

ムーンショット目標6

オンライン開催・参加費無料

第2回

ミニシンポジウム

量子誤り訂正最前線

～FTQCにどれくらい近づいたのか？どれくらい遠いのか？～

2025年1月30日(木) 13:30～16:30



科学技術振興機構 ムーンショット目標6 構想ディレクター

大阪大学 量子情報・量子生命研究センター センター長

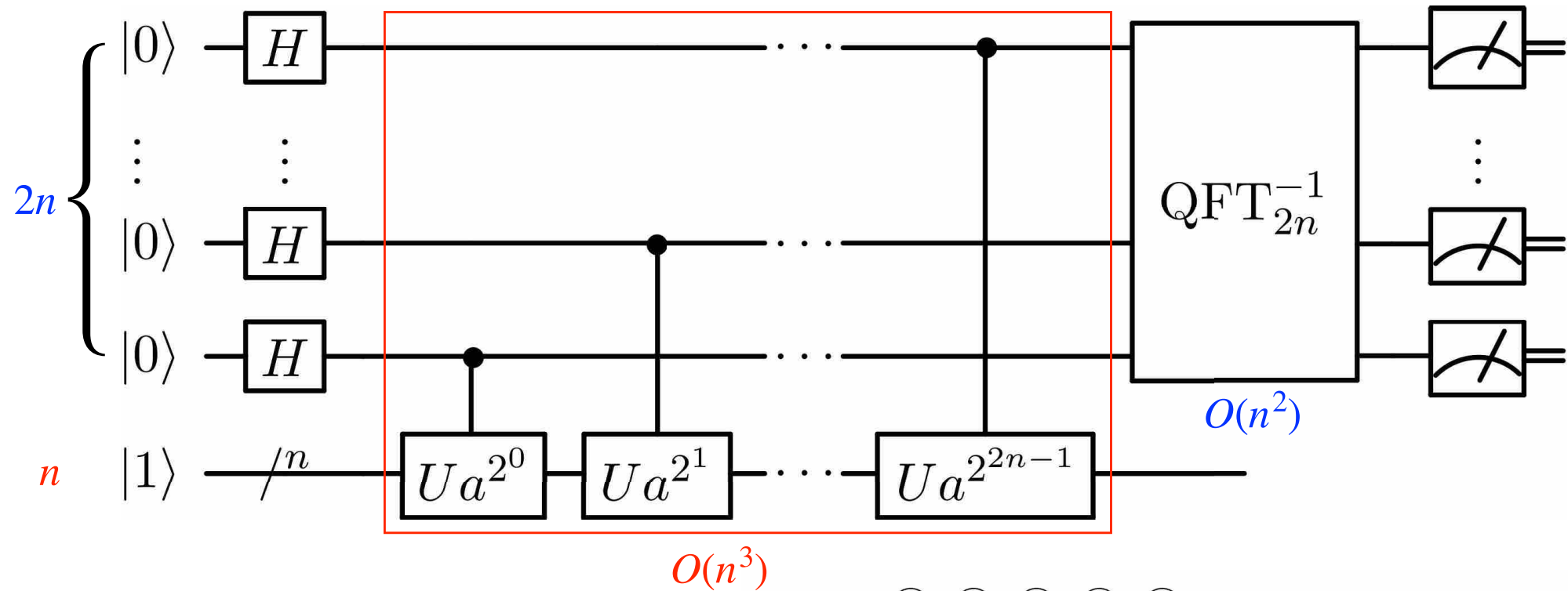
北川 勝浩

開催趣旨

- なぜ誤り耐性量子コンピュータFTQCなのか？
- 世界的動向
- どれくらい難しいのか？

Shorの量子アルゴリズム

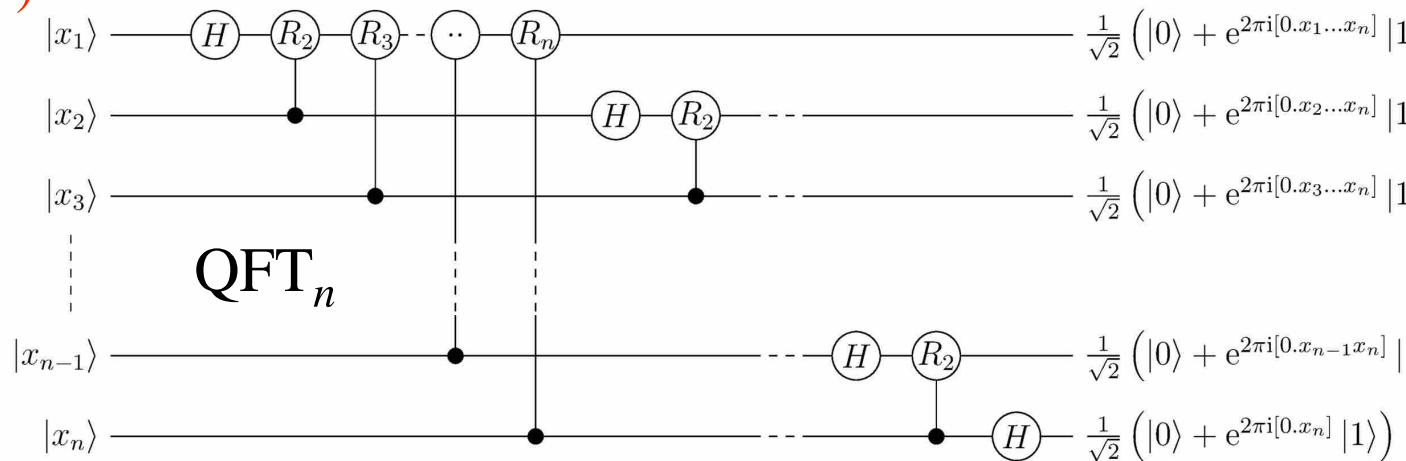
n bitの整数の素因数分解



2048 bitの素因数分解

$3n \approx 6k$ qubits

$O(n^3) \approx 8G$ gates

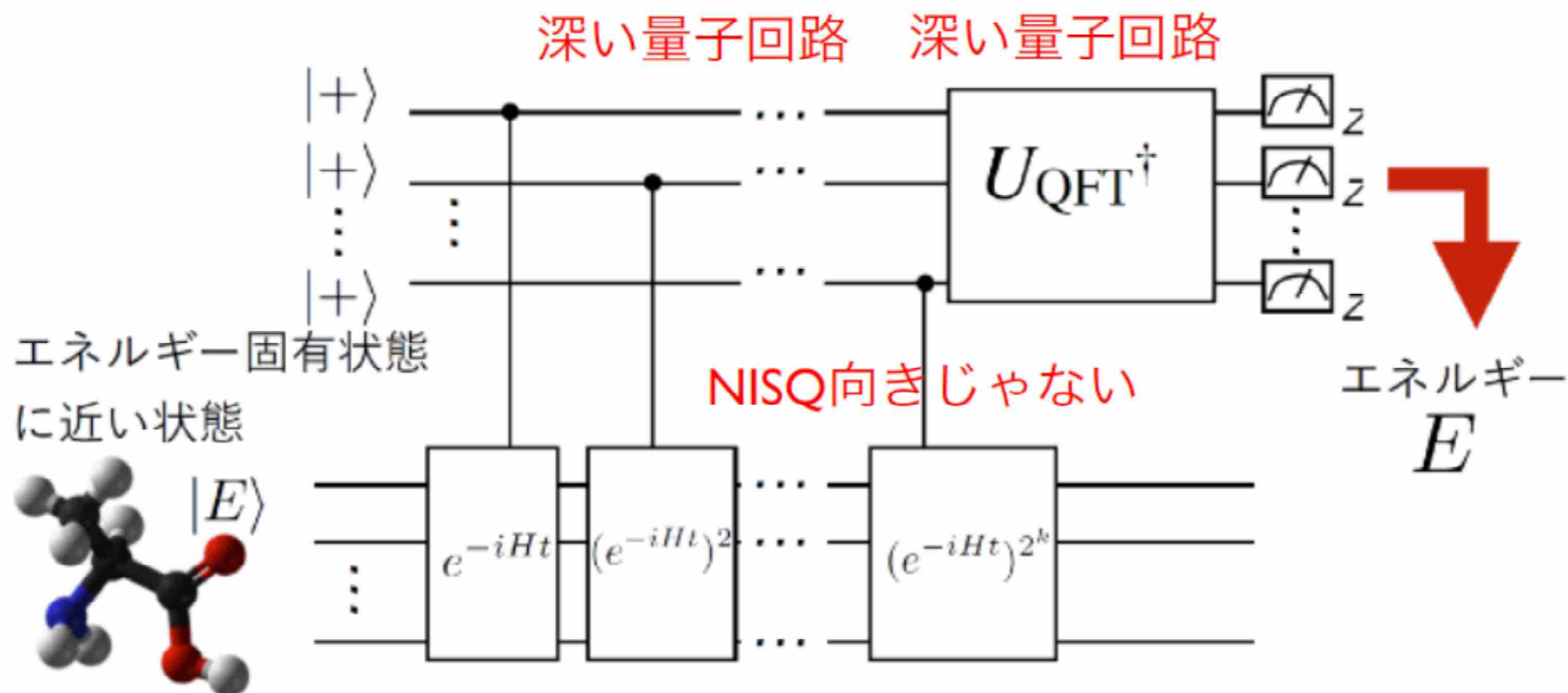


量子位相推定法による 量子化学計算

A Aspuru-Guzik et al., Science **309**, 1704 (2005)

B P Lanyon et al., Nature Chemistry, **2**, 106 (2010)

分子の複雑な量子状態を
量子コンピュータで再現
素因数分解と似た方法で
エネルギーを正確に計算



Hartree-Fock近似、配置間相互作用法(configuration interaction)、結合クラスター法(coupled cluster), etc...

本格的な量子化学計算に必要な量子ビット数 n_L 、量子ゲート数 g_L

例1: 根粒菌のニトロゲナーゼによる窒素固定の量子化学計算には
約2,000論理量子ビットの誤り耐性型量子コンピュータが必要
($n_L=2,024$, $g_L \approx 6 \times 10^{16}$)

M. Reiher (ETH Zurich), N. Wiebe, K.M. Svore, and M. Troyer (Microsoft Research)
Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 114 (29) 7555–7560, 2017
“Elucidating reaction mechanisms on quantum computers”
<https://doi.org/10.1073/pnas.1619152114>

例2: ニトロゲナーゼの補因子FeMocoの精密量子化学計算には、
約2,000論理量子ビットの誤り耐性型量子コンピュータが必要
($n_L=2,142$, $g_L \approx 5.3 \times 10^9$)

J. Lee (Columbia Univ.), D.W. Berry (Macquarie Univ.)
N. Wiebe (Univ. Washington, Pacific Northwest National Lab.)
C. Gidney, W.J. Huggins, J.R. McClean, R. Babbush (Google Quantum AI)
PRX Quantum 2, 030305, 2021
“Even More Efficient Quantum Computations of Chemistry Through Tensor Hypercontraction”
<https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.030305>

量子ビット数 n 、ゲート数 g 、誤り率 p の関係

・現状ベスト 量子ビット数 $n \approx 100$, 誤り率 $p \approx 0.001$ (0.1%)

・計算の成功確率 (全ての演算が成功する確率)

$g = 1000$ $(1 - p)^g = 0.999^g = 0.367...$ 有意な確率37%で成功

$g = 10000$ $(1 - p)^g = 0.999^g = 0.000045...$ 無理

$p \leq 1/g$ でないと有意な確率で成功しない

量子ビット、量子ゲートの
物理的な改善だけでは埋められない

誤り率のギャップ



・アプリケーションからの要求

・2048ビットの因数分解

・ $n = 6k$, $g \approx 8G$, $p \approx 10^{-10} \leq 1/g$

・FeMoCoの精密量子化学計算

・ $n = 2k$, $g \approx 5.3 \times 10^9$, $p \approx 10^{-10} \leq 1/g$

量子誤り訂正 QEC

誤り耐性量子計算 FTQC

開催趣旨

- なぜ誤り耐性量子コンピュータなのか？
- 世界的動向
- どれくらい難しいのか？

2023-25年の世界動向

- 量子誤り訂正のスケーリング実証 (Google)
- ボソニックコードによるブレイクイーブン達成 (米中)
- 表面符号よりも効率の良い量子誤り訂正符号 (IBM)
- 中性原子量子ビットによる数十論理量子ビット実験 (QuEra)
- 表面符号によるブレイクイーブン達成 (Google)
- 100論理量子ビット万能FTQCロードマップ (Quantinuum)
- 魔法状態培養(Magic State Cultivation)理論 (Google)
- 魔法状態蒸留実験 (QuEra)

開催趣旨

- なぜ誤り耐性量子コンピュータFTQCなのか？
- 世界的動向
- どれくらい難しいのか？

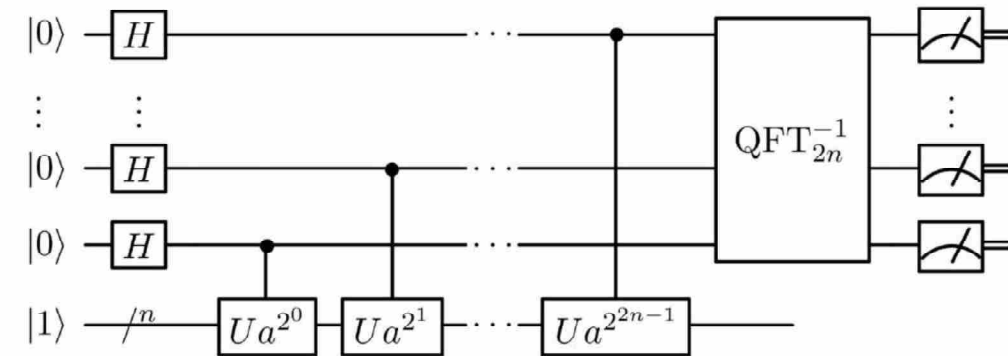
論理量子ビット数 n_L 、ゲート数 g_L 、論理誤り率 $P_L < 1/g_L$

- 2048ビットの因数分解

- $n_L = 6k$, $g_L \approx 8G$, $P_L \approx 10^{-10}$

- FeMoCoの精密量子化学計算

- $n_L = 2k$, $g_L \approx 5.3 \times 10^9$, $P_L \approx 10^{-10}$



$P_L = 10^{-10}$ を実現するには？

物理量子ビットは質（誤り率）も量（ビット数）もまだまだ必要

• $p = 10^{-3}$ (0.1%) の場合

• $d = 15$, $2d^2 - 1 = 449$ 物理量子ビット

• 2k論理量子ビットは、1M物理量子ビット
100万

• $p = 10^{-4}$ (0.01%) の場合

• $d = 7$, $2d^2 - 1 = 97$ 物理量子ビット

• 2k論理量子ビットは、200k物理量子ビット
20万

表面符号

誤り耐性閾値 $p_{th} = 0.01$

符号距離 d

論理誤り率

$$P_L = p_{th} \left(\frac{p}{p_{th}} \right)^{(d+1)/2}$$

1 論理量子ビット当たりの
物理量子ビット数

$$2d^2 - 1$$

ここから、新・未来へ



ムーンショット目標 6

**2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる
誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現**

プログラムディレクター（PD）北川 勝浩

大阪大学 量子情報・量子生命研究センター センター長

ムーンショット目標6 研究開発ポートフォリオ

2020年度採択

2022年度採択



量子ハードウェア



超伝導

山本剛PM
(NEC)

イオン トラップ

高橋PM
(OIST)

光量子

古澤PM
(東大)

半導体 量子ドットアレイ

水野PM
(日立)

半導体 スパースマトリクス

樽茶PM
(理研)

中性原子 2次元アレイ

大森PM
(分子研)

中性原子 ナノファイバー

青木PM
(早大)

量子通信ネットワーク

小坂PM
(横国大)

山本俊PM
(阪大)

永山PM
(慶大)

超伝導と
通信の
連携

分散
QC
連携
光検出器
で連携



福井

量子ビット接続で連携

量子ネットワークシステム技術

誤り耐性

小芦PM
(東大)

小林PM
(工繊大)

量子誤り訂正・誤り耐性理論/ソフトウェア

誤り訂正システム（古典部分）実装

藤井
鈴木
佐野

Wichmann

研究開発体制図： プログラムポートフォリオ

ここから、新・未来へ



MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM

ムーンショット目標6 第2回ミニシンポジウム

量子誤り訂正最前線

～FTQCにどれくらい近づいたのか？

どれくらい遠いのか？～

量子誤り訂正実証実験及び魔法状態蒸留の最前線

藤井 啓祐（大阪大学 量子情報・量子生命研究センター 副センター長）

イオントラップ型での量子誤り訂正: 全結合と条件付き演算がもたらす展望

山本 憲太郎（Quantinuum リードR&Dサイエンティスト）

Chris Langer（Quantinuum フェロー）

ボソニック量子ビットの進展 –その実装とブレイクイーブン達成–

福井 浩介（東京大学 大学院工学系研究科 特任研究員）

FPGAクラスタによるスケーラブルかつリアルタイムのFTQC用

エラーシンドロームデコード実現に向けて

佐野 健太郎（理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー）

Jan Erik Reinhard Wichmann（理化学研究所 計算科学研究センター 特別研究員）

事前質問への回答

パネルディスカッション

モデレータ 北川 勝浩

講演者 + 鈴木 泰成（日本電信電話株式会社 コンピュータ&データサイエンス研究所 准特別研究員）