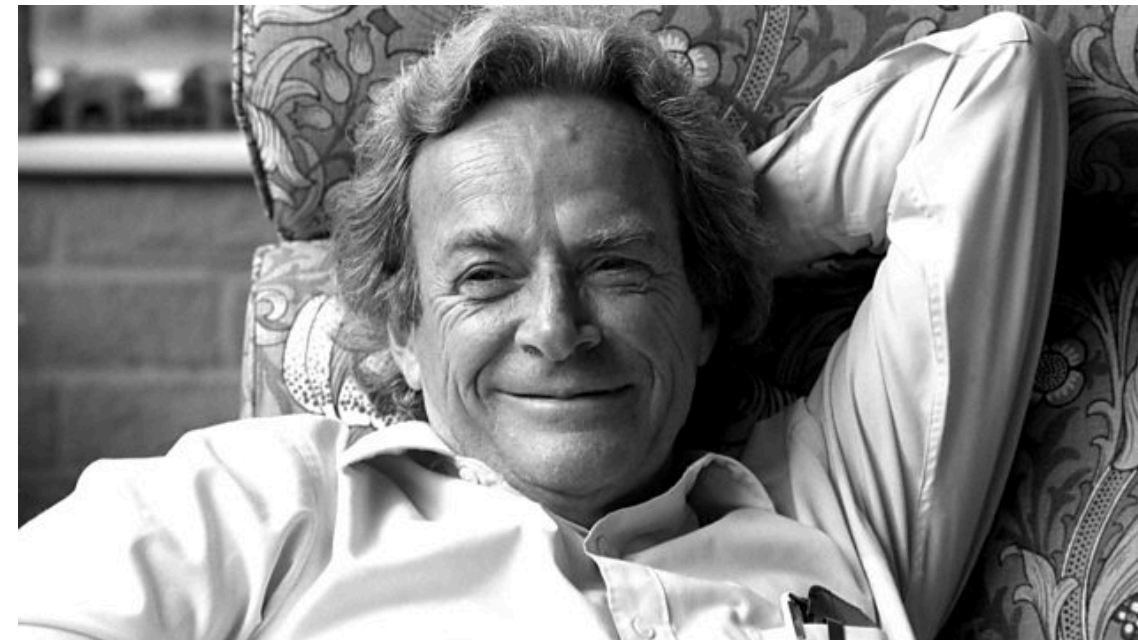
e.g.) Rydberg原子を用いた量子イジング模型のダイナミクス

$$\frac{\mathcal{H}}{\hbar} = \sum_i \frac{\Omega_i}{2} \sigma_x^i - \sum_i \Delta_i n_i + \sum_{i<j} V_{ij} n_i n_j,$$



Bernien et al., Nature (2017)

量子多体系の「計算」



Richard. P. Feynman (1918 - 1988)

量子系の古典計算が難しいなら、
制御可能な量子系自体を使って計算してやればいい

International Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, Nos. 6/7, 1982

Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

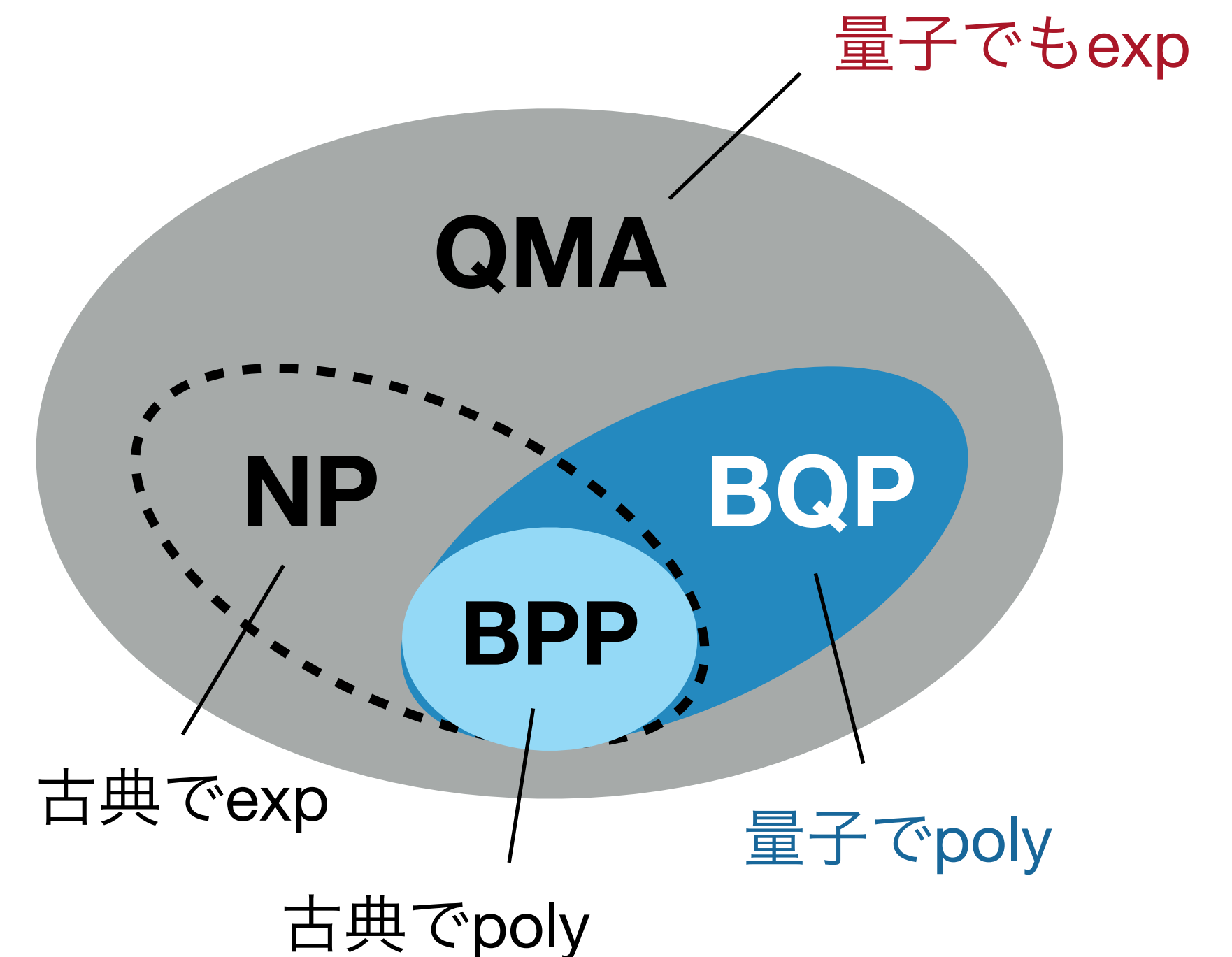
Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107

Received May 7, 1981

量子計算

- 人工量子系の相互作用を制御することで
任意のユニタリ演算を実行する (万能性)
- 量子計算機では効率的に (多項式コスト) 解けて、
古典計算機では難しい (指数コスト) 問題への応用が期待

- e.g. 素因数分解 Shor ('94) (耐量子暗号をmotivate)
- e.g. 量子多体ダイナミクス Lloyd ('96), Abrams&Lloyd ('99)
- e.g. Jones多項式の近似 Aharonov, Jones, Landau ('06)

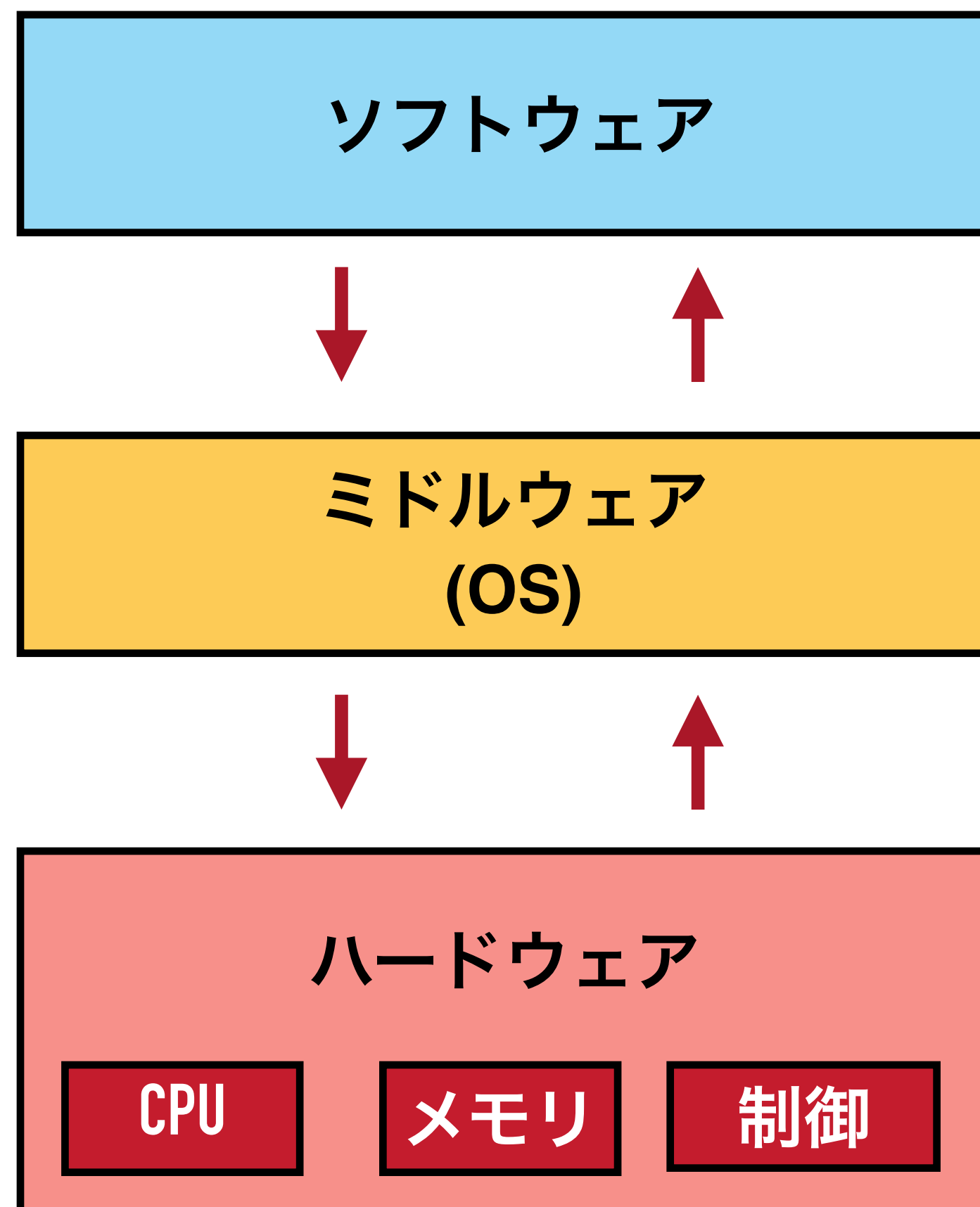


なぜ量子計算に取り組むか？

1. 量子計算でこそ効率的に解ける問題があるから
- 2. 多様な分野の総力戦でチャレンジングな問題だから**
3. 量子デバイスそのものが新しい物理の舞台だから

計算機を作るということ

古典計算機 = 様々な階層で解像度の異なる仕事を担っている
レイヤごとに構成のロジックや産業が異なる



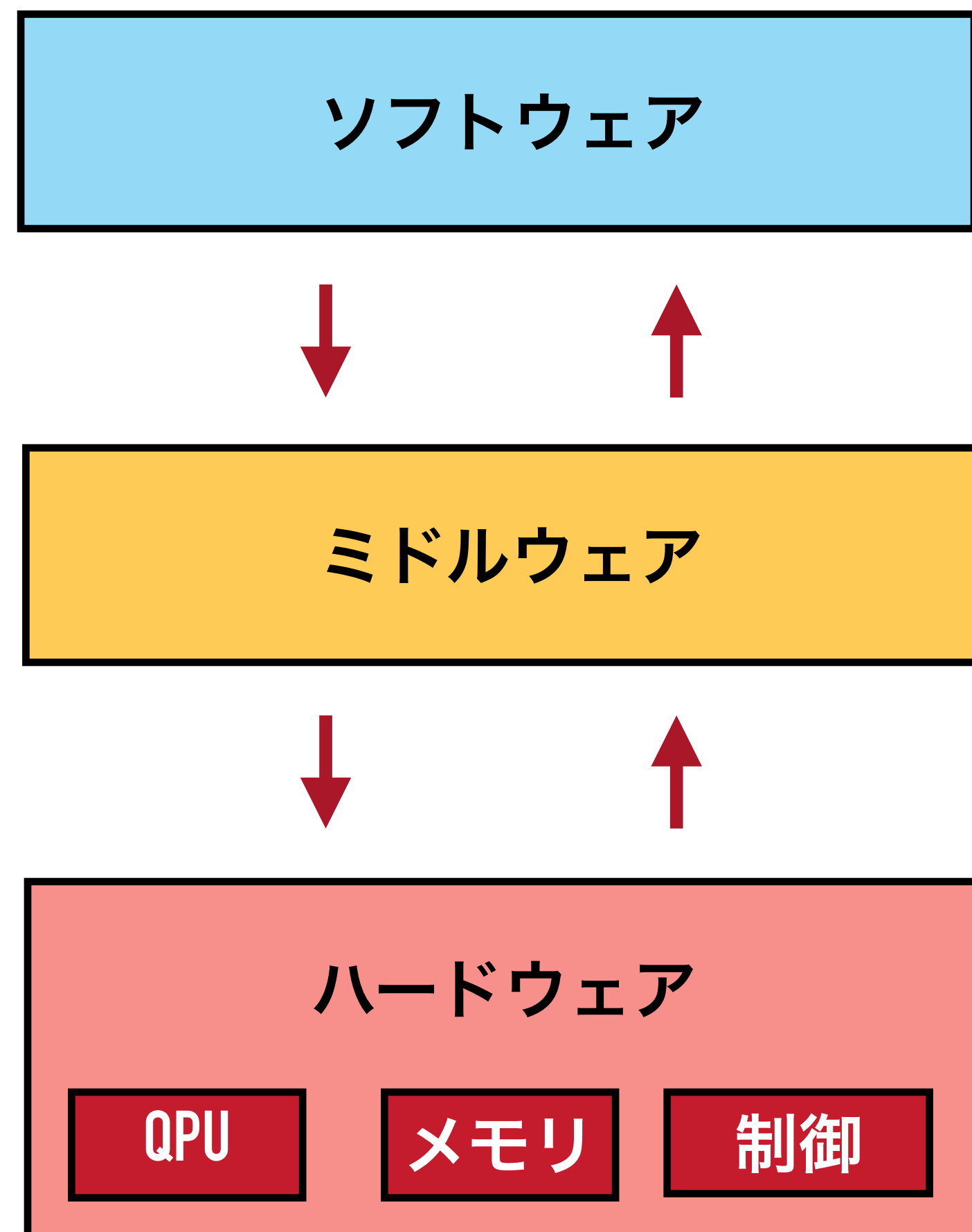
ソフトウェア = 利用目的に応じたアルゴリズムの集合

OS・ミドルウェア = ソフトの命令を機械語にコンパイル
チップ内のCPU配置最適化

ハードウェア = ディスクへの書き込み・保持を担当

量子計算機を作ること

古典計算機 (コンピュータ)と同様、様々な科学・産業が結集する



ソフトウェア = 利用目的に応じた量子アルゴリズムの集合
物理・化学・計算機科学・機械学習など

ミドルウェア = 量子回路を物理的な処理に変換
(パルス・レーザーの照射など)

デバイス内のQPU配置最適化

メモリ = 超伝導 (Josephson接合)・原子・半導体 etc.

量子計算研究は科学の総合格闘技

アプリケーション層

- ・ 計算量理論的に量子優位性の存在が証明できる問題は？
- ・ 実行時間の意味で量子優位性がある問題は？

計算機アーキテクチャ層

- ・ メモリ・計算実行・エンタングルメント媒体など役割の分割方法？
- ・ 魔法状態の生成・構成は？失敗時のリカバリーは？

量子誤り訂正層

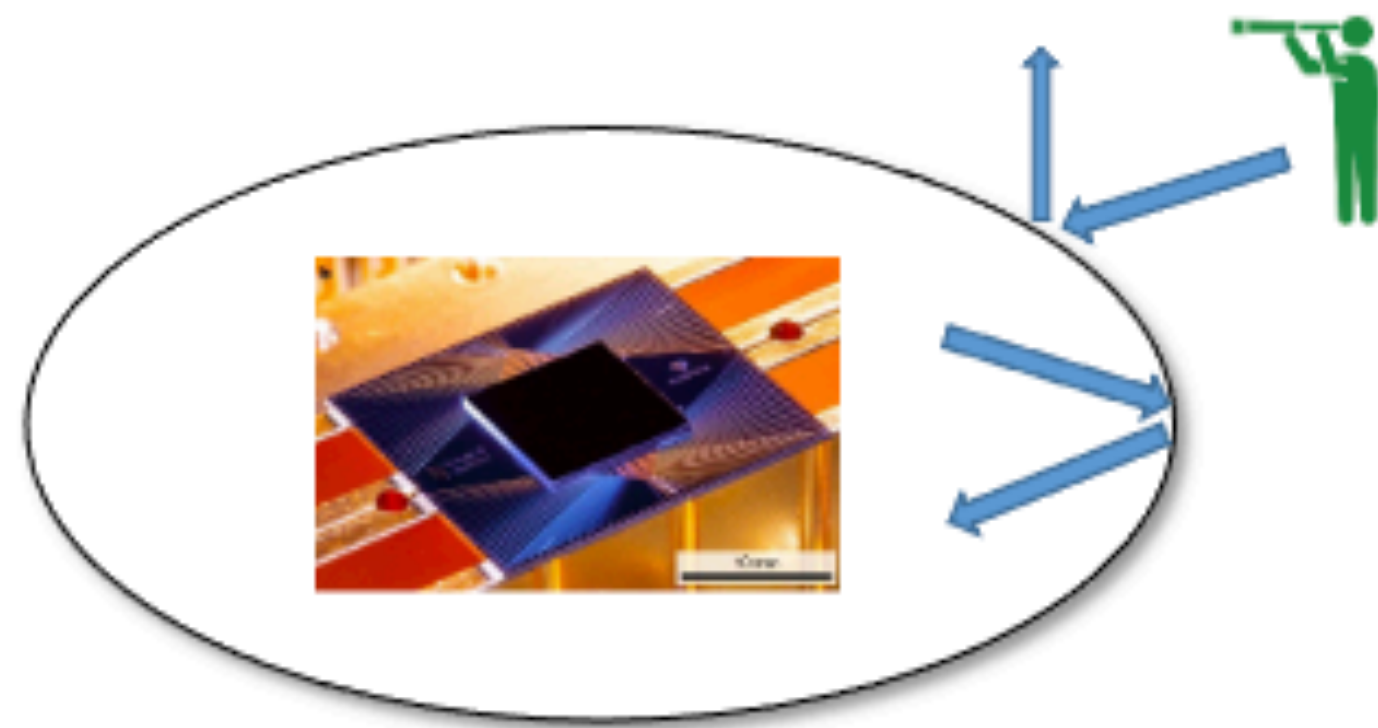
- ・ 符号化率の高い低密度符号？
- ・ 符号の時間変動による万能計算？

ハードウェア層

- ・ 超伝導・中性原子・イオン・光etc.に最適な符号はどれか？
- ・ 高忠実度な物理ゲート操作の方法は？

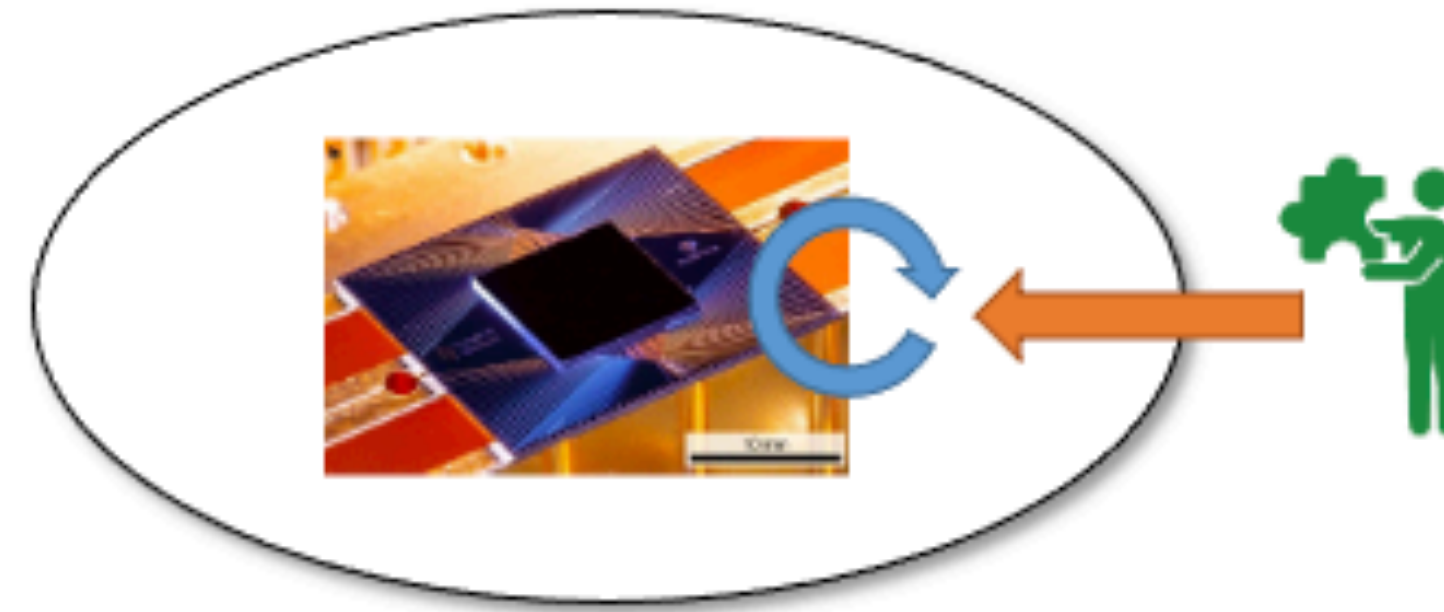
量子計算機的设计要件

孤立性



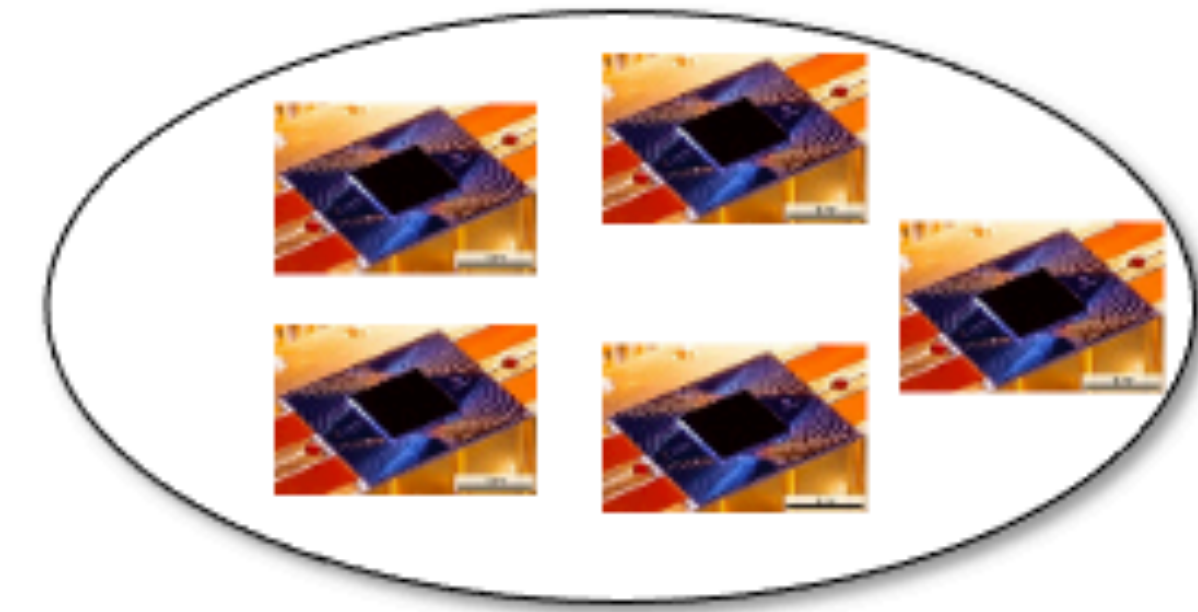
原理的に内部情報が外から見れないし
外に漏れない物理系を作る

制御性



内部の情報がわからないように
状態の操作が出来る

スケール性



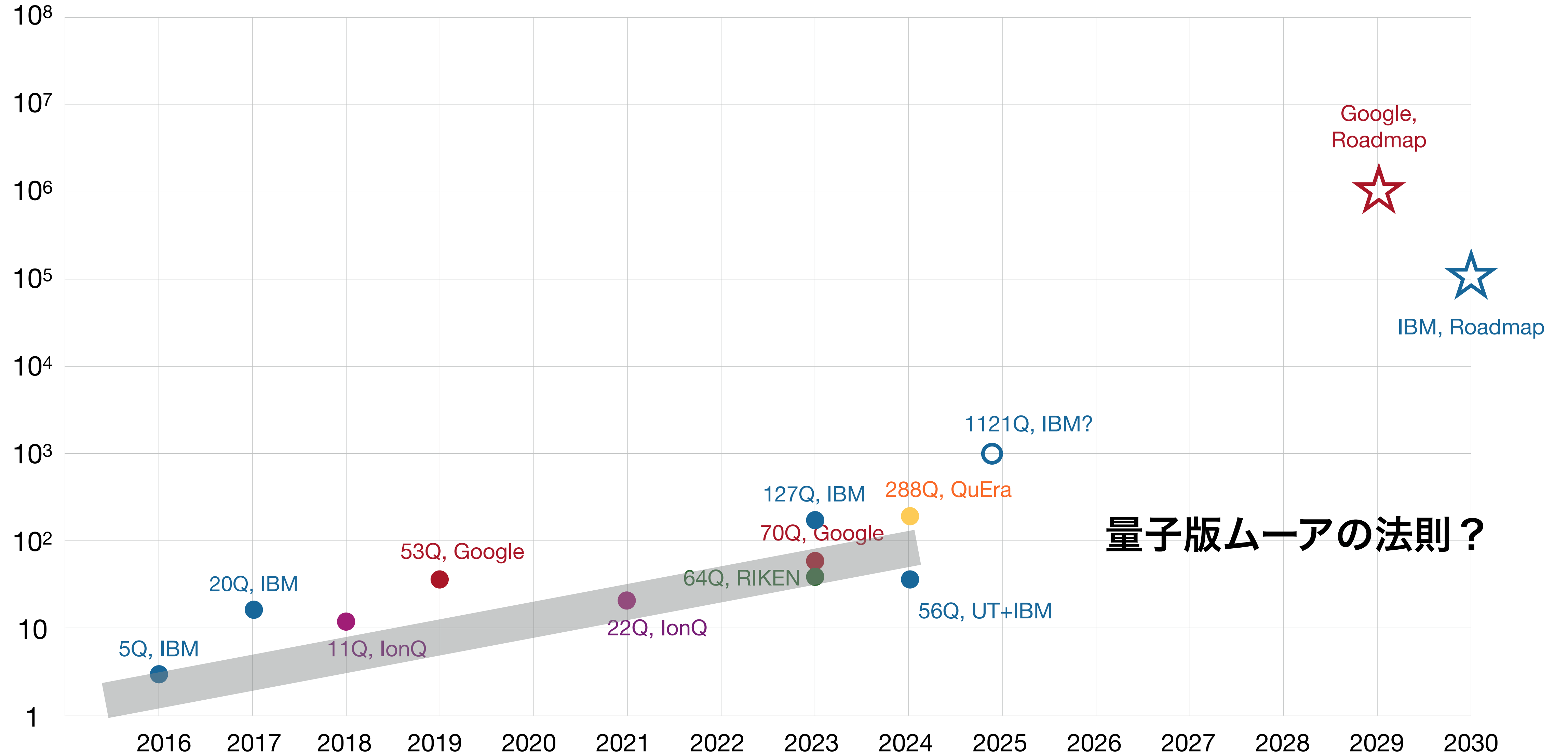
これらの性質を維持しながら
: 有用な計算が十分な規模まで拡大できる

質的な要件: エラー率

量的な要件: 量子ビット数

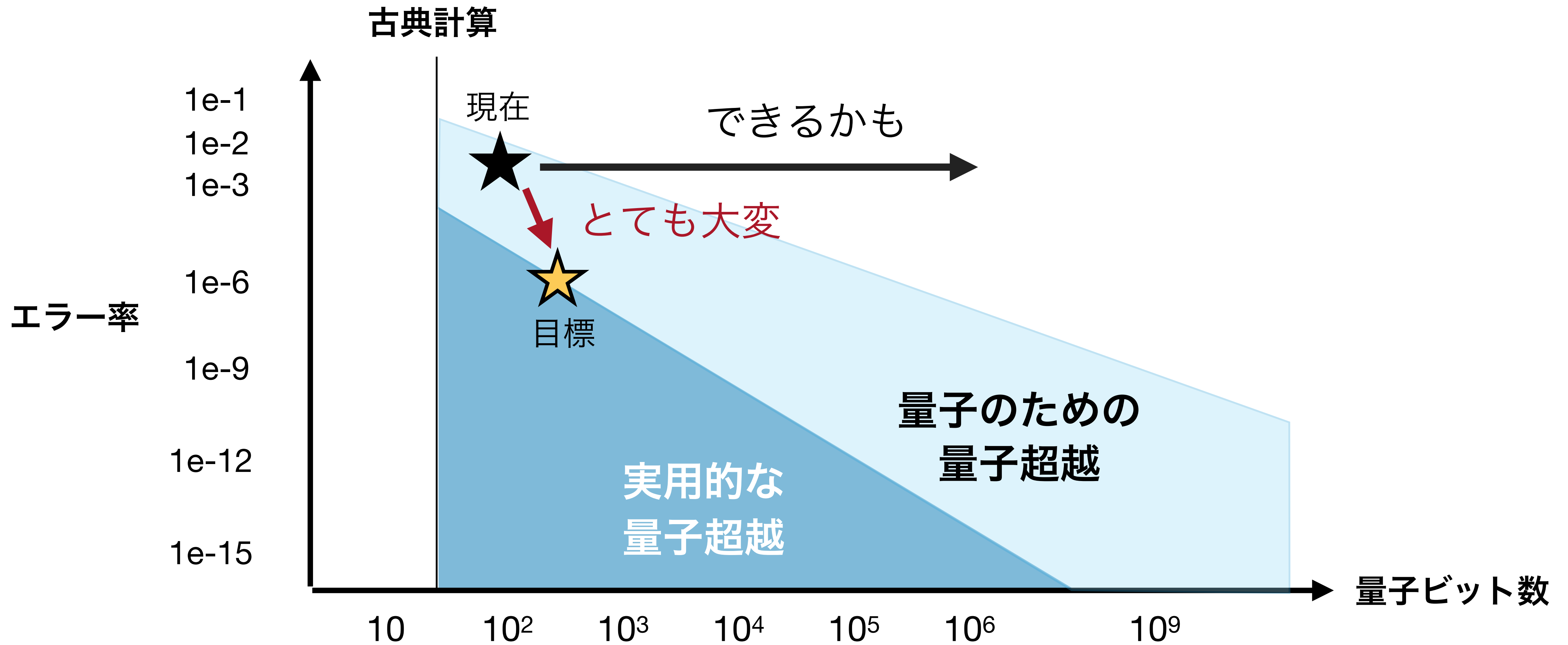
量的な要件：量子ビット数

量子ビット数

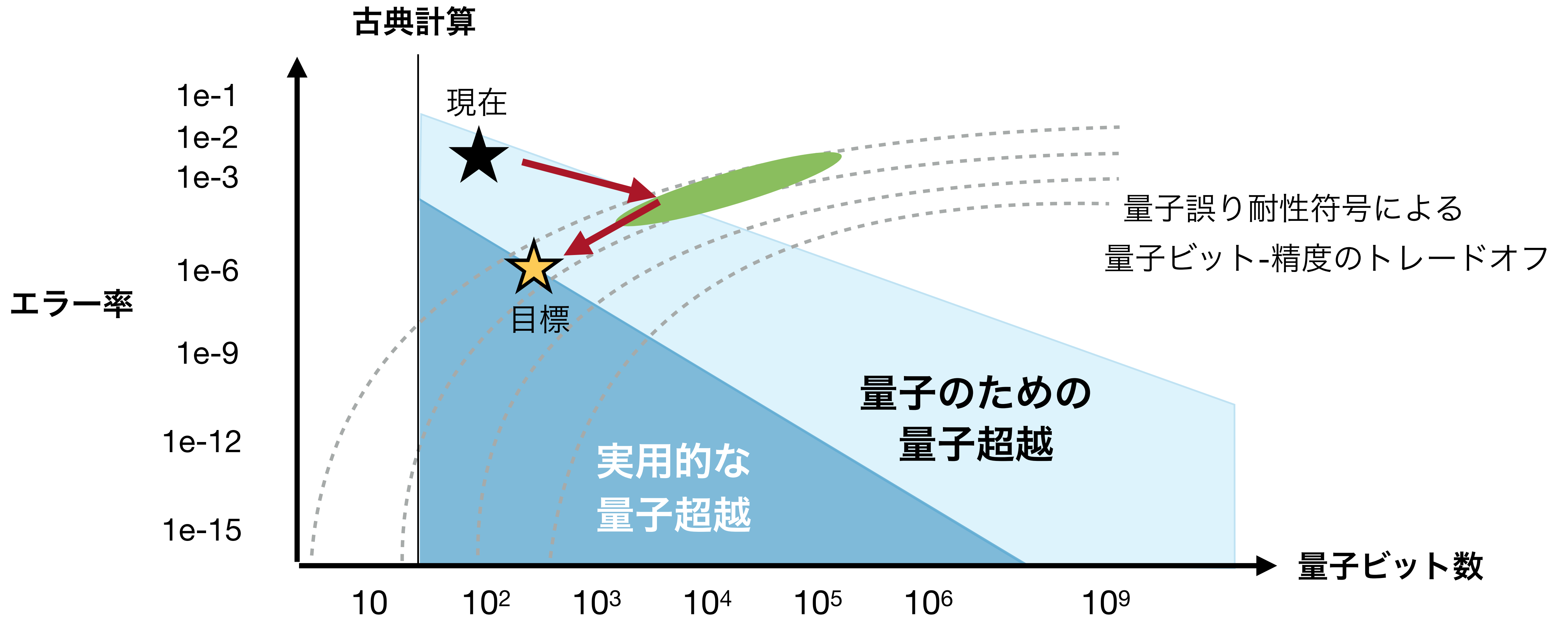


量子版ムーアの法則？

質的な要件をクリアするには？



質的な要件をクリアするには？



量子計算の方式

物理系を完全に孤立させることはできず、外界との相互作用による散逸が生じる

→ 計算エラー/ノイズの発生

解決策

(1) ハード：技術を磨く

- ・この30年で超伝導量子ビットのT1時間：1ns → 10⁶ns
- ・ただし、媒質中の電磁波損失などの影響があり、さらに10³倍は厳しい？ Martinis ('21)

(2) ソフト：量子誤り抑制

- ・測定データの古典処理によりシグナルを復元
- ・符号化によるオーバーヘッドなし

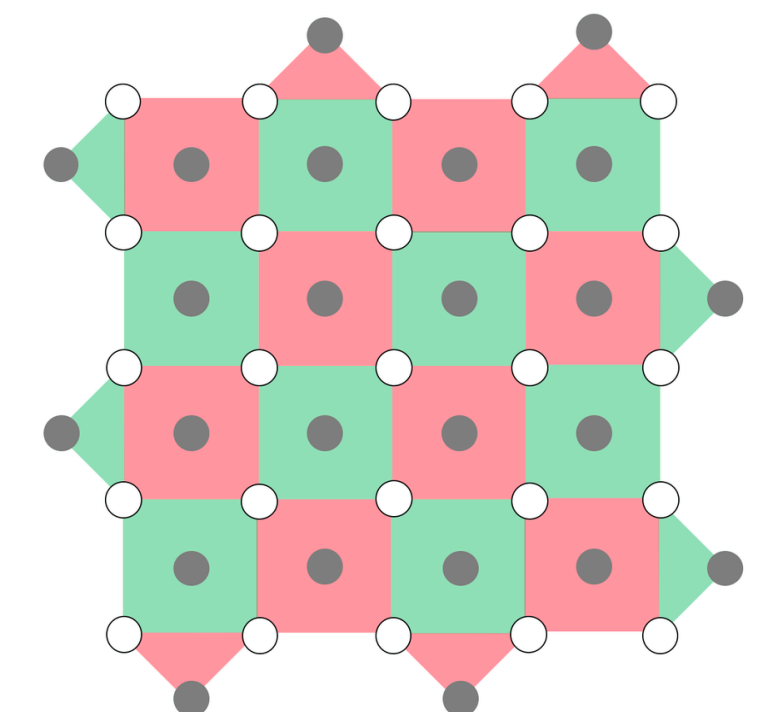
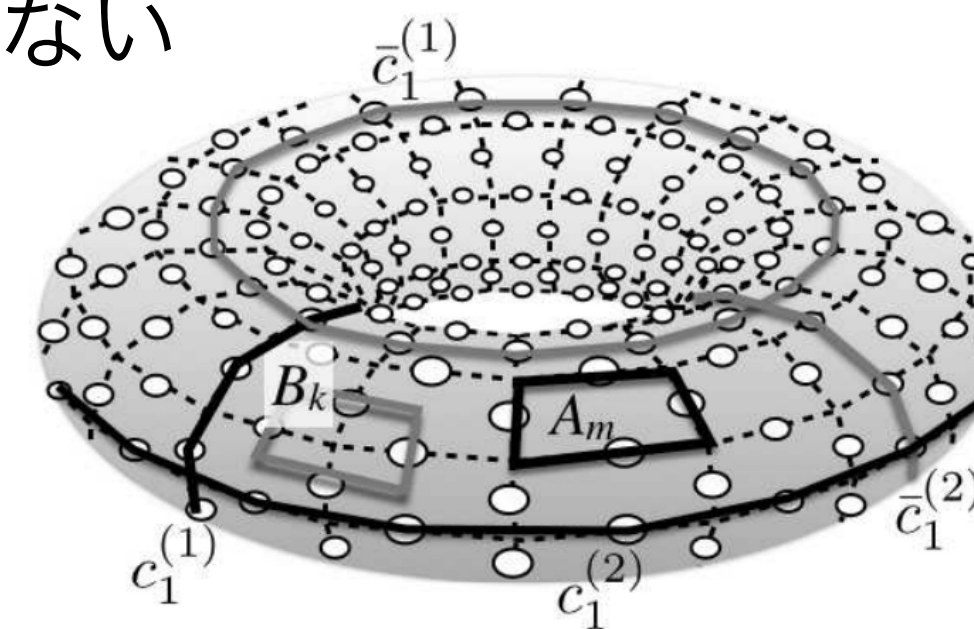
(3) ソフト：量子誤り訂正符号の活用

- ・量子情報を冗長化。局所的な測定/散逸からは情報を得られない

例：Toric符号・表面符号 Kitaev ('01)

「ドーナツのトポロジー」による符号空間の構成

- ・符号距離 d に対して指数的なエラー削減



誤り耐性量子計算に向けて

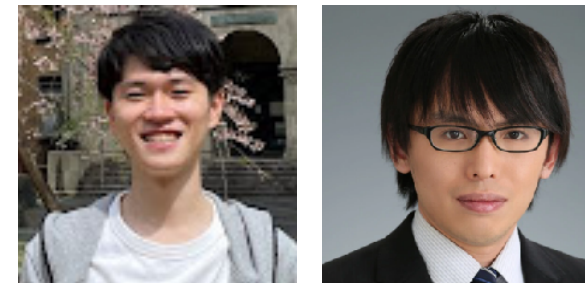
量子誤り抑制 / NISQ*

古典事後処理による対応

*Noisy Intermediate-Scale Quantum device

- ・ 測定コスト = $O(\exp((\#qubit) \cdot (\#depth)))$

Tsubouchi*, Sagawa, **NY***, PRL ('23)



- ・ 実装可能なアルゴリズムは $O(\log(N))$ 深さまで
 - 計算量のオーダー改善は難しい。
- NISQによる量子優位性は限られそう。

量子誤り訂正 / FTQC**

符号化 + 測定FBによる冷却効果

**Fault-tolerant Quantum Computing

- ・ polylogオーバーヘッド
(誤り率が閾値を下回る場合)
- ・ 多項式深さの量子回路を実装可能
 - 量子優位性が示されたアルゴリズムが多数。

今後の研究の中核となる問い

- Q1. 実時間的な観点での優位性はあるか？
- Q2. 量子多体物理の未解決問題にチャレンジできるか？
- Q3. 新たな量子情報理論・量子物性の舞台？

量子誤り訂正

符号化 = 情報にデジタルなデータを割り当てること

符号化によって守りたいHilbert spaceを符号空間などと呼ぶ

001 → 0111001010

$$Z_L = ZZIIZZIIZ$$

000 → 1010101111

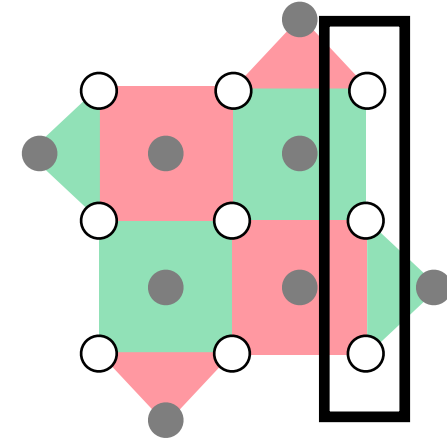
$$X_L = XXIIXXIIX$$

...

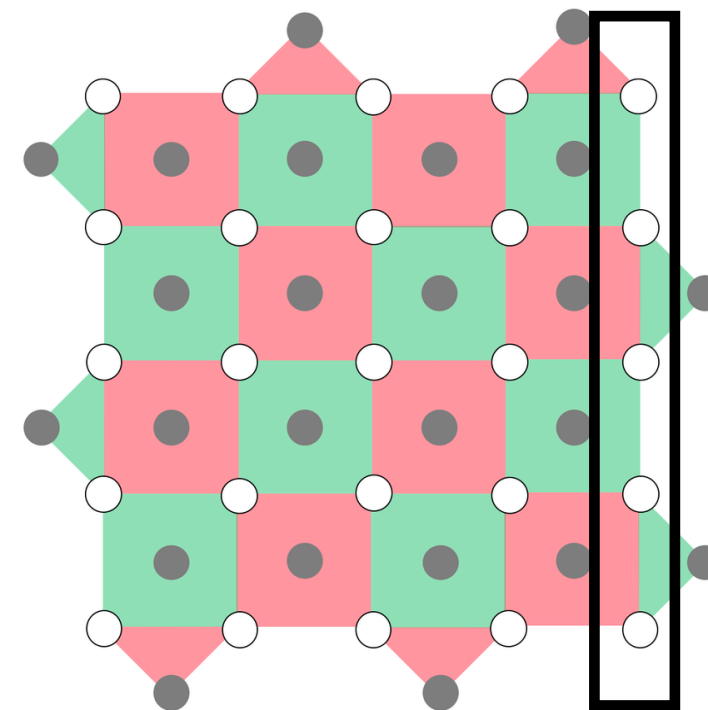
...

符号距離 = 論理操作(エンコードされた情報を変える)で最低限触るべきビットの数

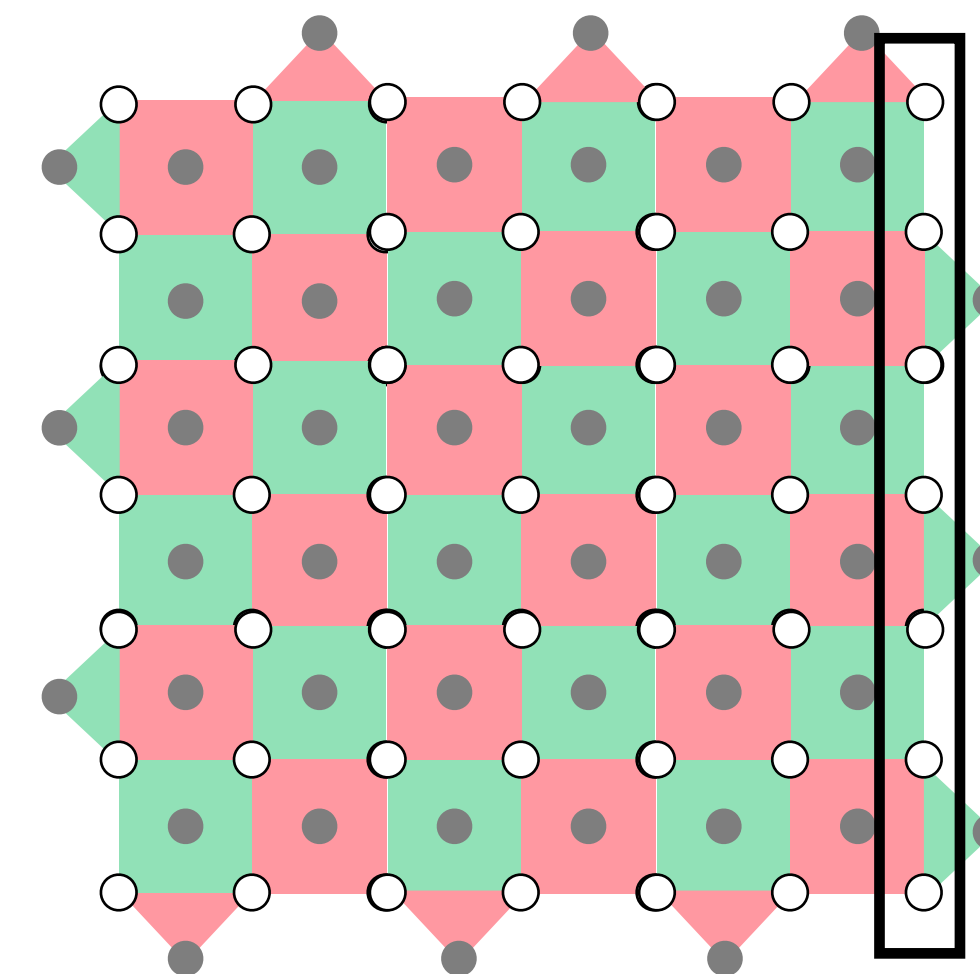
$d = 3$



$d = 5$



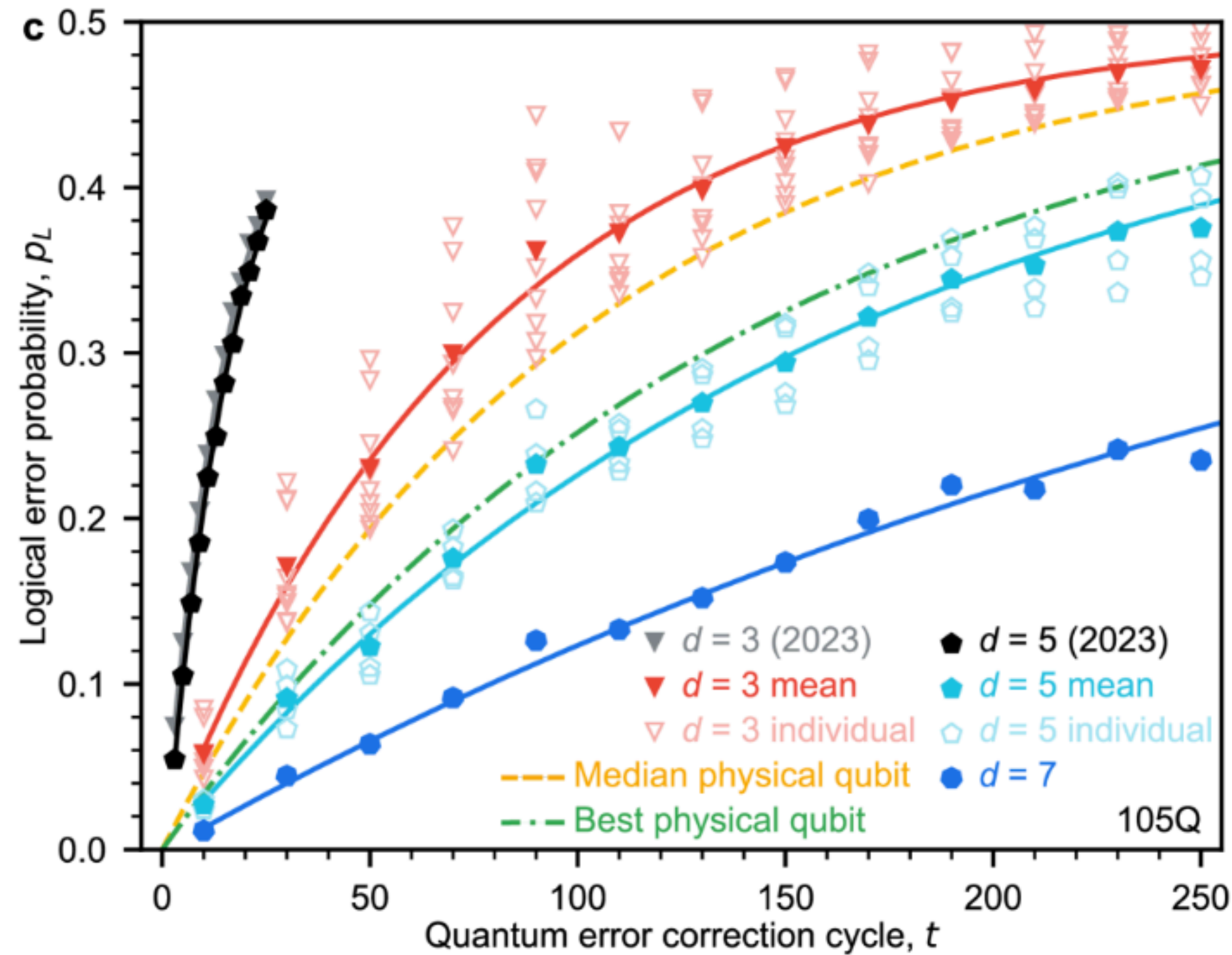
$d = 7$



表面符号における閾値の達成

Google 2024 : $d = 3, 5, 7$ と増やすと論理誤り率が $1/2$ ずつ減少

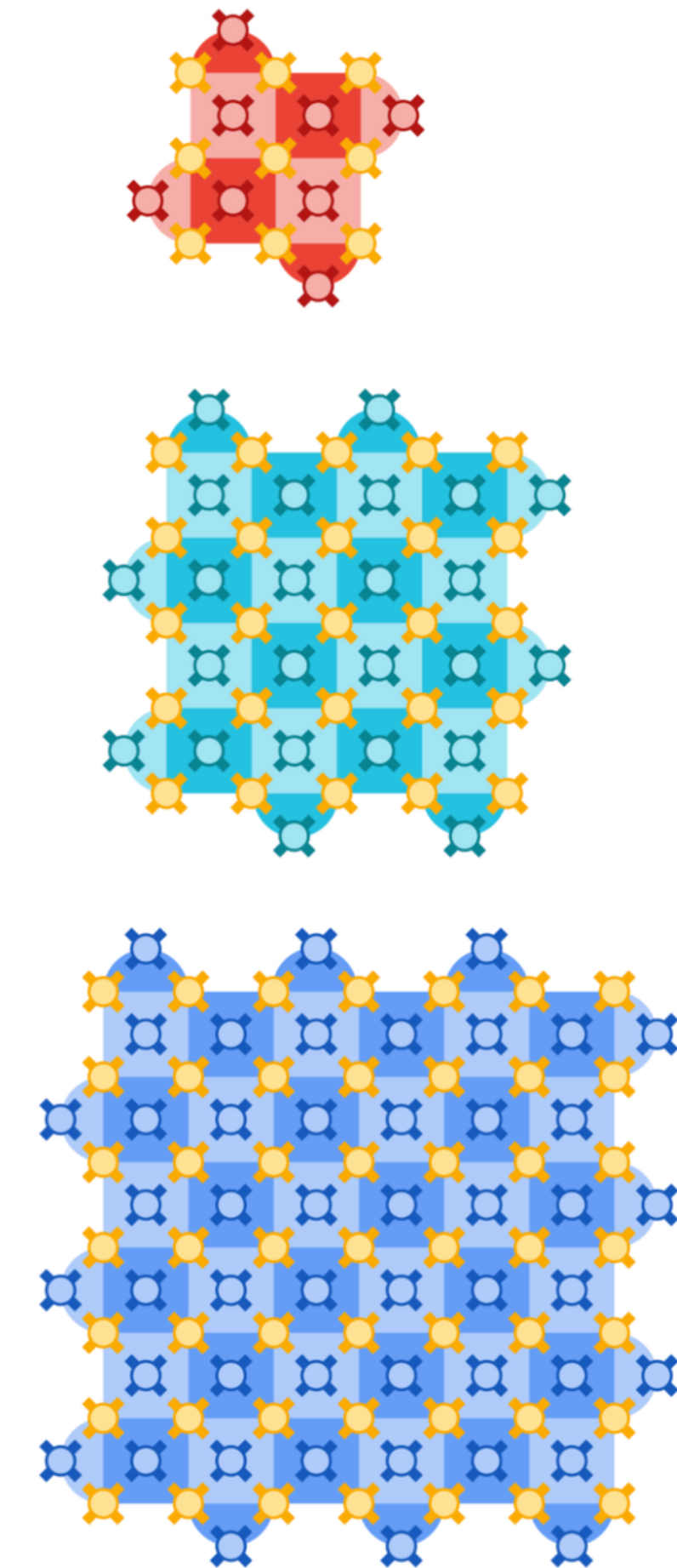
→ エラー訂正の原理を実証



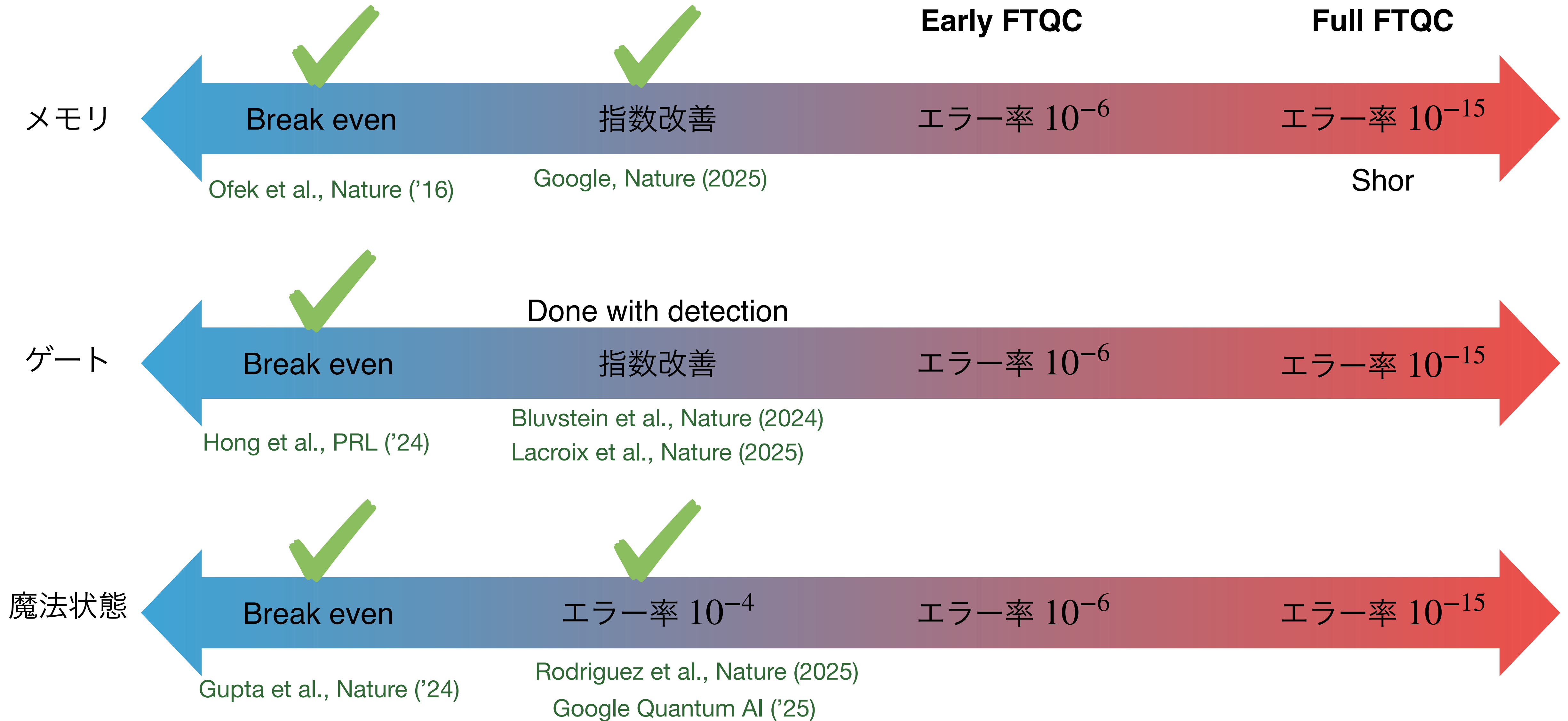
$d = 3$

$d = 5$

$d = 7$



単一論理量子ビットレベルの開発状況

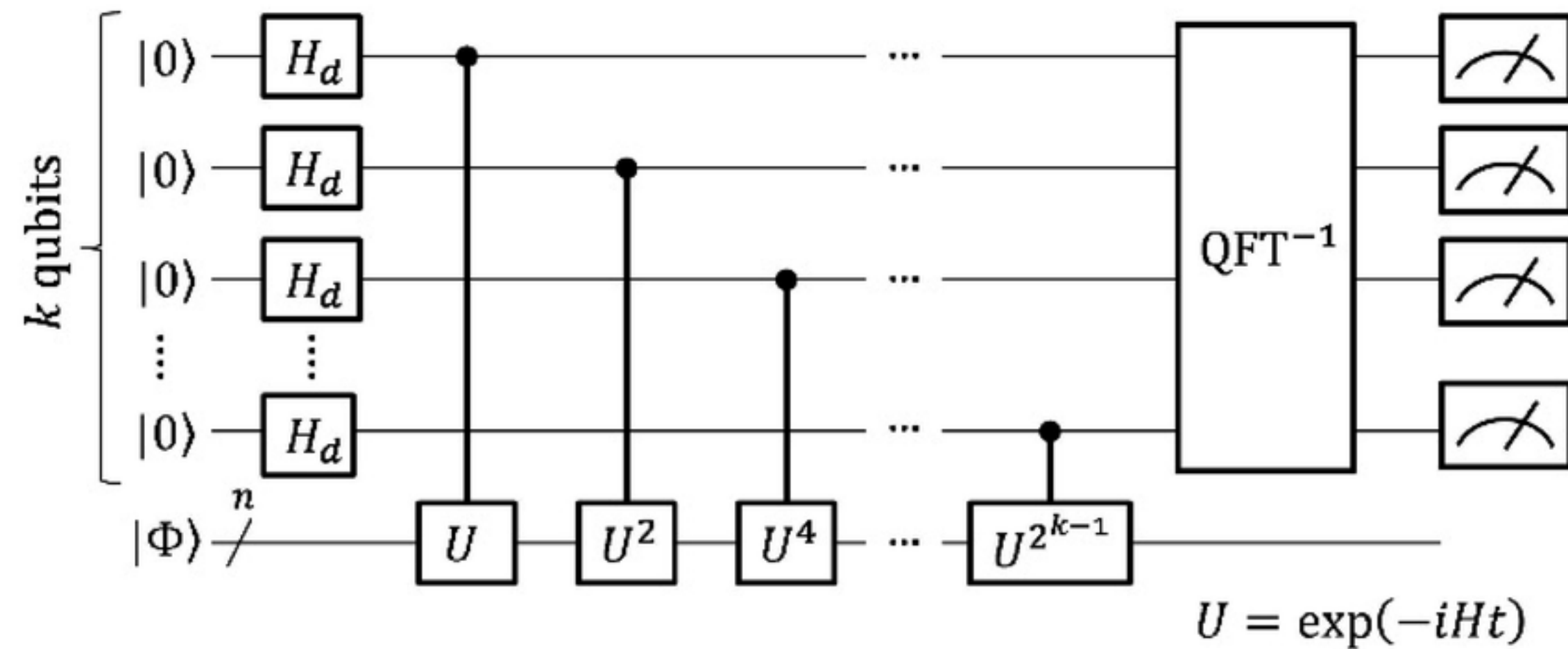


表面符号における論理量子ビット数

将来的にどの程度必要なのか？

計算中、たかだか0.1個程度のエラーを許すようにしたい。

100量子ビットのハミルトニアンで位相推定アルゴリズムを考えてみる。



演算回数 \approx (繰り返し回数) * (Uあたりの演算回数)

$$= 10^4 * 10^6 = 10^{10}$$

表面符号における論理量子ビット数

将来的にどの程度必要なのか？

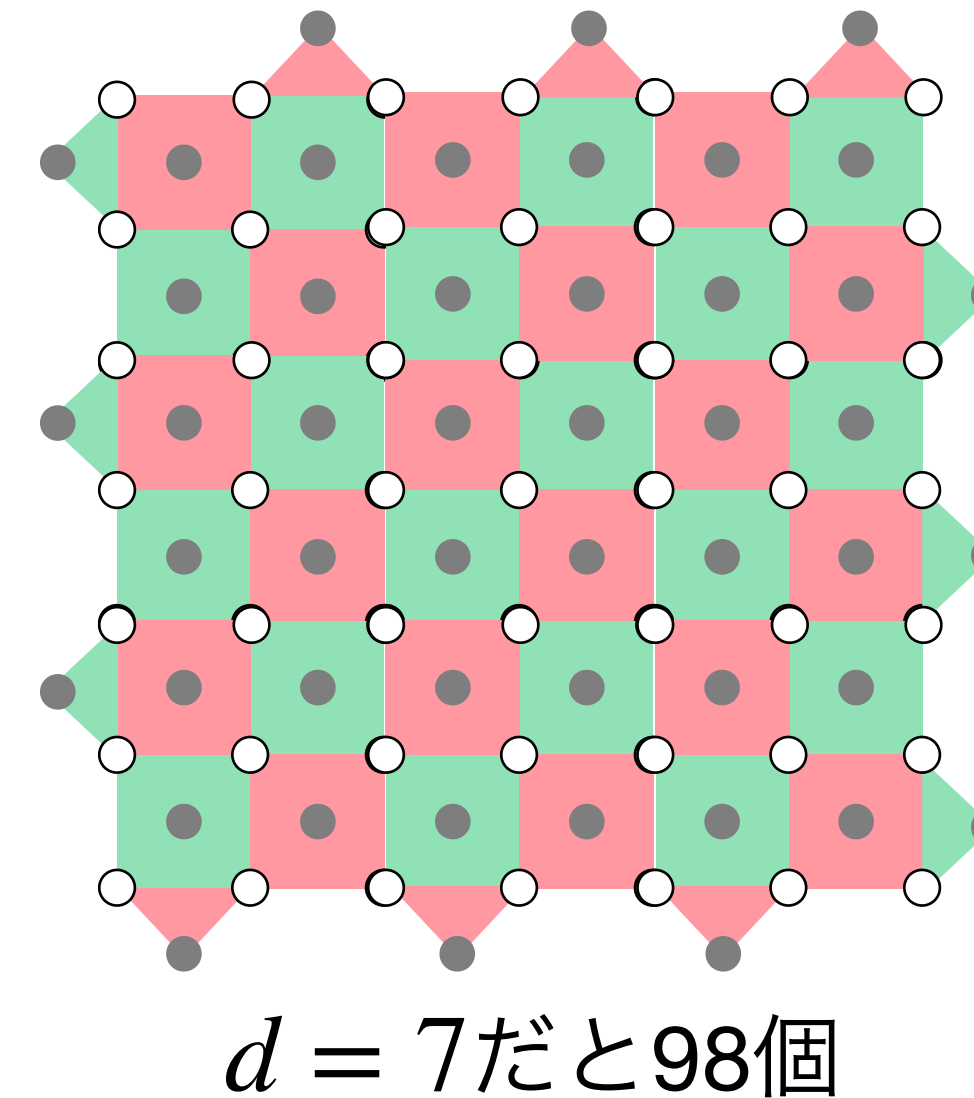
論理エラーの表式 (表面符号) $p_{\text{err}} = 0.1 \left(\frac{p_{\text{phys}}}{p_{\text{thres}}} \right)^{\frac{d+1}{2}}$ $\rightarrow (p_{\text{phys}}/p_{\text{thres}}) = 10^{-1}$ なら $d = 21$
 $(p_{\text{phys}}/p_{\text{thres}}) = 10^{-2}$ なら $d = 11$

表面符号にはそれぞれ $2d^2$ 個の量子ビットが使われている

→ $d = 21, 11$ だと 900, 250個程度

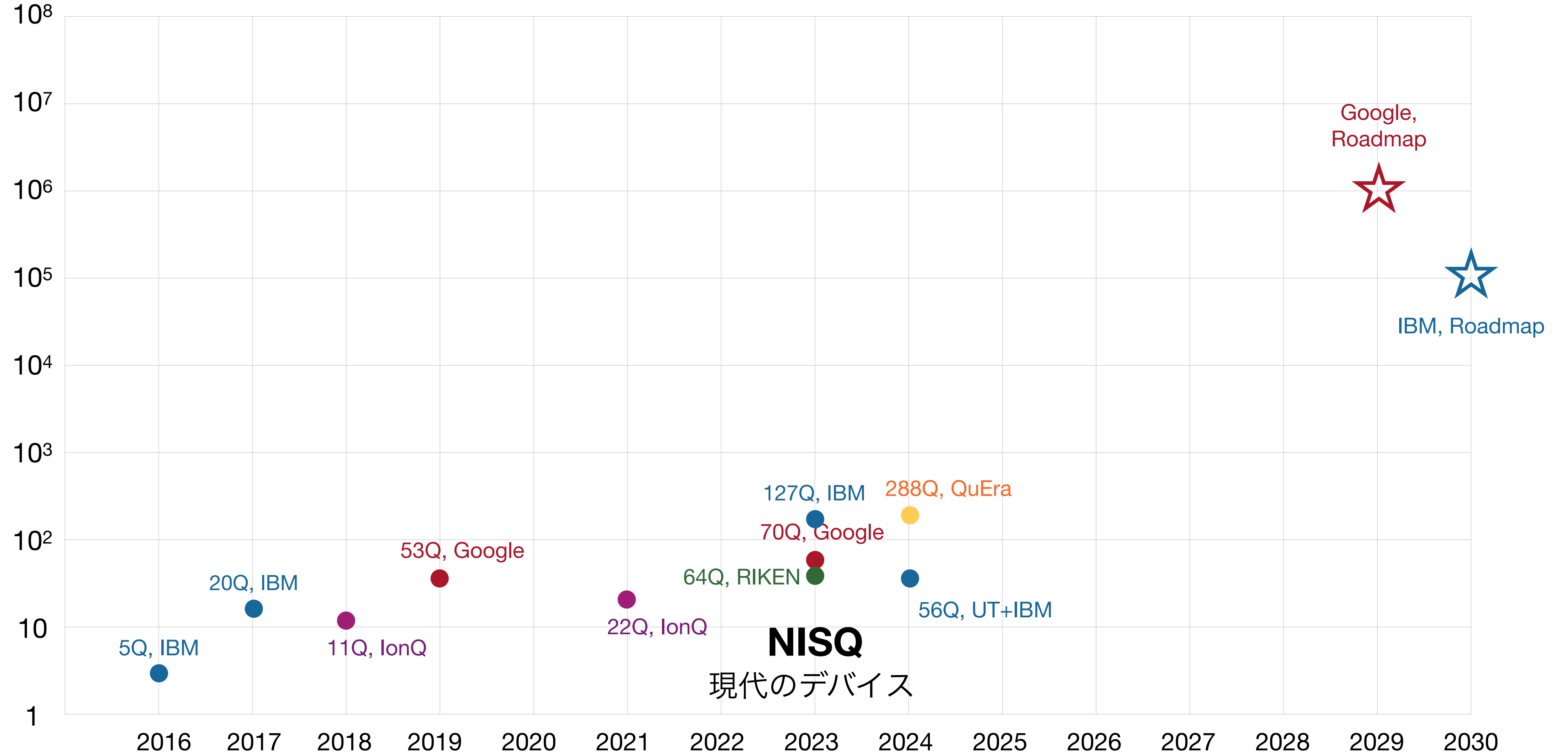
→ 100論理量子ビットの量子計算では合計で9万, 2.5万程度。

演算用の補助メモリを含めると20万, 5万程度



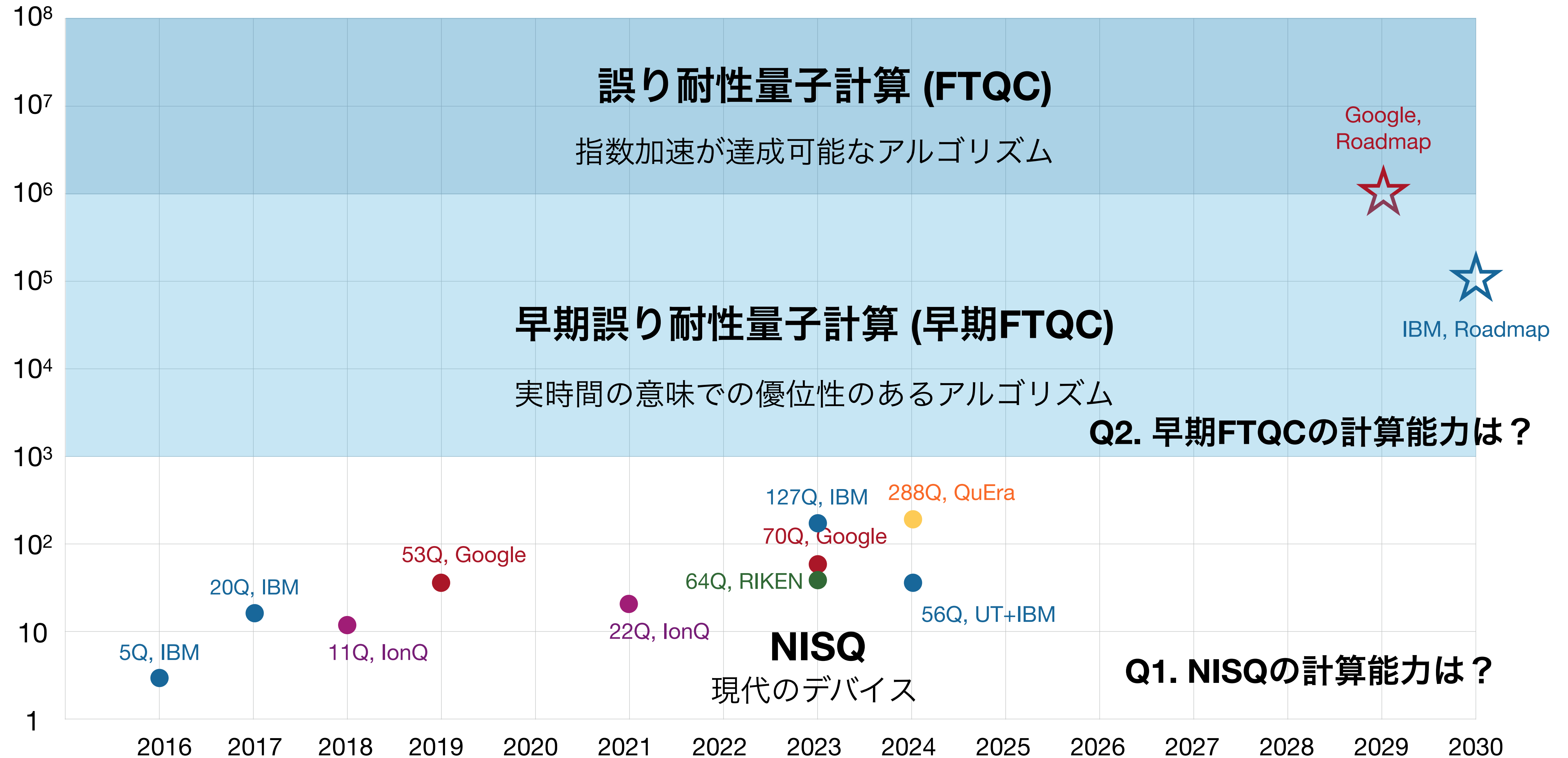
現代の開発状況

量子ビット数

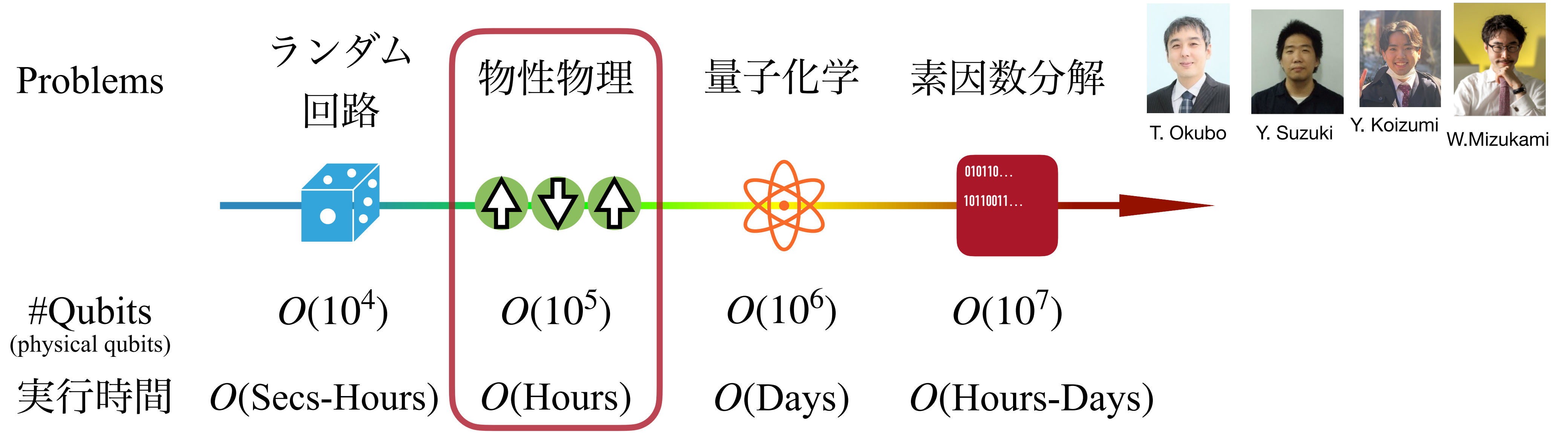


現代の開発状況

量子ビット数



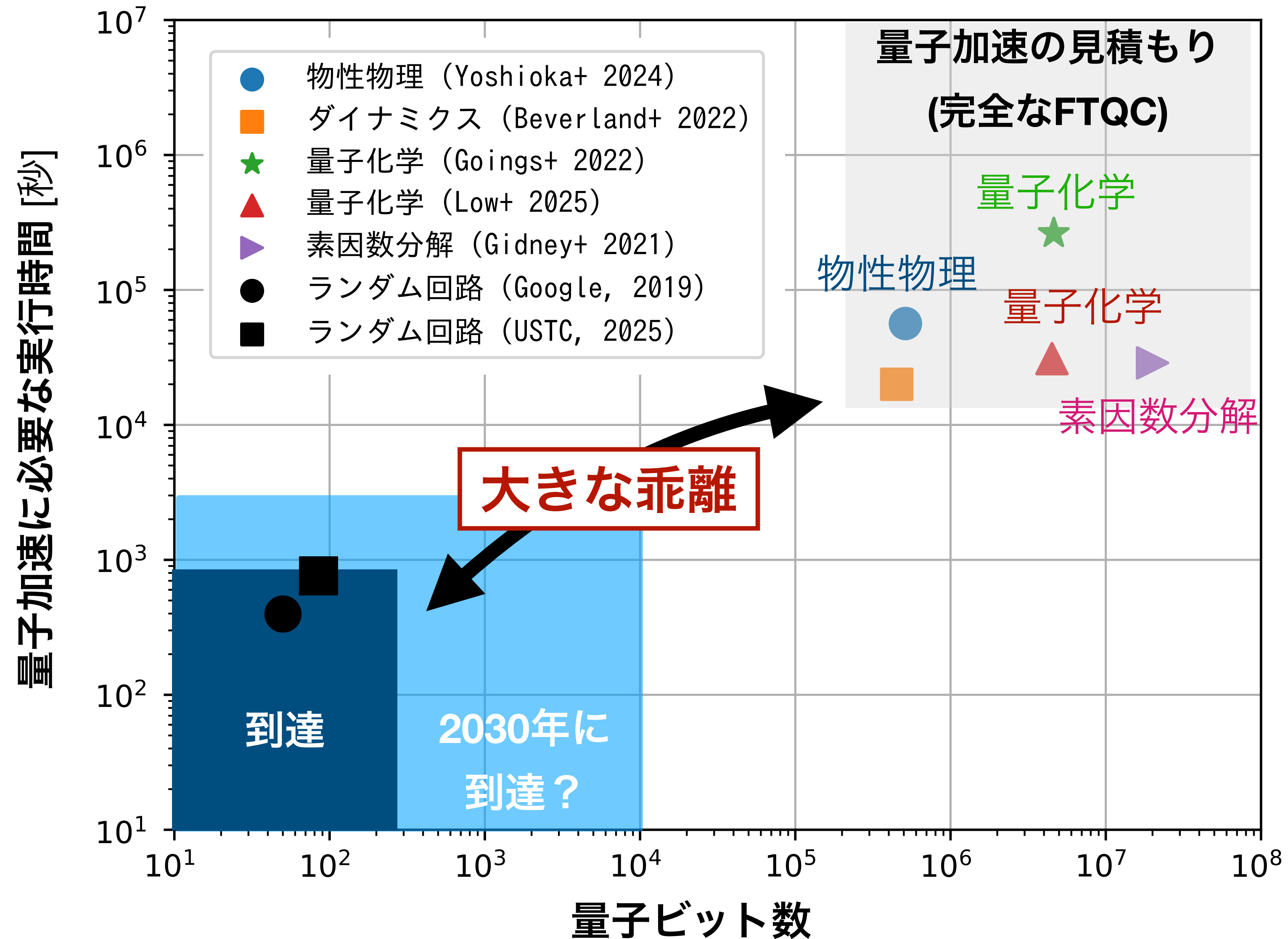
出口戦略 in many-body physics



NY et al., npj Quantum Information 10, 45 (2024)

- 物性と量子化学では基底状態エネルギーのシミュレーション。
 - 物性 : 2d J1-J2 Heisenberg, 2d Fermi-Hubbard、正方格子
 - 量子化学 : FeMoco, P450

誤り耐性量子計算に必要なリソース

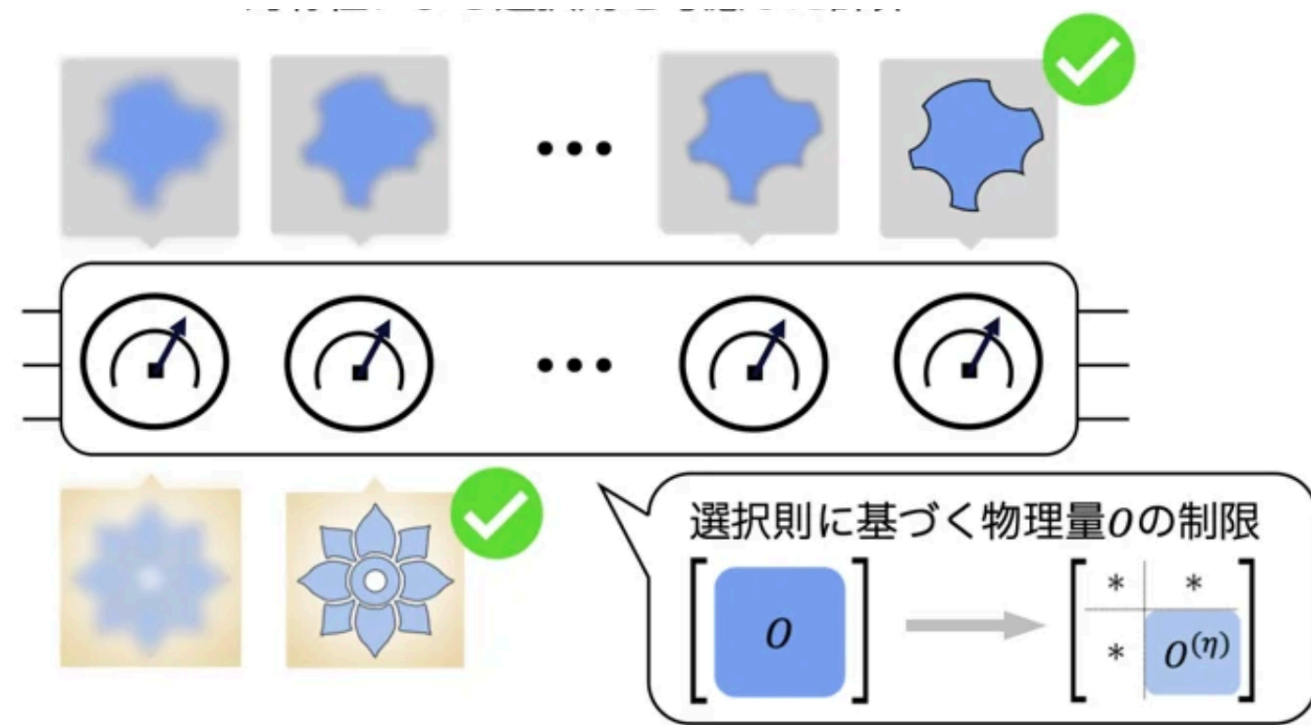


なぜ量子計算に取り組むか？

1. 量子計算でこそ効率的に解ける問題があるから
2. 多様な分野の総力戦でチャレンジングな問題だから
3. **量子デバイスそのものが新しい物理の舞台だから**

- ・ 対称性と量子推定 Koizumi, ..., [NY](#), PRL (2026)
Koizumi, ..., [NY](#), PRA (2026)

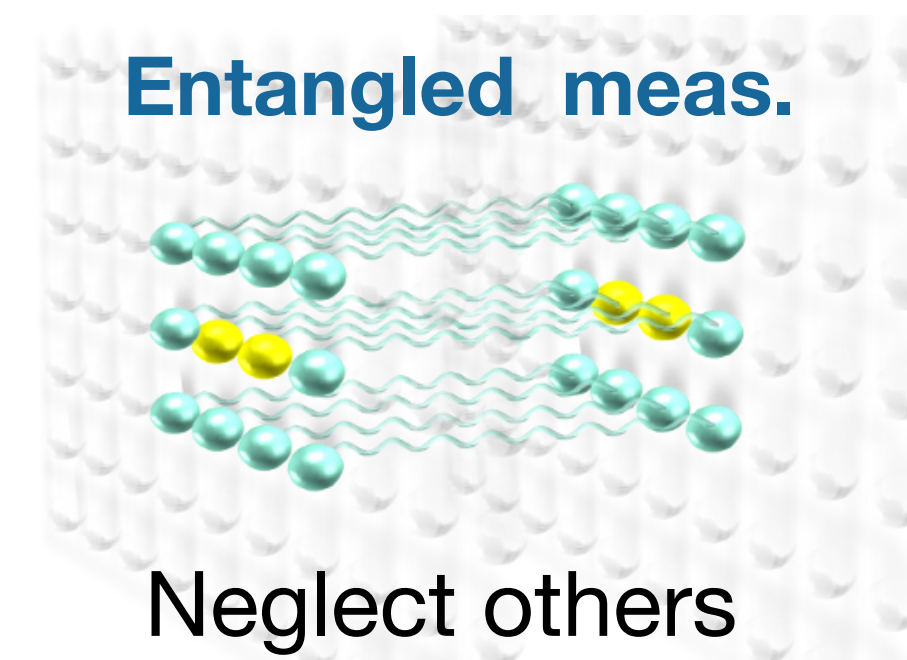
対称性活用による推定の超二乗加速の達成



- ・ 幾何学的な局所性の活用

Gibbs状態の物理量推定コストを指数改善

Hakoshima*, ..., [NY](#)*, PRL (2024)



Expectation values of LVP:

$$\frac{\text{Tr}_{A+B} \left[(\rho^{(A+B)})^n O_A \right]}{\text{Tr}_{A+B} \left[(\rho^{(A+B)})^n \right]}$$

$\rho^{(A+B)}$: reduced density operator on A and B



D1 小泉



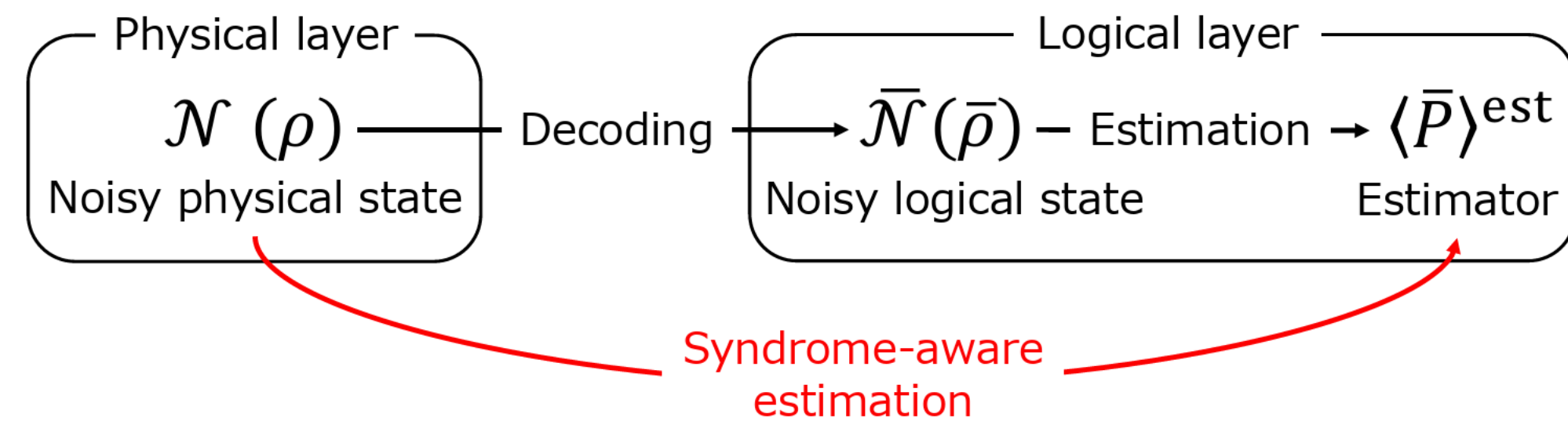
特任助教 和田

ノイズの理解と制御

量子ノイズ対抗の総力戦

Tsubouchi, ..., [NY](#), arXiv:2603.05145 [QEC 2026]

シンドローム測定に基づく古典 / 量子推定
量子戦略の指数的な優位性を証明



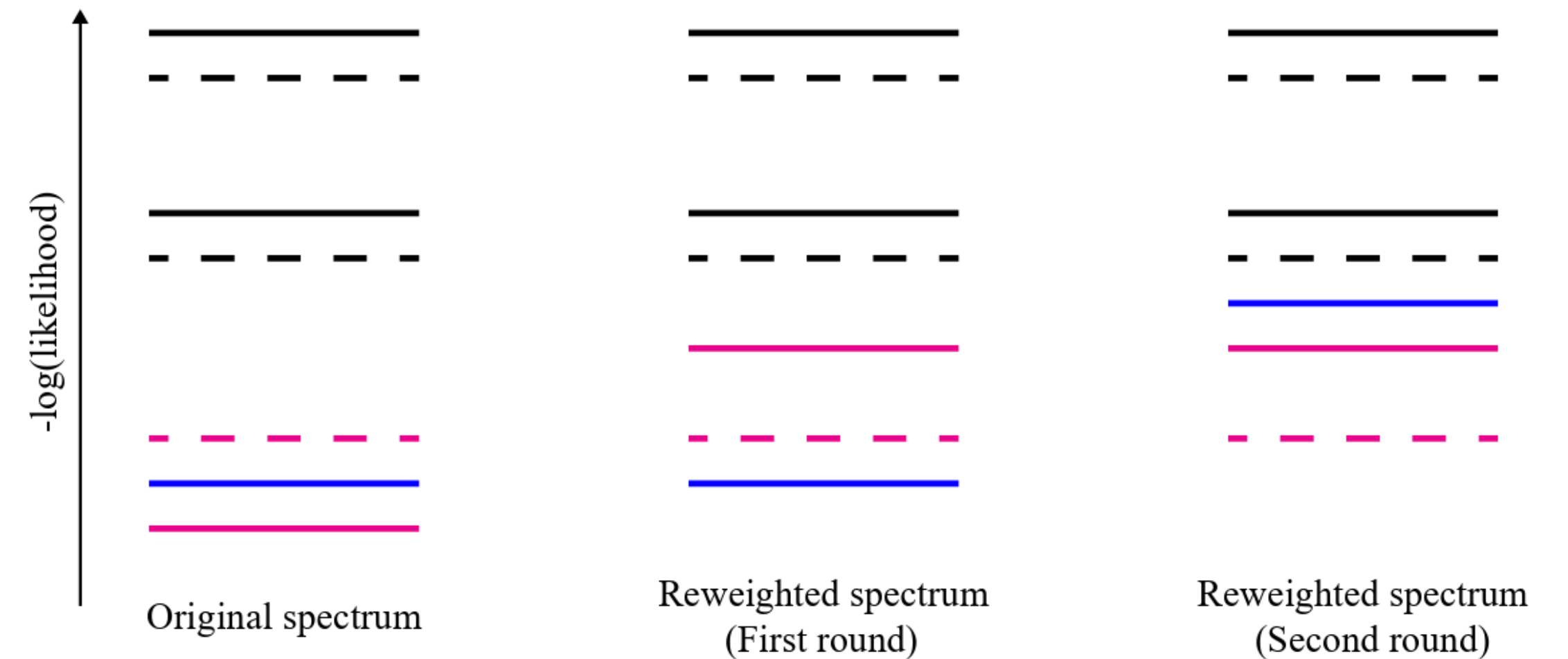
D3 坪内



量子誤り耐性計算のpostselection

Xie, [NY](#), Tsubouchi, Li arXiv:2601.17757

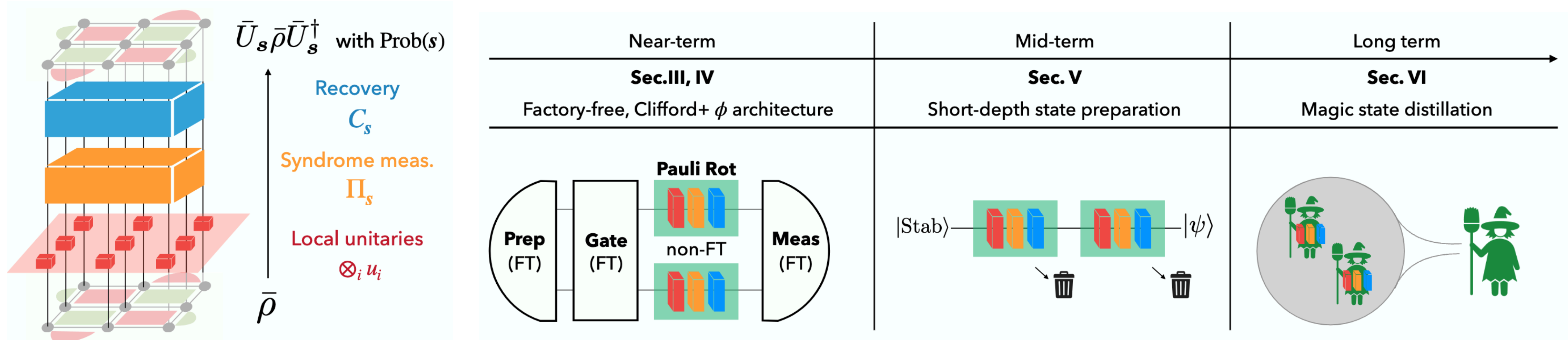
decoder-agnosticかつ効率的なpostselection
[[144, 12, 12]]符号：1%棄却、精度を100倍向上



量子推定・量子情報 x 量子物理

アーキテクチャ提案 [NY, Seif, Cross, Javadi-Abhari, arXiv:2510.08290](#)

部分的な誤り耐性のみだがfactory-freeかつaddressableなnon-Clifford gateの実装法を提案



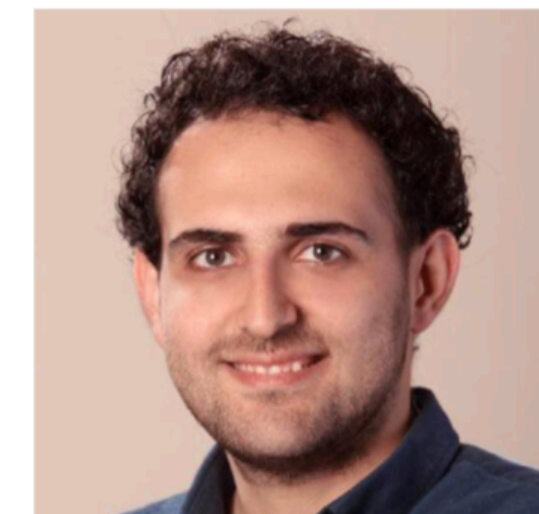
表面符号・qLDPC符号など任意のCSS符号に適用可能



Alireza Seif

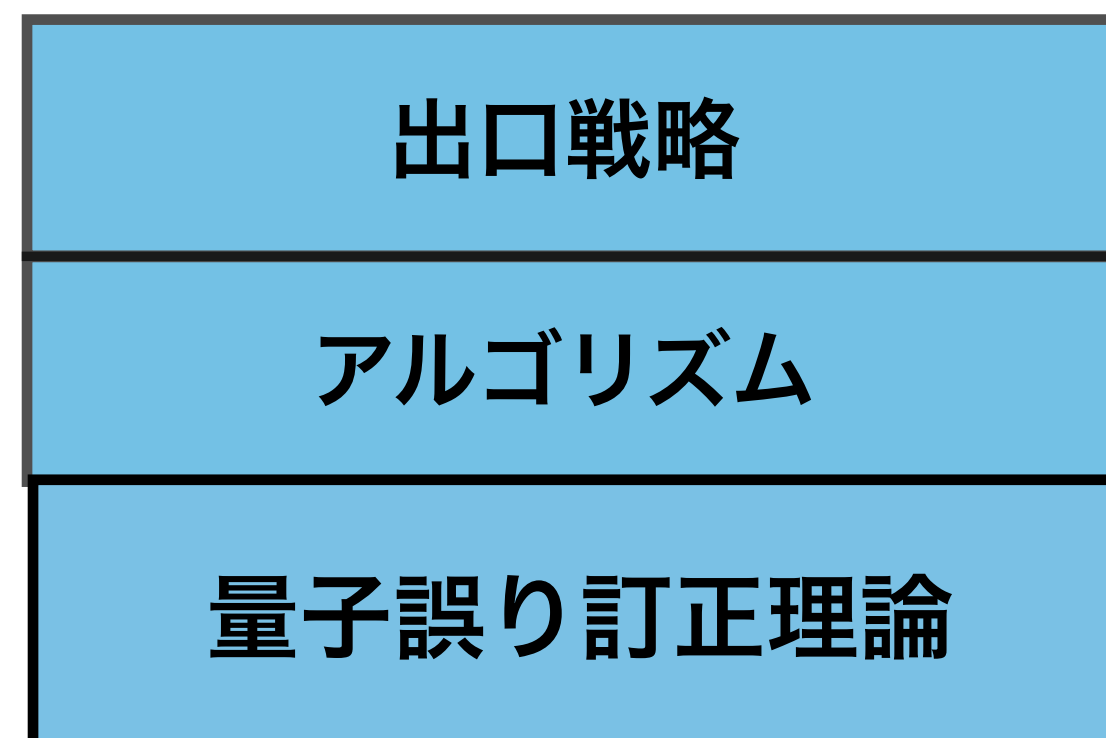
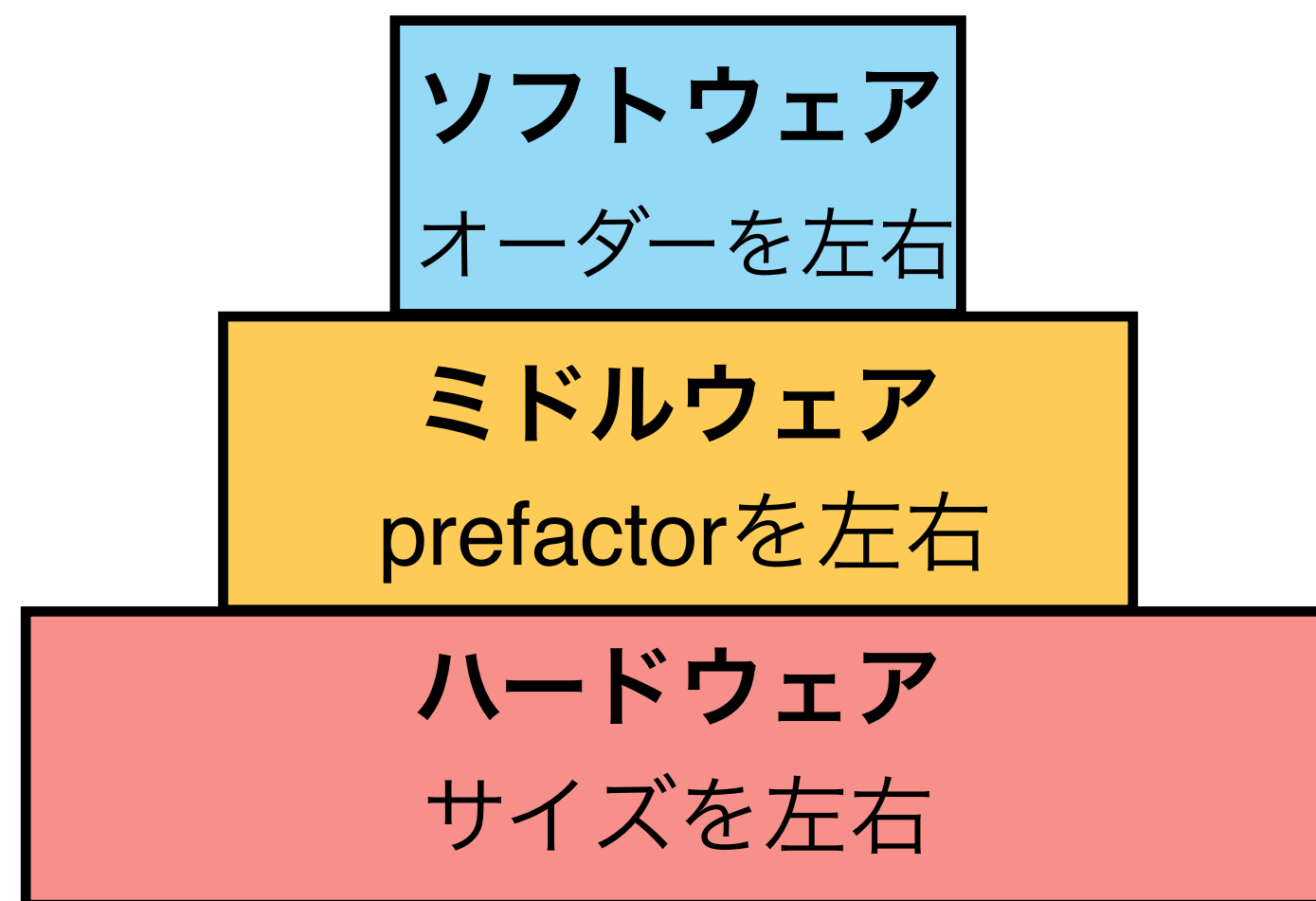


Andrew Cross



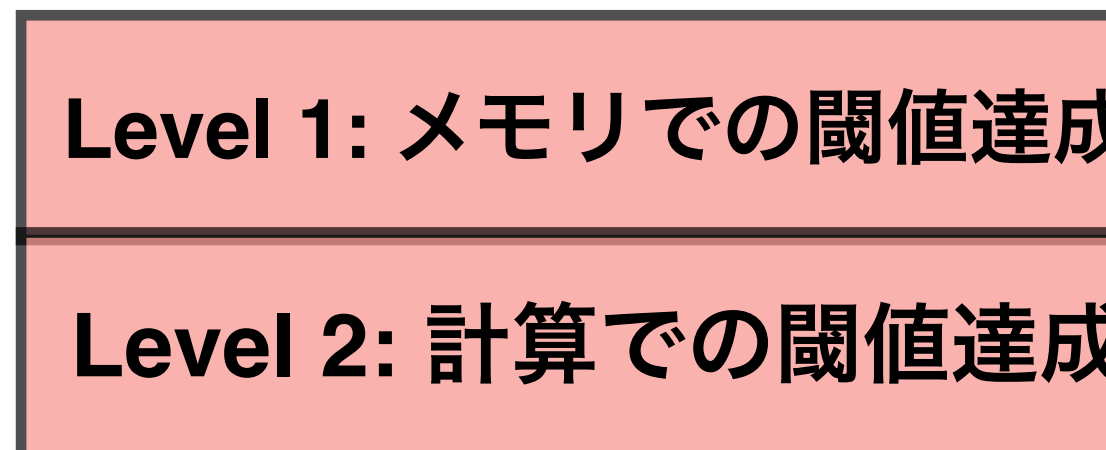
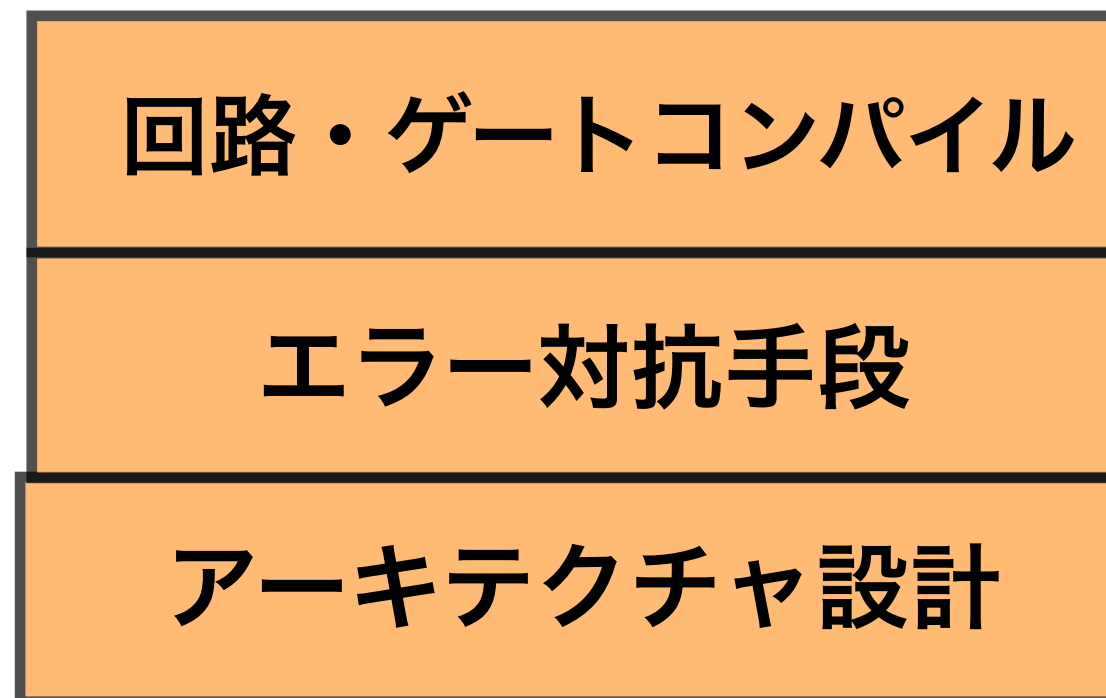
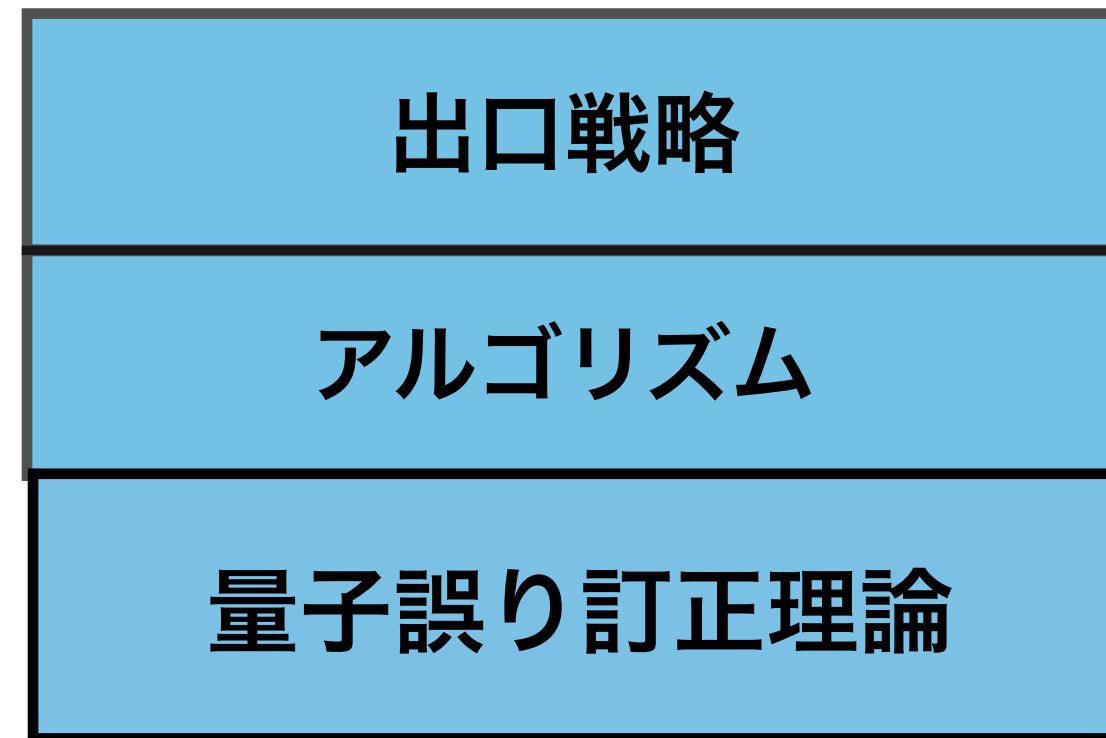
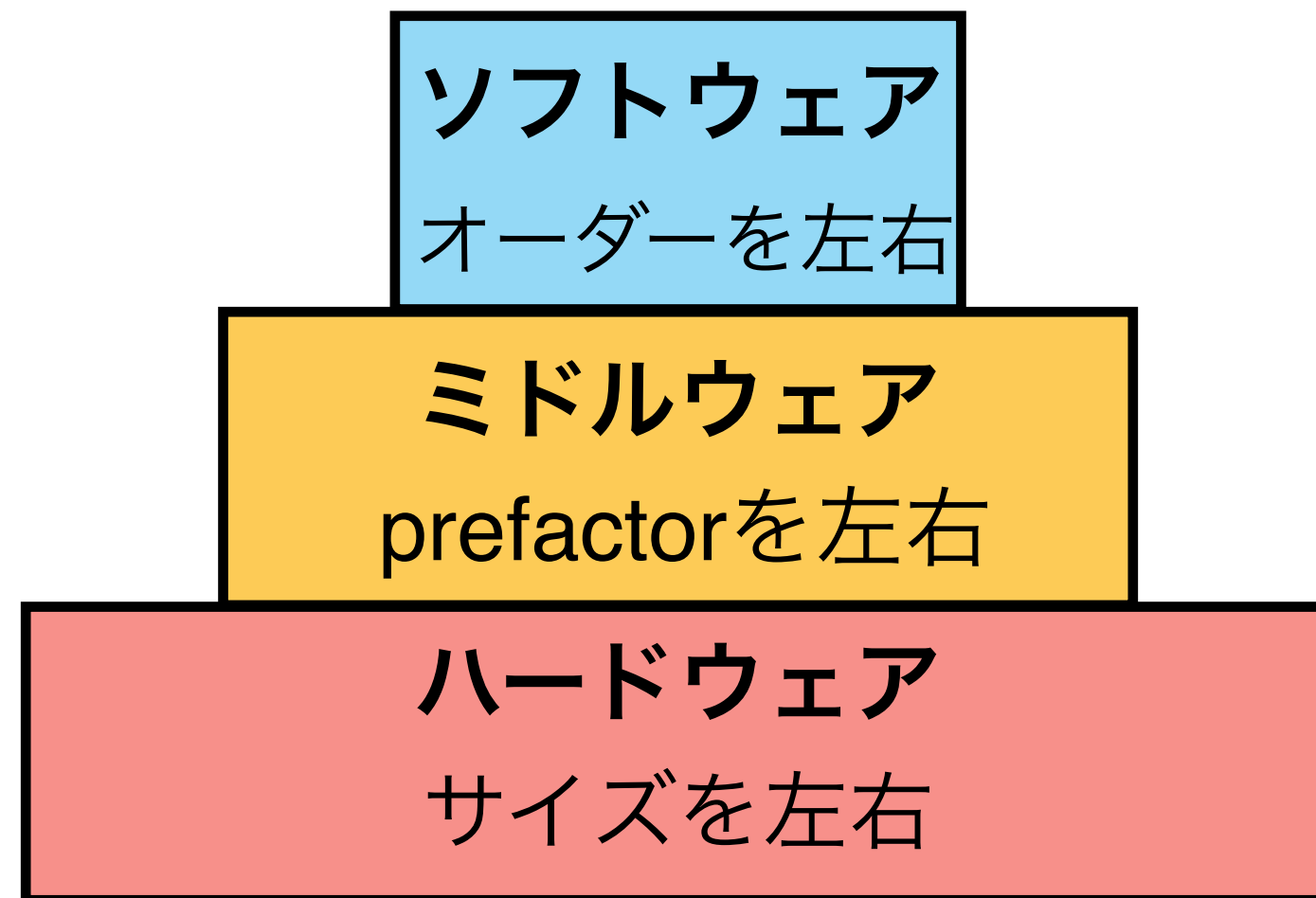
Ali Javadi-Abhari

誤り耐性量子計算に向けて



- ✓ 実用的かつ量子優位な問題設定の特定
- 量子優位性の計算量下限
- 最適な物理量測定的设计
- 論理操作の一般論

誤り耐性量子計算に向けて



✓ 実用的かつ量子優位な問題設定の特定

量子優位性の計算量下限
 最適な物理量測定的设计

論理操作の一般論

回路デザイン・量子ビット配置

✓ 魔法状態の高精度生成

ノイズの特徴づけ

論理量子ビットの配置方法



✓ 魔法状態の生成を実現

超伝導量子ビット: 歩留問題

中性原子: 実時間のクロック

吉岡研究室と共同研究者

