

ユーティリティー実験 III

2025/10/09

Ayumu Shiraishi



氏名：白石 歩(Ayumu Shiraishi)

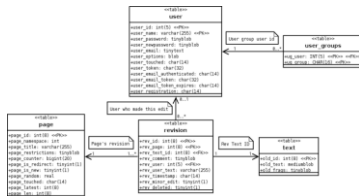
専攻：元理論物理学徒（量子情報理論と宇宙論と一般相対論）

所属：日本アイ・ビー・エム システムズ・エンジニアリング株式会社（ISE）

DX Solution / Data Science Lab

肩書： $\frac{1}{\sqrt{6}}|\text{IT Engineer}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{Senior Data Scientist}\rangle + \frac{1}{\sqrt{6}}|(\text{日本人2人目の})\text{Qiskit Advocate}\rangle + \frac{1}{\sqrt{6}}|\text{静岡大学 客員准教授}\rangle$

実績：IBM Quantum Challenge 2021：15位（1293人中）、同2022：7位（非公式）

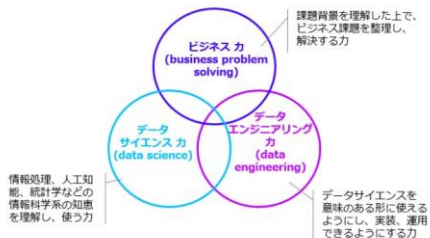


Qiskit



食料は飲料空容器！ ポケモンのベトベッターが次世代リサイクルボックスになった

2023.03.21



Agenda

1. GHZ状態とは
 - なぜ巨大なGHZ状態を作るのか？
 - 最新の研究動向
 - 実量子デバイスでGHZ状態を生成する
2. より良いGHZ状態を作る上での重要な要素
 - A) 量子ビットのマッピングとルーティング
 - B) 回路の深さ
 - C) エラー緩和と抑制
3. どのように評価するか
 - 忠実度 (Fidelity)
4. Notebook上での実機を用いた実験

1.GHZ状態とは

EPR状態の多ビット拡張状態！

≡ Greenberger–Horne–Zeilinger state

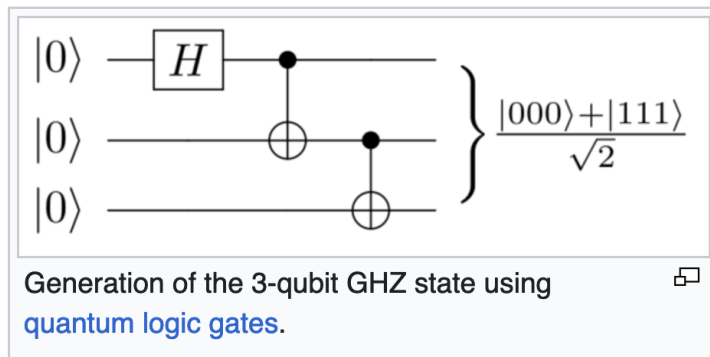
文A 5 languages ▾

Article [Talk](#)

[Read](#) [Edit](#) [View history](#) [Tools](#) ▾

From Wikipedia, the free encyclopedia

In [physics](#), in the area of [quantum information theory](#), a **Greenberger–Horne–Zeilinger state (GHZ state)** is a certain type of [entangled quantum state](#) that involves at least three subsystems (particle states, [qubits](#), or [qudits](#)). The four-particle version was first studied by [Daniel Greenberger](#), [Michael Horne](#) and [Anton Zeilinger](#) in 1989, and the three-particle version was introduced by [N. David Mermin](#) in 1990. ^{[1][2][3]} Extremely non-classical properties of the state have



1.GHZ状態とは

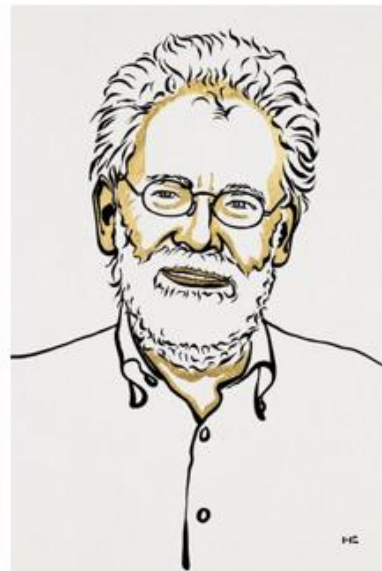
The Nobel Prize in Physics 2022



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Alain Aspect
Prize share: 1/3



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
John F. Clauser
Prize share: 1/3



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Anton Zeilinger
Prize share: 1/3



ノーベル賞解説: 「量子もつれ」からCHSH :
不等式まで

なぜ巨大なGHZ状態を作るのか？

- 複数量子ビットのもつれ状態を生成することは、量子アドバンテージをもたらす基本的な特徴を生み出す
- 一般的に、GHZ状態の生成をNISQのベンチマークとして扱うことが多い
- また、一部ではアルゴリズムや手法の性能を測るベンチマークとして用いられる
 - 例：エラー緩和

最新の研究動向

75-qubit GHZ on a superconducting QC (IBM Heron)(Q-ctrl, 2024)

Achieving computational gains with quantum error correction primitives: Generation of long-range entanglement enhanced by error detection

Haoran Liao, Gavin S. Hartnett, Ashish Kulkar, Adrian Tan, Michael Hush, Pranav S. Mundada, Michael J. Biercuk, and Yuval Baum
Q-CTRL, Los Angeles, CA USA and Sydney, NSW Australia

The resource overhead required to achieve net computational benefits from quantum error correction (QEC) limits its utility while current systems remain constrained in size, despite exceptional progress in experimental demonstrations. In this paper, we demonstrate that the strategic application of QEC primitives without logical encoding can yield significant advantages on superconducting processors—relative to any alternative error-reduction strategy—while only requiring modest overhead. We first present a novel protocol for implementing long-range CNOT gates that relies on a unitarily-prepared Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) state as well as a unitary disentangling step; the protocol natively introduces an error-detection process using the disentangled qubits as flags. We demonstrate that

24-qubit GHZ on a neural atom QC (Microsoft/Atom Computing, 2024)

Logical computation demonstrated with a neutral atom quantum processor

Ben W. Reichardt,^{1,3} Adam Paetznick,¹ David Aasen,¹ Ivan Basov,¹ Juan M. Bello-Rivas,¹ Parsa Bonderson,¹ Rui Chao,¹ Wim van Dam,¹ Matthew B. Hastings,¹ Andres Paz,¹ Marcus P. da Silva,¹ Aarthi Sundaram,¹ Krysta M. Svore,¹ Alexander Vashchilo,¹ Zhenghan Wang,¹ Matt Zanner,¹ William B. Cairncross,² Cheng-An Chen,² Daniel Crow,² Hyosub Kim,² Jonathan M. Kindem,² Jonathan King,² Michael McDonald,² Matthew A. Norcia,² Albert Ryou,² Mark Stone,² Laura Wadleigh,² Katrina Barnes,² Peter Battaglini,² Thomas C. Bohdanowicz,² Graham Booth,² Andrew Brown,² Mark O. Brown,² Kayleigh Cassella,² Robin Coxe,² Jeffrey M. Epstein,² Max Feldkamp,² Christopher Griger,² Eli Halperin,² Andre Heinz,² Frederic Hummel,² Matthew Jaffe,² Antonia M. W. Jones,² Eliot Kapit,^{2,4} Krish Kotru,² Joseph Laigun,² Ming Li,² Jan Marjanovic,² Eli Megidish,² Matthew Meredith,² Ryan Morshead,² Juan A. Muniz,² Sandeep Narayanaswami,² Ciro Nishiguchi,² Timothy Paule,²

50-qubit GHZ on an ion-trap QC (Quantinuum, 2024)

50 Logical Entangled Qubits, GHZ State > 98% Fidelity

Highly efficient quantum error detection code $[[k+2,k,2]]$

Logical GHZ state $98.0(9)\% \leq F \leq 99.0(6)\%$ (64% discard rate)

Physical GHZ state $79(2)\% \leq F \leq 88(2)\%$

The figure includes a diagram of a 50-qubit GHZ state with qubits labeled 1 to k and b. Below it are two bar charts. The left chart shows '50-qubit GHZ populations, H2-1' with bars for '[[52,30,2]] code' (blue) and 'physical' (orange). The right chart shows '50-qubit GHZ parities' with bars for '[[52,30,2]] code' (blue) and 'physical' (orange). Both charts show probability on the y-axis.

Fidelity estimate measurement significantly increases circuit depth

SPAM penalty reduces fidelity to 75(1)% - still 50 entangled qubits!

QUANTINUM

New! 120-qubit GHZ on IBM Heron (IBM, 2025)

Jay Gambetta @jaygambetta · 3月4日

Preparing large GHZ states have long been a test of hardware capabilities. Using the IBM's Heron QPU the team recently showed that 120 logical qubits can be entangled in a GHZ state - a new world record. Work done by @AliJavadAbhari and Simon Martiel.

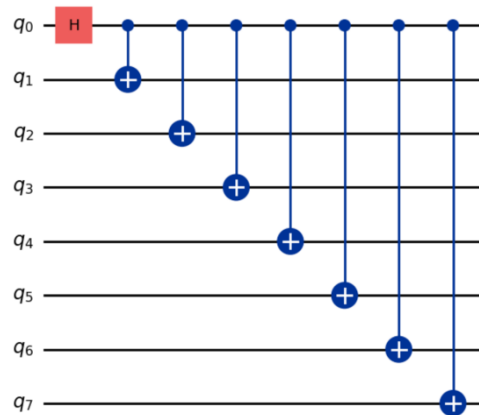
The figure shows two line graphs at the top. The left graph plots 'Fidelity' vs 'Number of qubits' (0 to 120). The right graph plots 'Fidelity' vs 'Number of qubits' (0 to 120). Below the graphs is a qubit layout diagram for a 120-qubit GHZ state. The layout shows a grid of qubits with colors: Green for GHZ root, Blue for GHZ qubits, and Pink for checks. The legend at the bottom states: 'Green: GHZ root, Blue: GHZ qubits, Pink: checks'.

5 33 142 6,881

実量子デバイスでGHZ状態を生成する

論理的な n -量子ビットのGHZ状態の生成には深さが $\mathcal{O}(n)$ の回路になる。

しかし、実機の仕様に合わせてトランスパイルすると更に深い回路になってしまう



Depth: 8



トランスパイル後の回路
(optimization_level = 3)

Depth: 67 !!

2. より良いGHZ状態を作る上での重要な要素

A) 量子ビットのマッピングとルーティング

B) 回路の深さ

C) エラー緩和 / エラー抑制

2. より良いGHZ状態を作る上での重要な要素

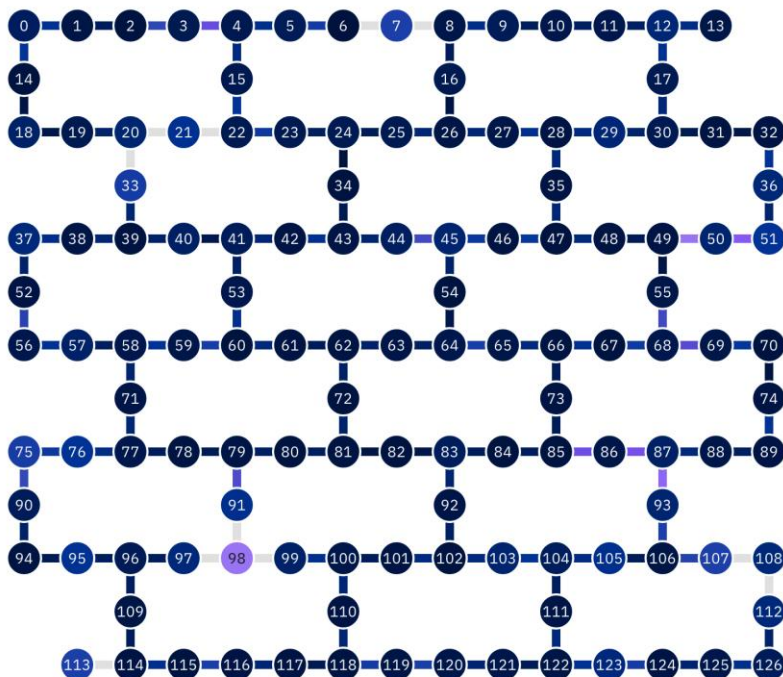
A) 量子ビットのマッピングとルーティング

- 2量子ビットゲートの配置がデバイスの結合マップに完全に依存してしまうことを理解しておくこと
- 読み出しエラーの小さい量子ビットと2量子ビットゲートを使うときのエラーの低い量子ビットペアを如何に選択するか
- 元々トランスパイルしやすい構造の回路であるか、もしくはトランスパイルしやすいように回路を自作する

B) 回路の深さ

C) エラー緩和 / エラー抑制

例: IBMのEagleプロセッサの結合構造 (ibm_brisbane)

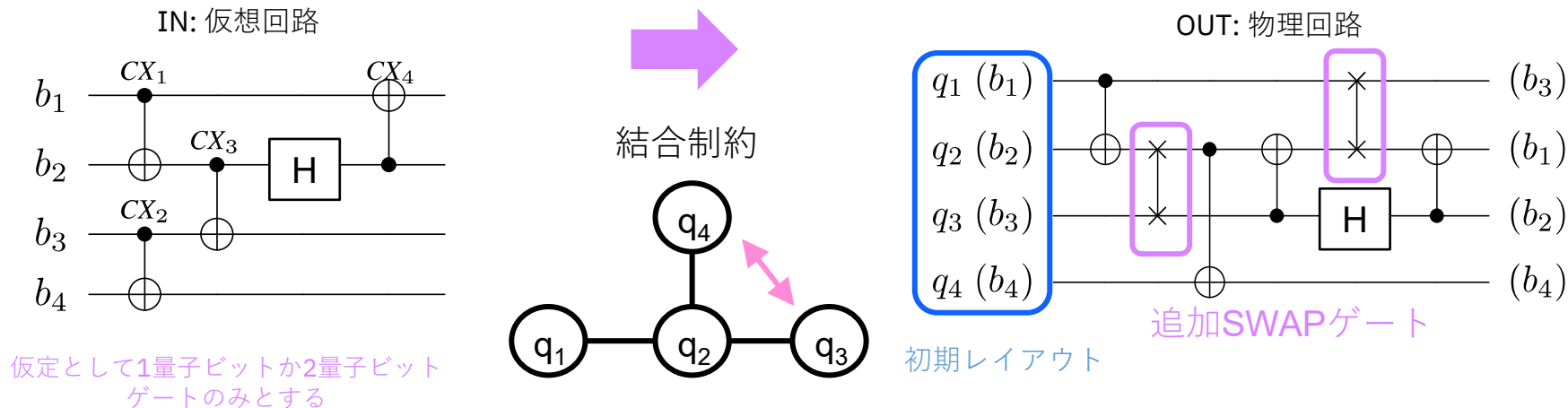


- 127 qubits
- Heavy-hex結合

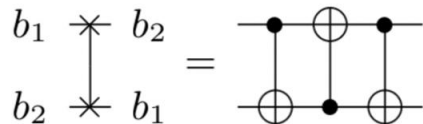
2 量子ビットゲートは結合した量子ビット間でしか実装できない

量子回路のマッピングにおける課題

生成された仮想回路と等価な計算になるように、結合されていない量子ビット間での2量子ビットゲートも操作ができるように量子ビット間で状態をSWAPゲート入れ替える必要が出てくる



仮想量子回路の中で結合制約を満たせない場合はSWAPゲートを使って結合制約が満たされるように変換される。



ただし、SWAPゲートはエラー率が高い

→ SWAPゲートはなるべく使わないようにすることが重要

エラー率の大きさ

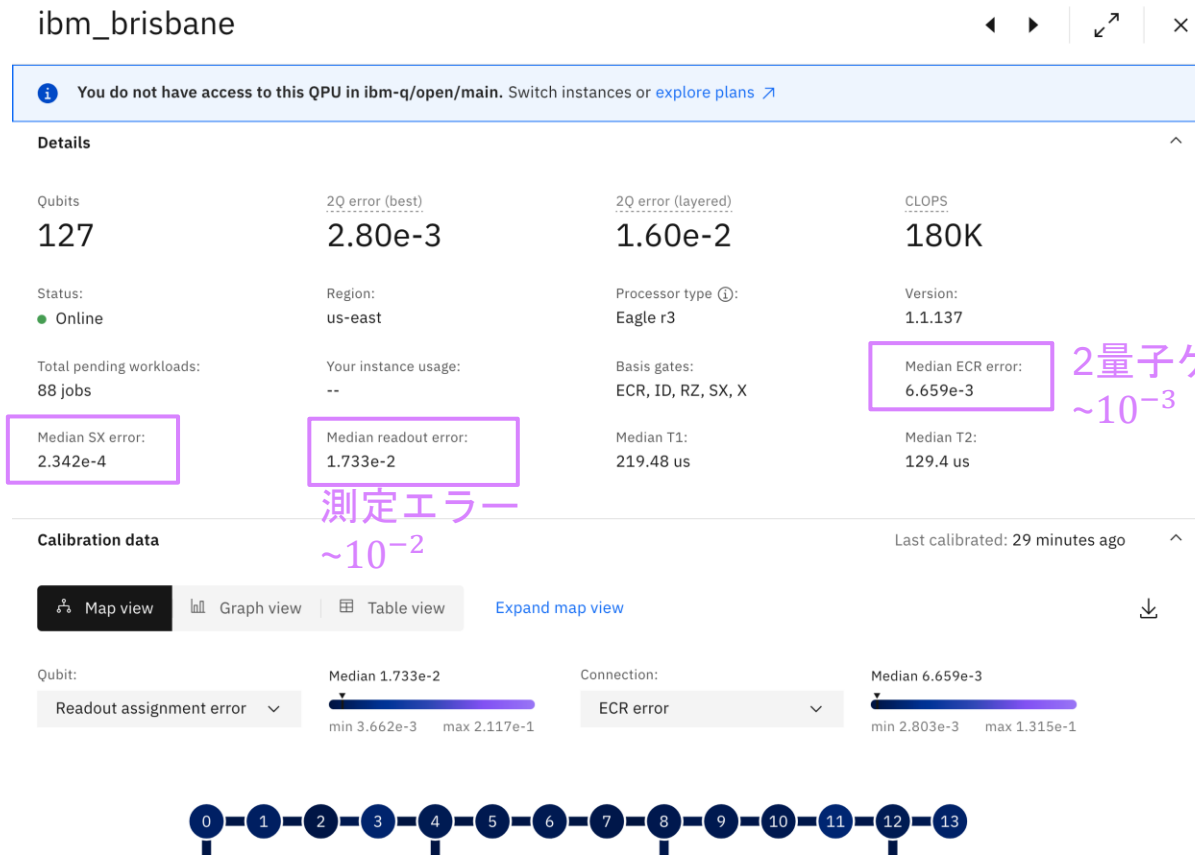
測定エラー > 2量子ゲートエラー > 1量子ゲートエラー

[IBM Quantum Platform](#)

→ Compute resources

→ ibm_brisbane

1量子ゲートエラー
~ 10^{-4}



2量子ゲート
~ 10^{-3}

測定エラー
~ 10^{-2}

測定エラーとゲートエラー

測定エラー

2量子ビットエラー



Calibration data

Last calibrated: about 17 hours ago



Map view



Graph view



Table view

[Expand graph view](#)



Sort qubits:

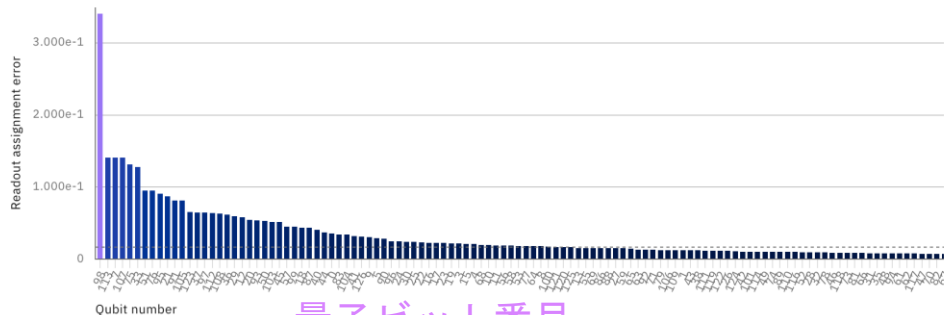
High to low

Graph output:

Readout assignment error

Median 1.660e-2

min 4.395e-3 max 3.403e-1



量子ビット番号



エラーがなるべく起きにくい量子ビットと経路を選択することが重要

2. より良いGHZ状態を作る上での重要な要素

A) 量子ビットのマッピングとルーティング

- 2量子ビットゲートの配置がデバイスの結合マップに完全に依存してしまうことを理解しておくこと
- 読み出しエラーの小さい量子ビットと2量子ビットゲートを使うときのエラーの低い量子ビットペアを如何に選択するか
- 元々トランスパイルしやすい構造の回路であるか、もしくはトランスパイルしやすいように回路を自作する

B) 回路の深さ

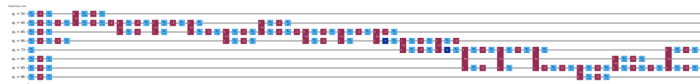
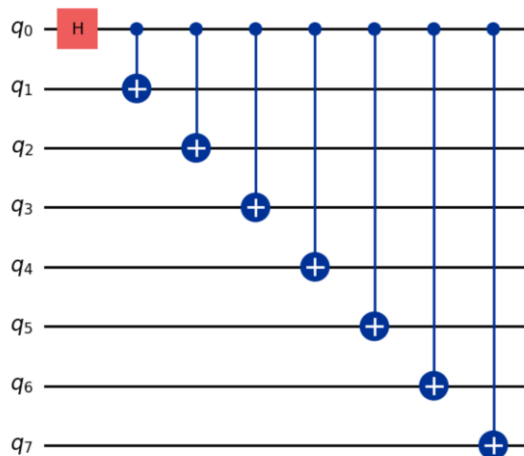
- 2量子ビットゲートの結合を平衡木になるように波及させる

C) エラー緩和 / エラー抑制

回路の深さを考える

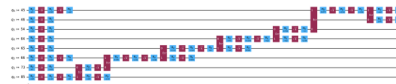
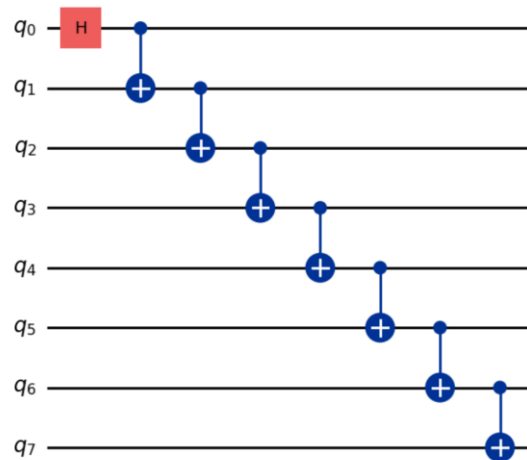
2量子ビットの繋がりを連鎖させる形で仮想回路を書くと物理回路の深さが減る

SWAPゲートが必要



Depth: 67 (two-qubit depth 14)

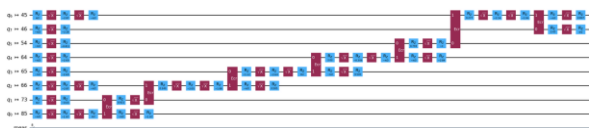
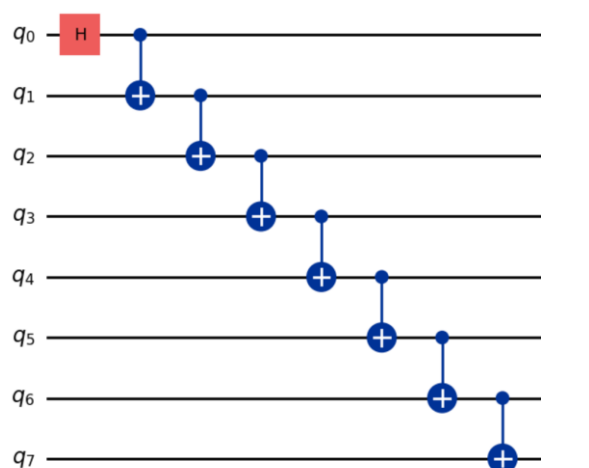
SWAPゲートが不要



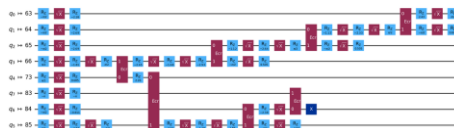
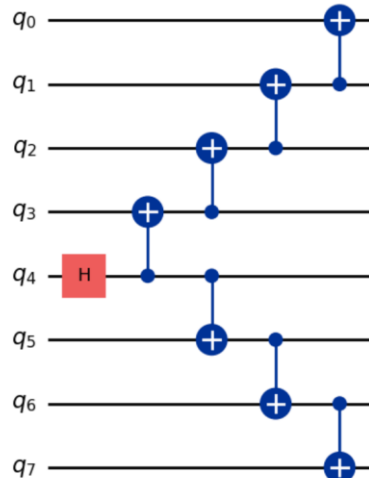
Depth: 37 (two-qubit depth 7)

回路の深さを考える

結合のルートを2分割するだけでも量子回路の深さを減らせる



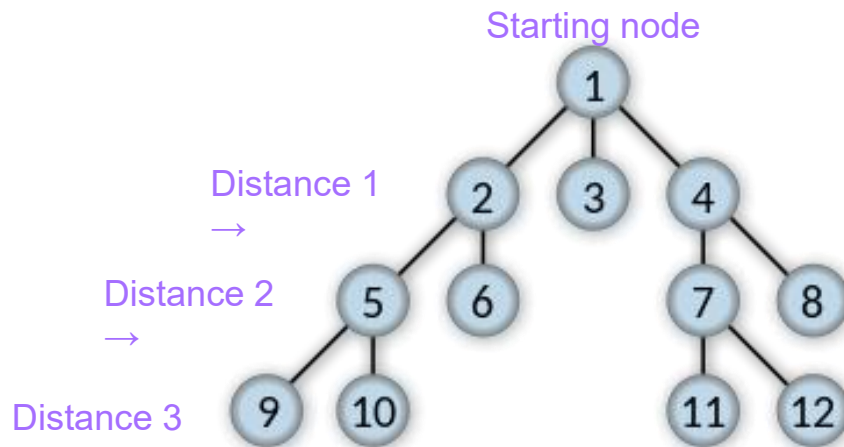
Depth: 37 (2量子ビットdepth 7)



Depth: 26 (2量子ビットdepth 4)

2 量子ビットの平衡木

- 幅優先探索（BFS）を用いる。
- 開始点から最も近い点から始まり、グラフ内の全ノードを検索するアルゴリズム。
- 検索は開始点から等深さで進行し、開始点の隣接ノード（距離1）を全て調べた後、それらの隣接ノード（距離2）を全て調べ、これを終端まで繰り返す。

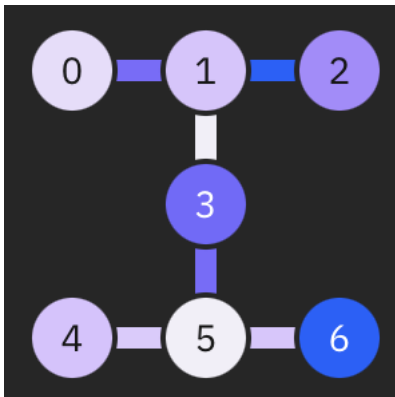


Reference: https://en.wikipedia.org/wiki/Breadth-first_search

グラフ表現

- 量子ビットをグラフのノードと見做し、2量子ビットゲートをエッジと見做すとグラフとして考えることができる
- 量子ビットの結合マップから容易にグラフ構造を抽出できる
- 結果として、グラフ最適化アルゴリズムを適用することも検討できる

例



“ibm_perth” 結合マップ

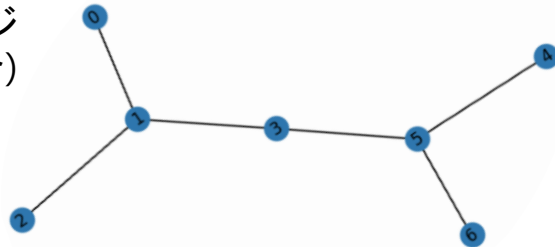


```
import rustworkx as rx
g = backend.coupling_map.graph.copy().to_undirected()

from rustworkx.visualization import mpl_draw
mpl_draw(g, with_labels=True)
```

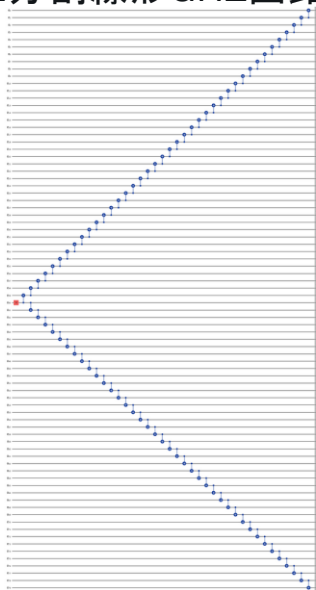
ノード (量子ビット)

エッジ
(結合)

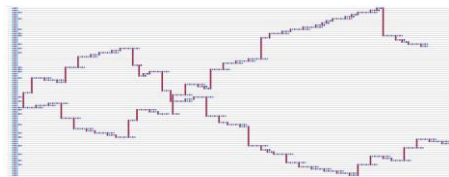
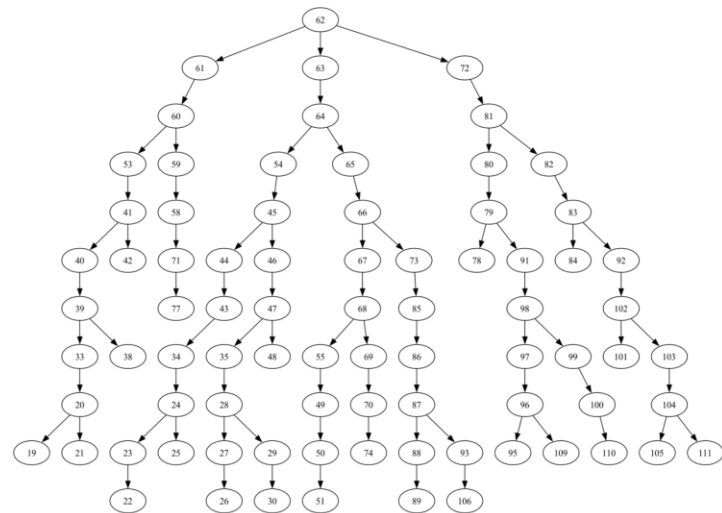
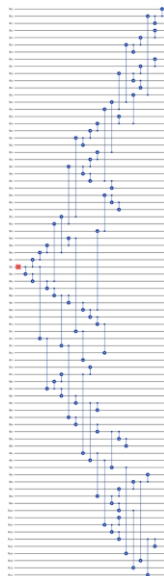


80量子ビットGHZの平衡木の選択

2分割線形GHZ回路



平衡木GHZ回路



Depth: 208 (two-qubit depth 40)



Depth: 46 (two-qubit depth 14)

2. より良いGHZ状態を作る上での重要な要素

A) 量子ビットのマッピングとルーティング

- 2量子ビットゲートの配置がデバイスの結合マップに完全に依存してしまうことを理解しておくこと
- 読み出しエラーの小さい量子ビットと2量子ビットゲートを使うときのエラーの低い量子ビットペアを如何に選択するか
- 元々トランスパイルしやすい構造の回路であるか、もしくはトランスパイルしやすいように回路を自作する

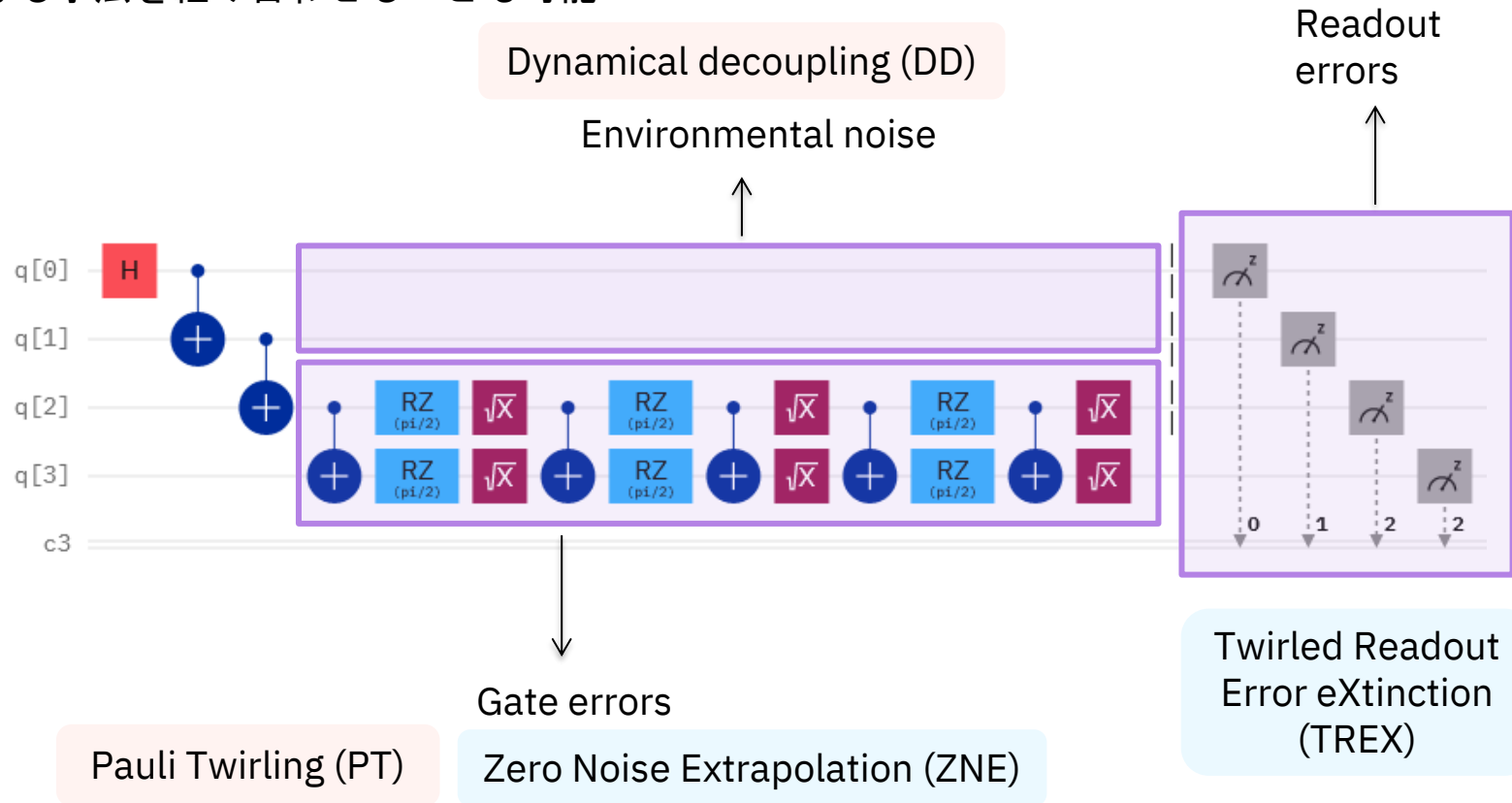
B) 回路の深さ

- 2量子ビットゲートの結合を平衡木になるように波及させる

C) エラー緩和 / エラー抑制

エラー抑制と緩和

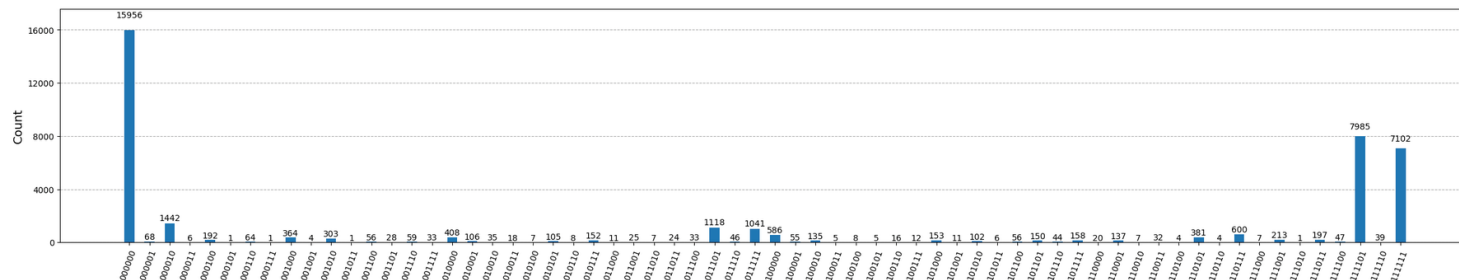
- 異なるタイプのエラーには異なる抑制と緩和の技術を用いる
- 異なる手法を組み合わせることも可能



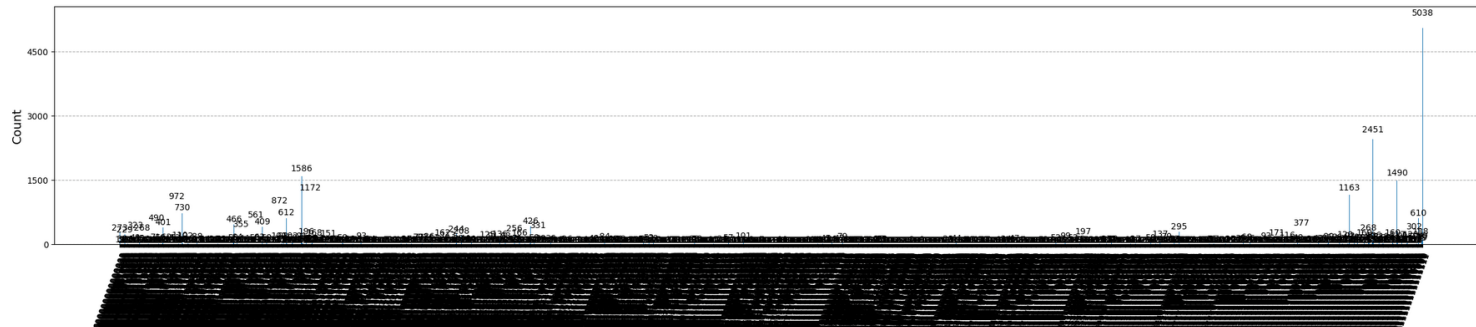
3.どのように評価するか？

GHZ状態を生成したときに、どれくらいの頻度で生成できるかを定量的に測ることで比較できるようになる

N = 6, ibm_brisbane



N = 12, ibm_brisbane



忠実度 (Fidelity)

- 2つの量子状態の似ている具合を測る指標
- ρ と σ はそれぞれ量子状態としたときに $F(\sigma, \rho) \equiv \left(\text{Tr} \left(\sqrt{\rho^{1/2} \sigma \rho^{1/2}} \right) \right)^2$
- $0 \leq F(\rho, \sigma) \leq 1$
- 1に近いほど2つの量子状態は似ていて、0に近いほど直交している
- σ が純粋状態 $|\psi\rangle\langle\psi|$ であるならば, $F(|\psi\rangle\langle\psi|, \rho) = \langle\psi|\rho|\psi\rangle = \text{Tr}(\rho|\psi\rangle\langle\psi|)$

GHZ実験における忠実度の算出

目標とする状態は以下であった。

$$|GHZ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle^{\otimes N} + |1\rangle^{\otimes N})$$

GHZ状態は純粋状態である。

ρ を実機での実験結果から出てきた量子状態とする。

これは次のように計算できる。

$$F(|GHZ\rangle\langle GHZ|, \rho) = \text{Tr}(\rho |GHZ\rangle\langle GHZ|)$$

ここからはNotebookの
実験を紹介します

最後に：もっと勉強したい方へ

Jupyter notebookの和訳版



Search

Quantum Tokyo へようこそ

学習コンテンツ

Qiskit の始め方
IBM Quantum Platform 教材
日本語訳
ユーティリティ・スケール
量子コンピューティング
IBM Research Blog 日本語版
(旧) Qiskit テキストブック 日
本語版
(旧) Qiskit テキストブック
(Qiskit コース) 日本語版
(旧) Qiskit ドキュメント・
チュートリアル 日本語版リン
ク集
IBM Quantum Challenge
Qiskit Global Summer School
(Qiskit 夏の学校) 資料 日本

≡



ユーティリティ・スケール量子コ ンピューティング

概要

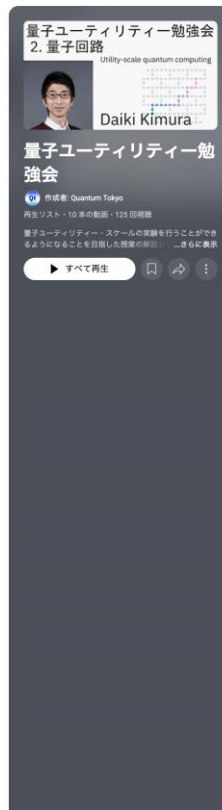
このイベント・リプレイ・コースは、IBM Quantum®が東京大学と共同で開発し実施した14の Lesson と Lab で構成されています。このコースでは、量子コンピューティングにおける幅広い重要なトピックを網羅しつつ、実用規模（ユーティリティ・スケール）の量子計算を構築することに重点を置いています。最終的な結果として、2023年6月にNature誌の表紙を飾った論文と非常によく似た課題を扱います。

翻訳元はこちらです：[IBM Quantum Learning の Utility-scale quantum computing](#)

1. [はじめに](#)
2. [量子ビット・量子ゲート・量子回路](#)
3. [量子テレポーテーション](#)
4. [グローバラーのアルゴリズム](#)
5. [量子位相推定](#)
6. [量子変分アルゴリズム](#)
7. [量子系のシミュレーション](#)
8. [古典計算によるシミュレーション](#)
9. [量子ハードウェア](#)
10. [量子回路の最適化](#)
11. [量子エラー緩和](#)
12. [量子ユーティリティの実験 I](#)
13. [量子ユーティリティの実験 II](#)
14. [量子ユーティリティの実験 III](#)



これまでのセッションの録画 YouTube



<https://quantum-tokyo.github.io/introduction/courses/utility-scale-quantum-computing/overview-ja.html>

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLA-UlvpIBvpuzFXRPNTqk9K4fRgYCBMs>