

# 量子ユーティリティーの実験 I

2025/9/18

立花 隆輝

1

博士（工学）

日本IBM東京基礎研究所 副所長

Senior Technical Staff Member。人工知能学会、情報処理学会会員

1998年～2022年 日本IBM 東京基礎研究所で音楽著作権保護、音声合成、音声認識、自然言語処理、Neuro-symbolic AI、そのほかの機械学習の研究に従事。

2014年～ 複数のWatson製品の研究開発と、応用プロジェクトに参加

- Watson Text To Speech （音声合成）
- Watson Speech To Text （音声認識）
- Watson Dialog （対話（※現行製品はWatson Assistant））など



2022年～2024年 社長室にて部門横断的な複数のプロジェクトを推進

2023年～2024年 **watsonX** Project Manager

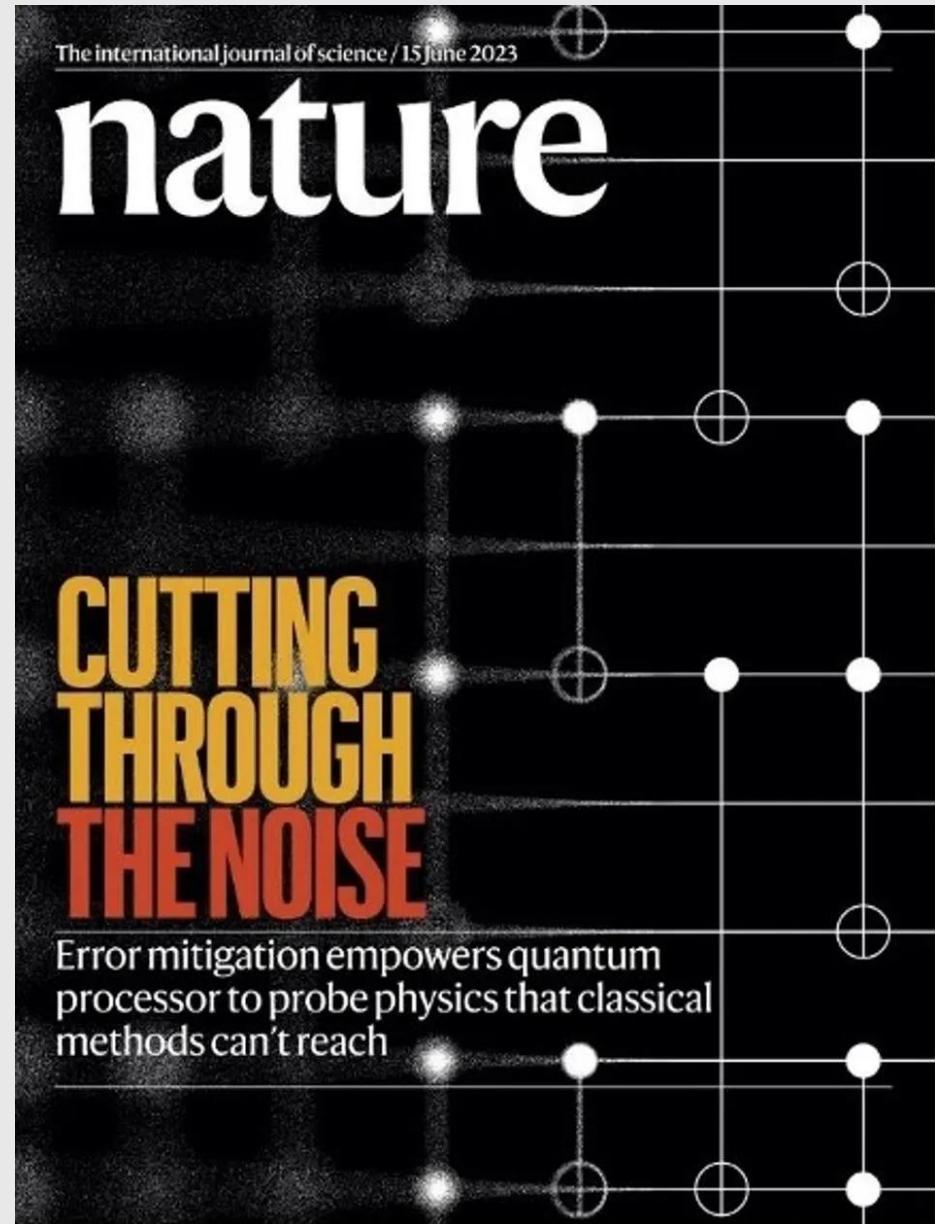
2024年～ IBM Quantum、Client Delivery Lead、  
Quantum Ambassador、Qiskit Advocate  
量子コンピューターの社会実装に関わる。



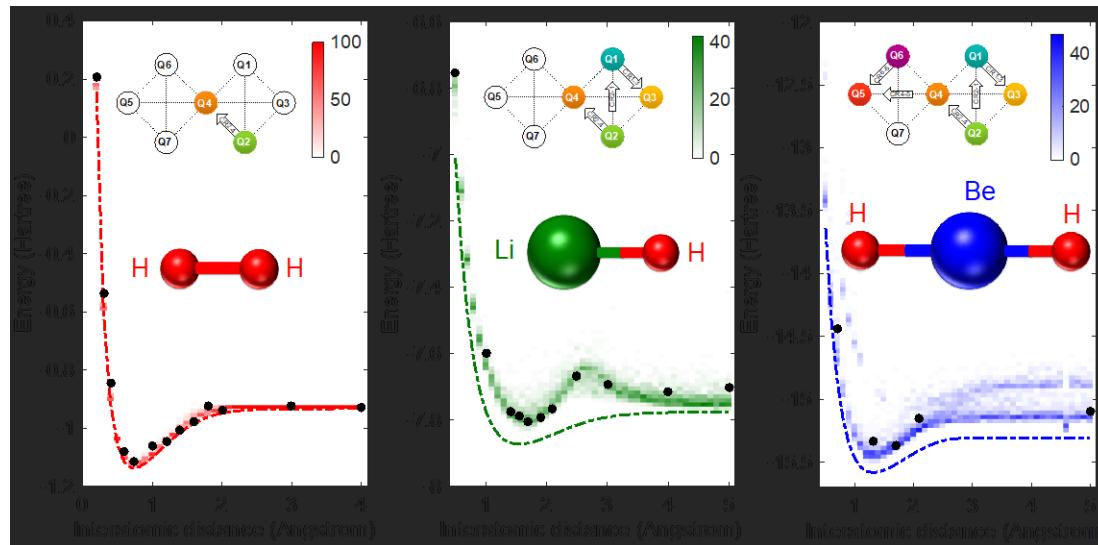
# 量子有用性 の時代が始まっています

15 June 2023

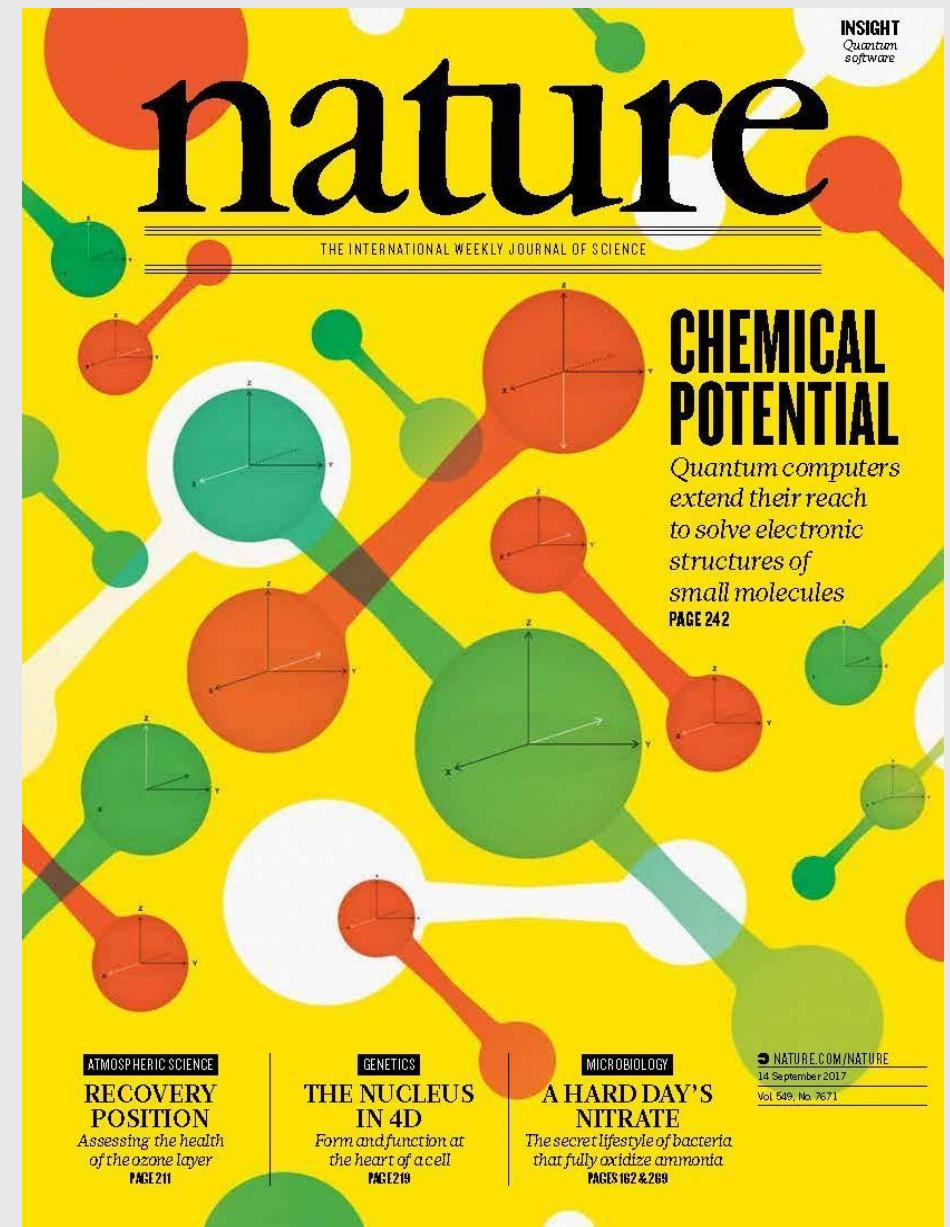
[Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance.](#)



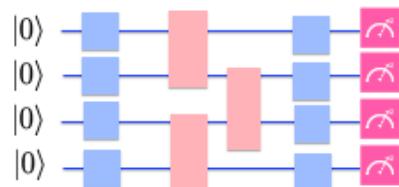
8年前..



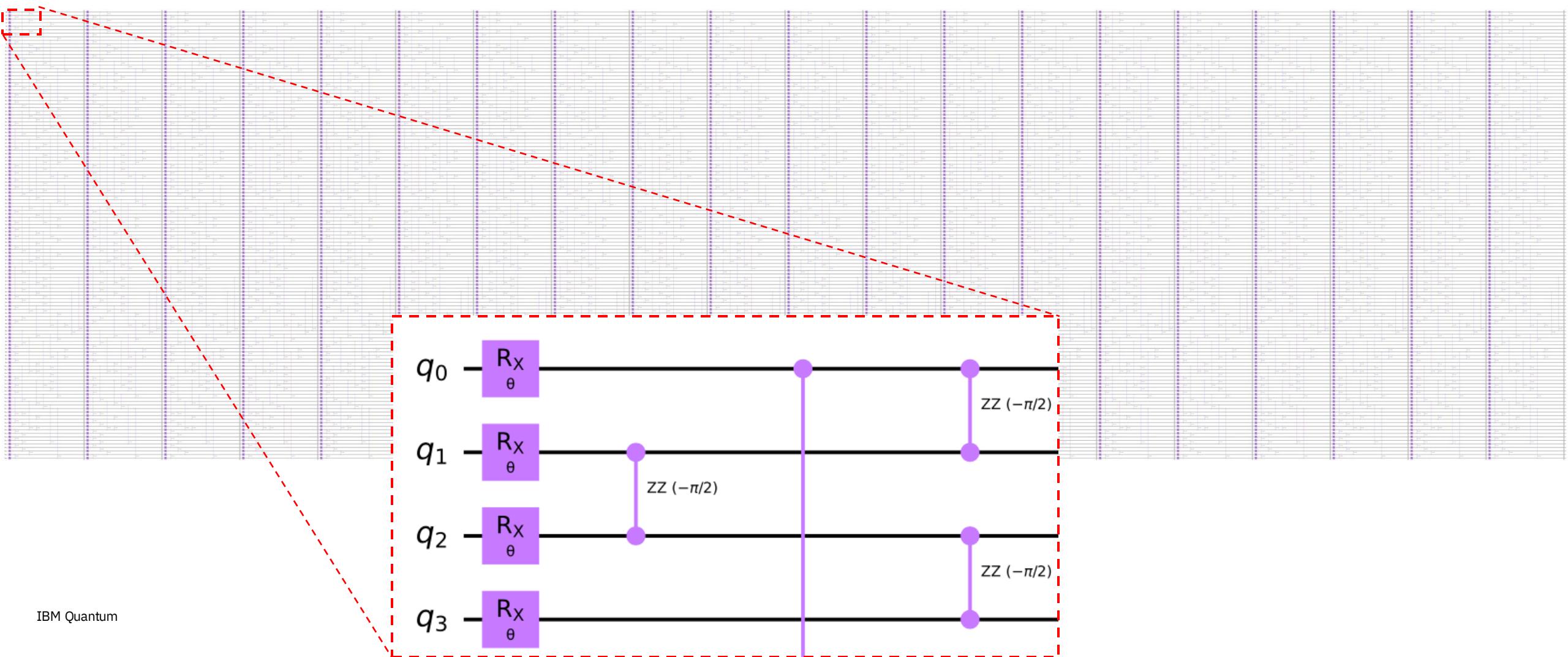
Method: VQE



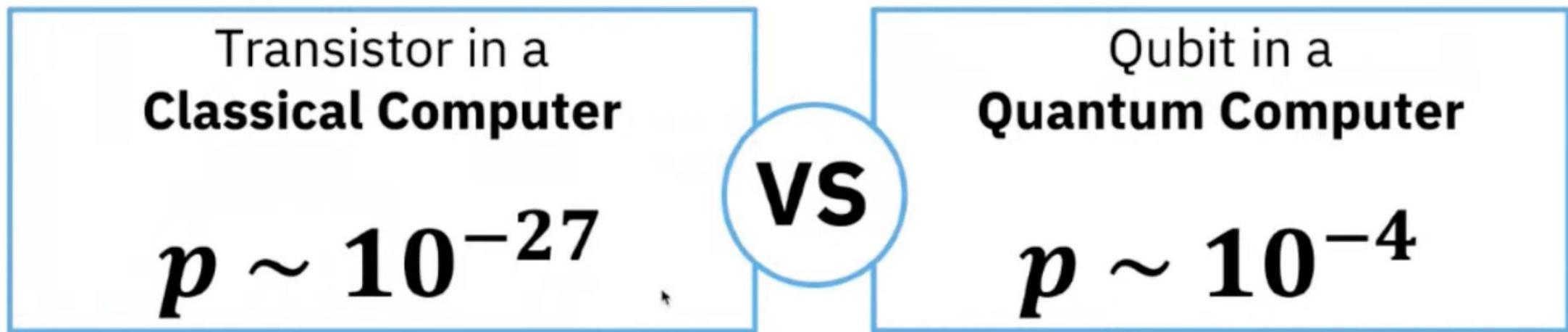
# 127 量子ビット × 60 レイヤー



2017: 4 量子ビット, 深さ 2



# ハードウェアのエラー率



# フォールト・トレランス実現前の 量子コンピューター利用

2量子ビット・ゲートの忠実度（フィデリティー）が、 $f \sim 0.999$  だとすると

100量子ビット  $\times$  100レイヤーで 10,000個の 2量子ビット・ゲートあったとき

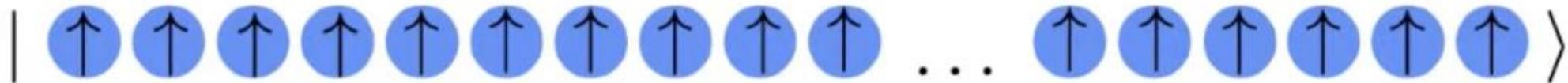
この量子回路実行後の量子状態の忠実度は  $f^{10^4} \cong 4 \times 10^{-5}$

→では、量子エラー訂正(QEC)が実現しないと、  
量子コンピューターから有用な情報は得られないのか？

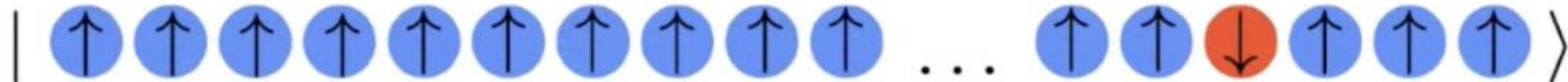
→いや、そんなことはない

# 50個のスピンのある系の量子状態を考える

IBM Quantum



磁化率 = 1



量子状態としての忠実度 = 0 だが、  
磁化率 = 0.98 は有用な場合がある

量子状態全体としての忠実度が高くななくても、  
関心のある特性を得るという点で結果に価値がある場合がある

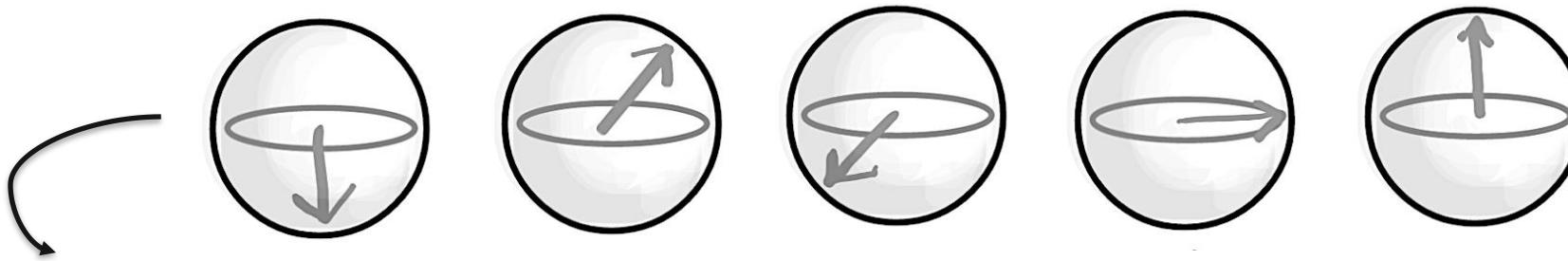
# 期待値の計測が有用な例

- 互いに相互作用するスピン系の磁化率
  - 相関関数
  - 機械学習におけるカーネル
  - 最適化におけるコスト関数
  - 分子シミュレーションでの結合エネルギー
- などなど

「あまり深くない回路を用いて期待値を測定する」という手法が、目下のところノイズのある量子コンピューターで有望

# スピニンモデル

スピニンモデルは自然をシミュレートするのに使われます



「イジングモデル」：格子状に配置されたスピニン間の最近傍の相互作用のみを考慮  
物理学のさまざまな分野で用いられます：磁化、物質の相の研究などなど

## 古典で扱う際の困難性

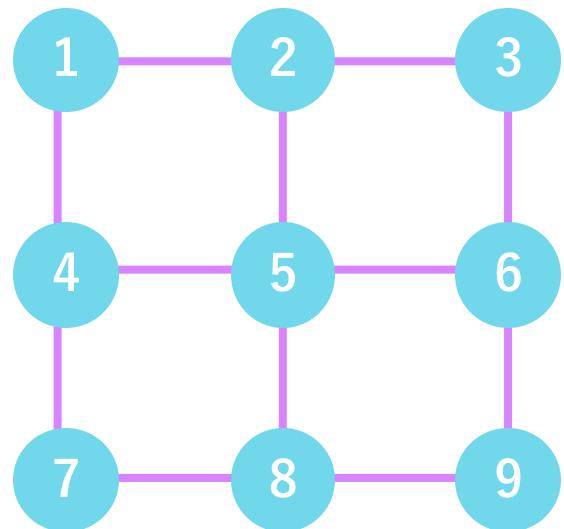
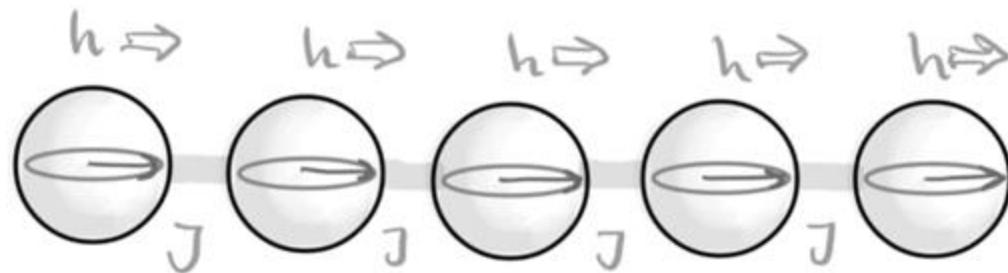
$L$ 個のサイト、 $L$ 個のスピニンの場合、スピニン系は  $2^L$  状態の重ね合わせとして存在

$L=50$  すでに 10,000TB 以上の古典メモリが必要

# この実験で扱った問題

2次元 横磁場イジングモデルの時間発展問題

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j + h \sum_i X_i \quad J > 0$$

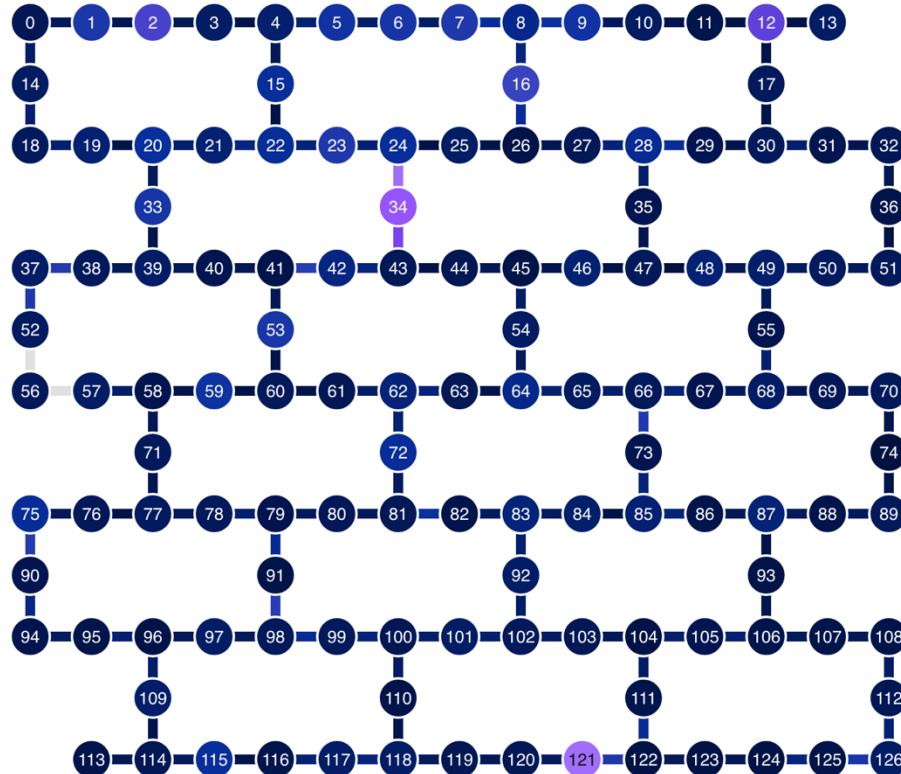


$$H = -J (Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_4 Z_5 + Z_5 Z_6 + Z_7 Z_8 + Z_8 Z_9 + Z_1 Z_4 + Z_2 Z_5 + Z_3 Z_6 + Z_4 Z_7 + Z_5 Z_6 + Z_6 Z_9) + h (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9)$$

# 実験

- IBMの量子デバイスのトポロジー形状で、スピンが並んでいたとした場合

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j + h \sum_i X_i$$

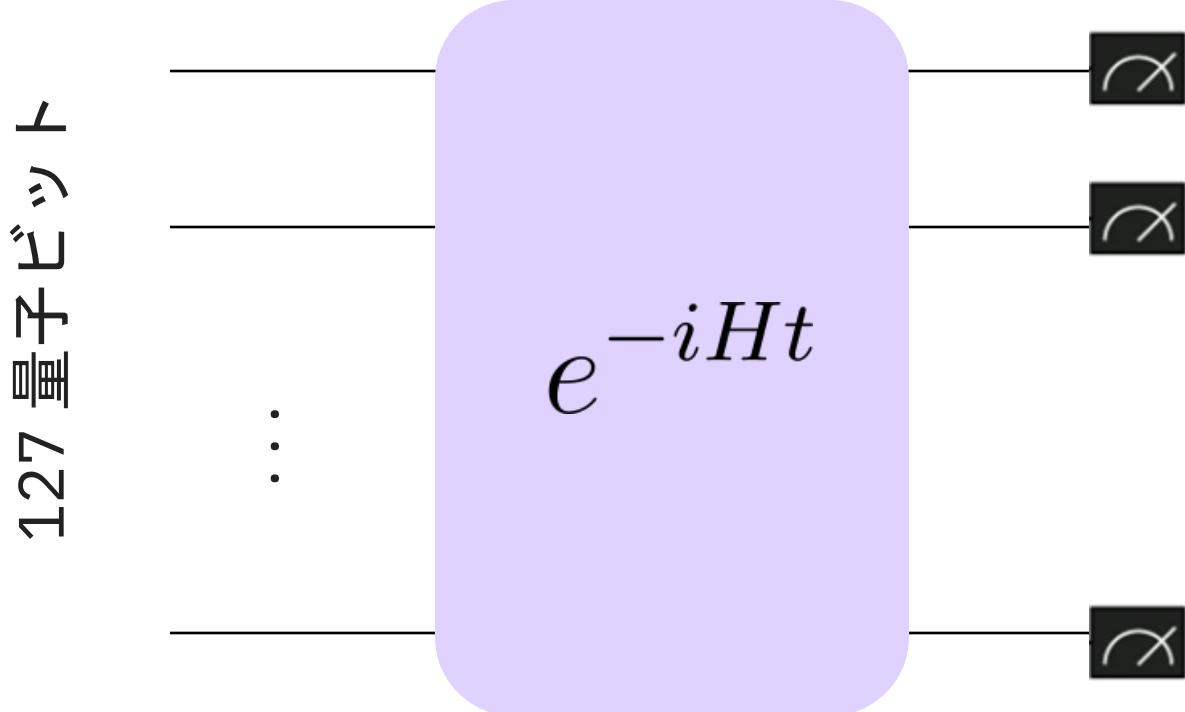


127量子ビット

# 実験

- IBMの量子デバイスのトポロジー形状で、スピンが並んでいたとした場合

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j + h \sum_i X_i$$



# 鈴木トロッターディシジョン

鈴木トロッターディシジョン

第7回「量子系のシミュレーション」に關係

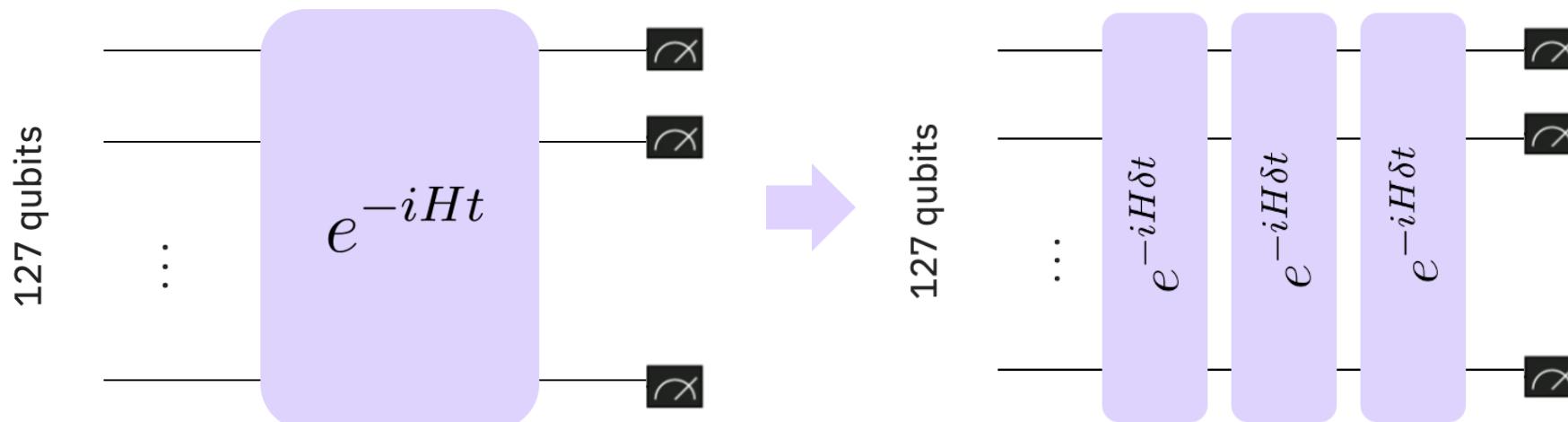
$$e^{A+B} = \lim_{n \rightarrow \infty} (e^{A/n} e^{B/n})^n$$

ターゲット Hamiltonian

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j + h \sum_i X_i$$

時間発展

$$e^{-iHt} = e^{(iJ \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j - ih \sum_i X_i)t} = \lim_{n \rightarrow \infty} (e^{iJ\delta t \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j} e^{-ih\delta t \sum_i X_i})^n \quad \delta t \equiv \frac{t}{n}$$



トロッターフィルタが  
多いほど、回路の深さが  
深くなる

# 鈴木トロッターフォーマンスを用いた時間発展シミュレーション

鈴木トロッターフォーマンス

第7回「量子系のシミュレーション」に関係

$$e^{A+B} = \lim_{n \rightarrow \infty} (e^{A/n} e^{B/n})^n$$

ターゲット Hamiltonian

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j + h \sum_i X_i$$

時間発展

$$e^{-iHt} = e^{(iJ \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j - ih \sum_i X_i)t} = \lim_{n \rightarrow \infty} (e^{iJ\delta t \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j} e^{-ih\delta t \sum_i X_i})^n \quad \delta t \equiv \frac{t}{n}$$

$$\underline{e^{iJ\delta t \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j}} = \prod_{\langle i,j \rangle} e^{iJ\delta t Z_i Z_j} = \prod_{\langle i,j \rangle} R_{Z_i Z_j}(-2J\delta t)$$

RZZ gate

$$\underline{e^{-ih\delta t \sum_i X_i}} = \prod_i e^{-ih\delta t X_i} = \prod_i R_{X_i}(-2h\delta t)$$

RX gate

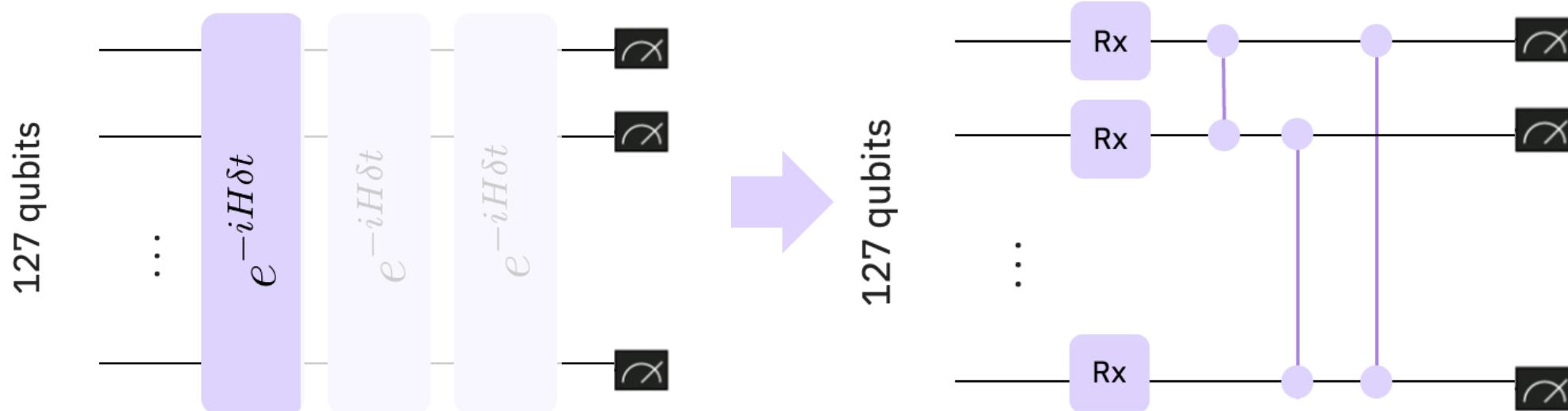
# 鈴木トロッター分解を用いた時間発展シミュレーション

ターゲット Hamiltonian

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j + h \sum_i X_i$$

時間発展

$$e^{-iHt} = e^{(iJ \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j - ih \sum_i X_i)t} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( e^{\frac{iJ\delta t \sum_{\langle i,j \rangle} Z_i Z_j}{\text{RZZ gate}}} e^{-\frac{ih\delta t \sum_i X_i}{\text{RX gate}}} \right)^n$$

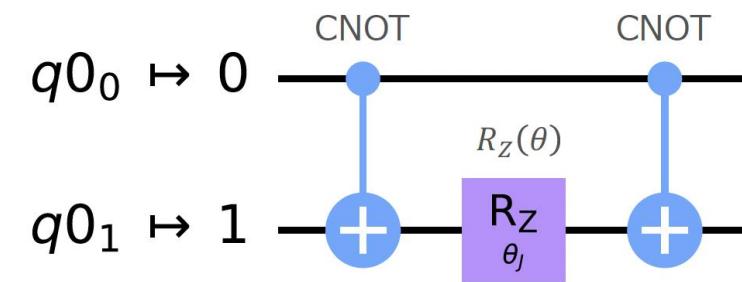


それぞれのレイヤーに回転ゲート RX と 2量子ビットゲート RZZ があります

# RZZゲート

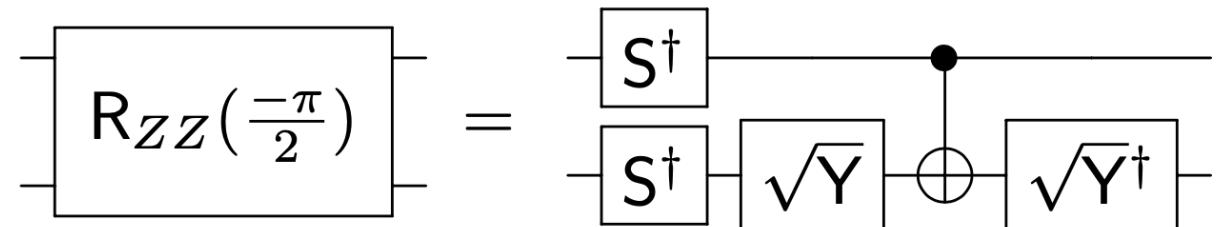
$$R_{Z_i Z_j}(-2J\delta t) \rightarrow R_{ZZ}(\theta_J) = e^{-i\frac{\theta_J}{2}Z \otimes Z}$$

$$= \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\theta_J}{2}Z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\theta_J}{2}Z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\frac{\theta_J}{2}Z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-i\frac{\theta_J}{2}Z} \end{pmatrix}$$



実験をシンプルにするために  $\theta_J = -2J\delta t = -\frac{\pi}{2}$  に限定

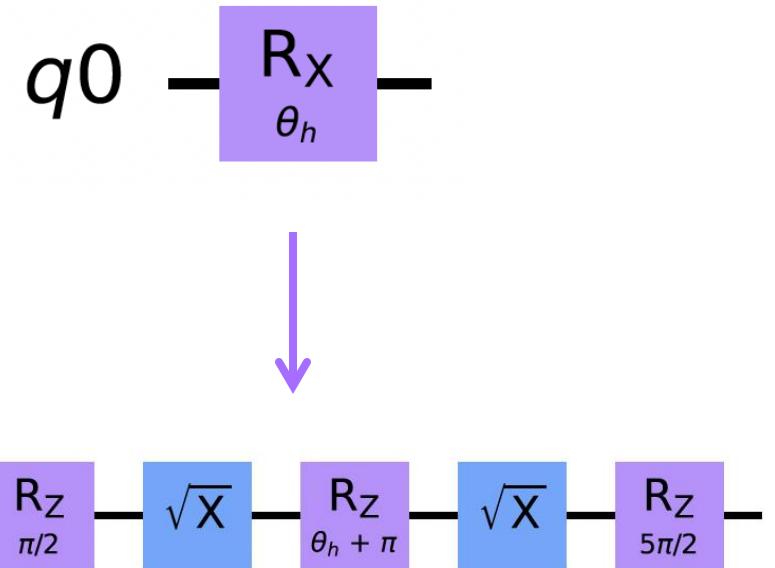
→  $R_{ZZ}(-\frac{\pi}{2})$  は CNOTゲートが 1つになる



# RXゲート

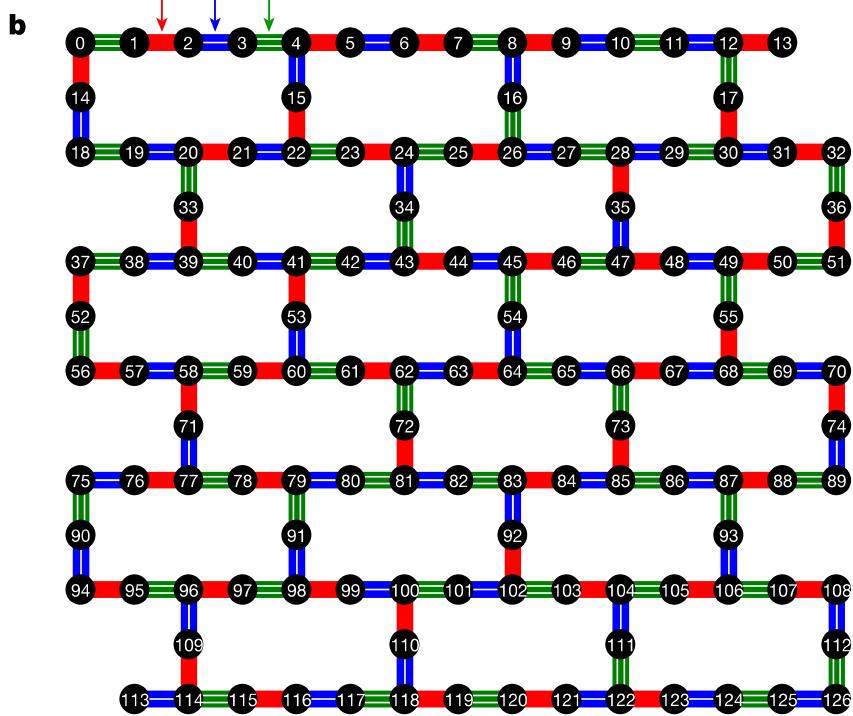
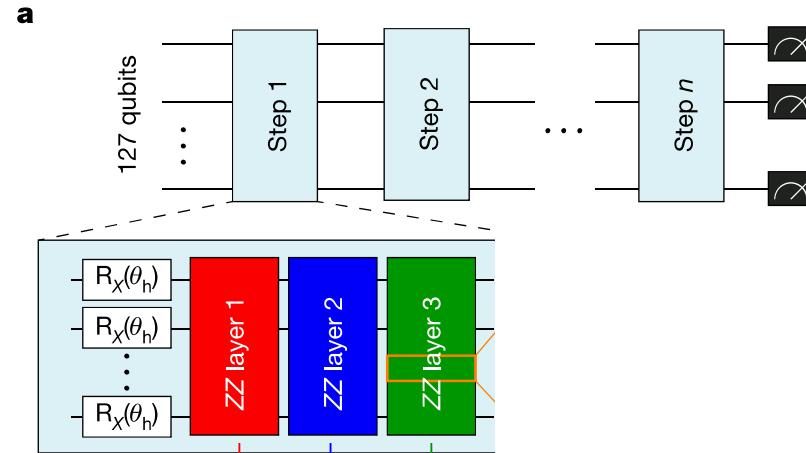
$$R_X(2h\delta t) \rightarrow R_X(\theta_h) = e^{-i\frac{\theta_h}{2}X}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta_h}{2}\right) & -i \sin\left(\frac{\theta_h}{2}\right) \\ -i \sin\left(\frac{\theta_h}{2}\right) & \cos\left(\frac{\theta_h}{2}\right) \end{pmatrix}$$

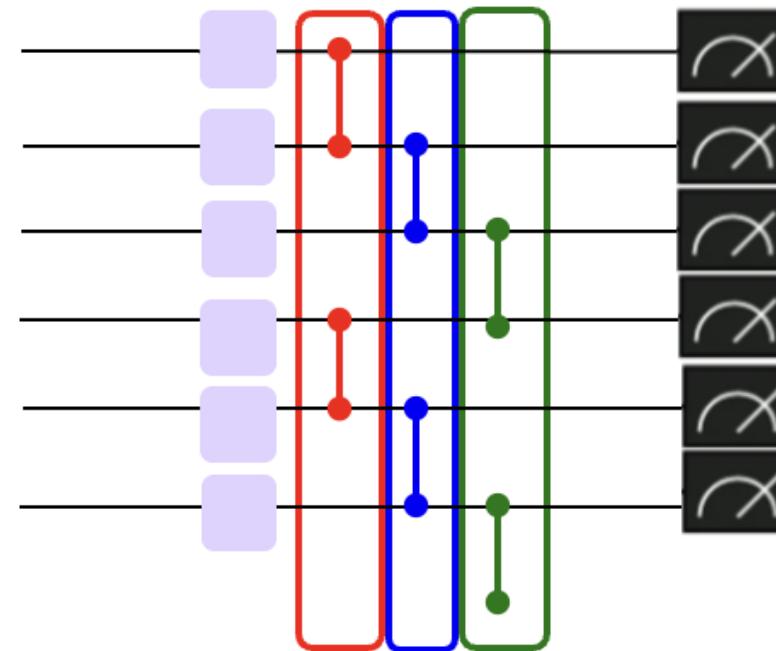


1量子ビット・ゲートの回転角 ( $\theta_h$ ) が横磁場の強度に相当。  
これを変化させて、横磁場強度の影響をシミュレーションする。

# カップリング・マップの考慮



量子ビットは最大で3つの隣接量子ビットを持つので、  
RZZ演算は3層に並列化したCNOTゲートで実行します。  
このアイデアにより、回路の深さが削減されます。



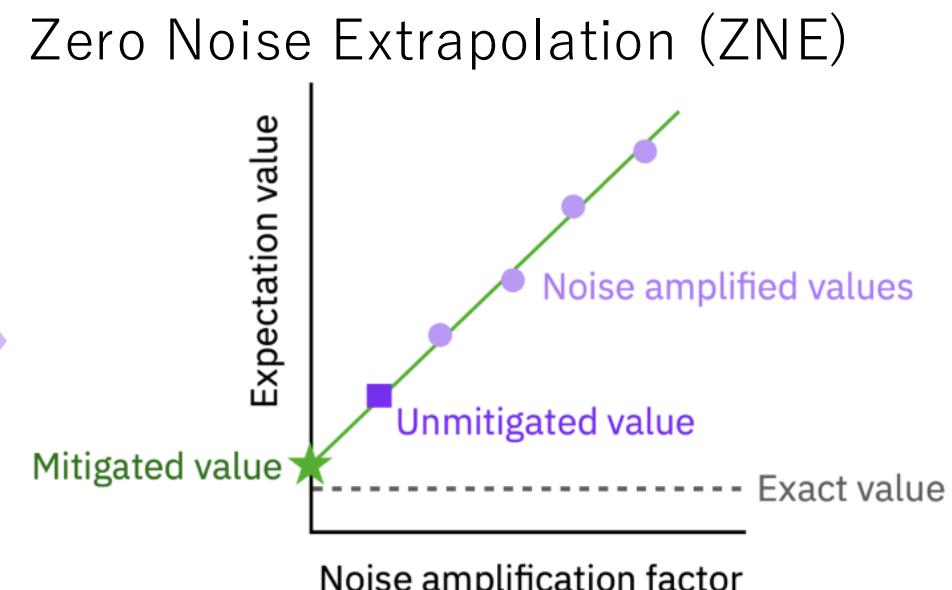
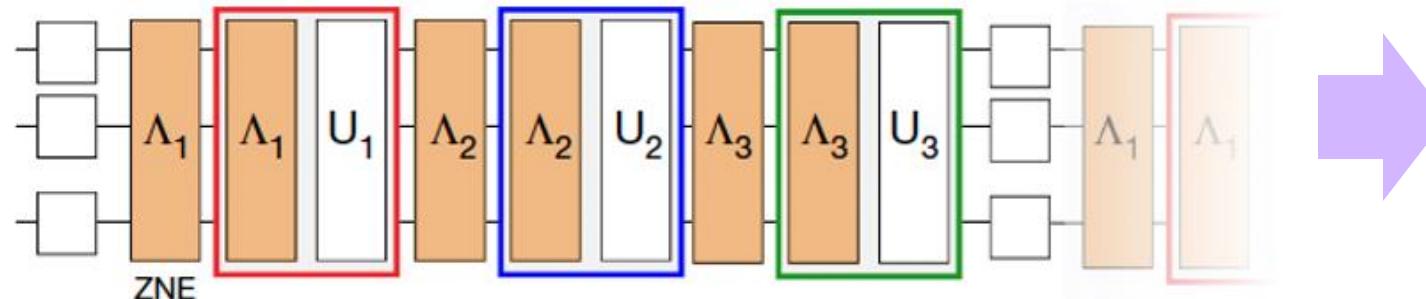
# ノイズのある回路のモデル化

## Pauli Twirlingを使ったPEA (Probabilistic Error Amplification)

Step 1. ノイズを単純化

Step 2. ノイズを学習

Step 3. ノイズを増幅し、得られた点から外挿 (ZNE)

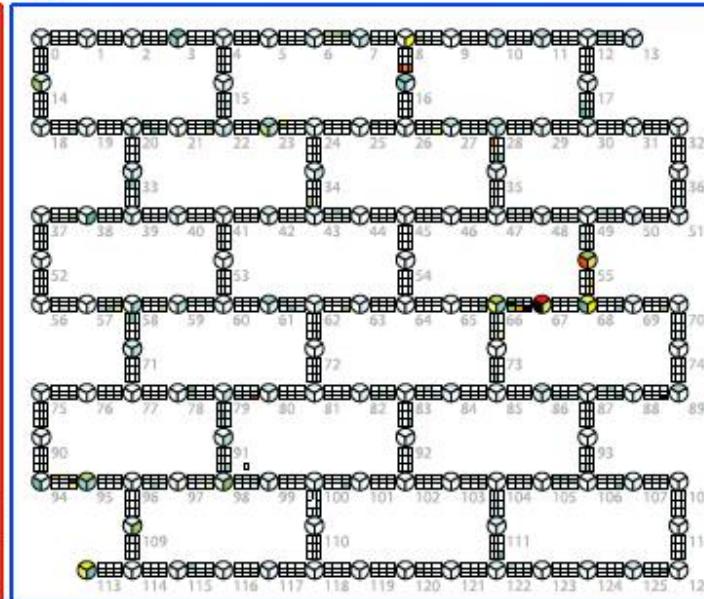


# レイヤーごとにノイズモデルを学習

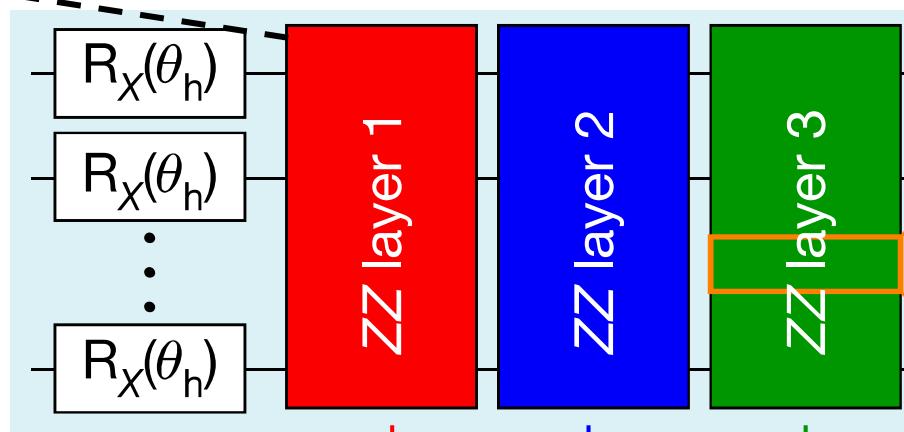
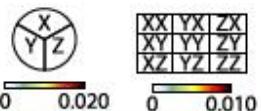
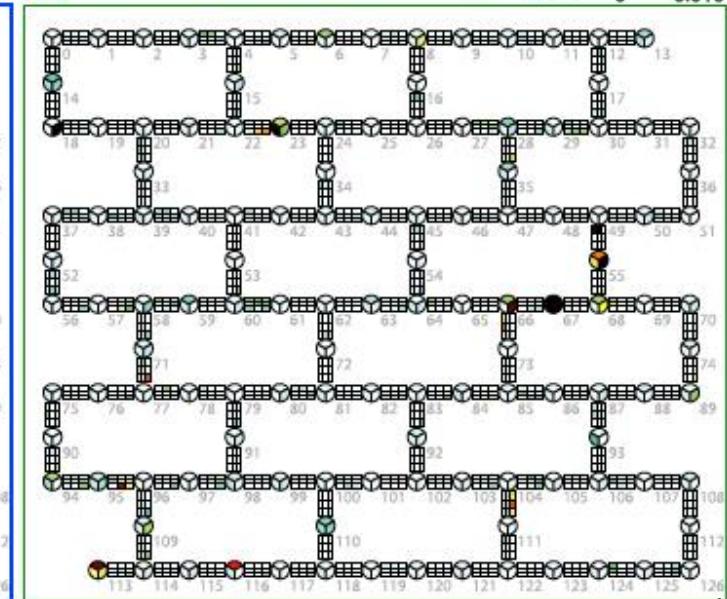
noise model  $\Lambda_1$



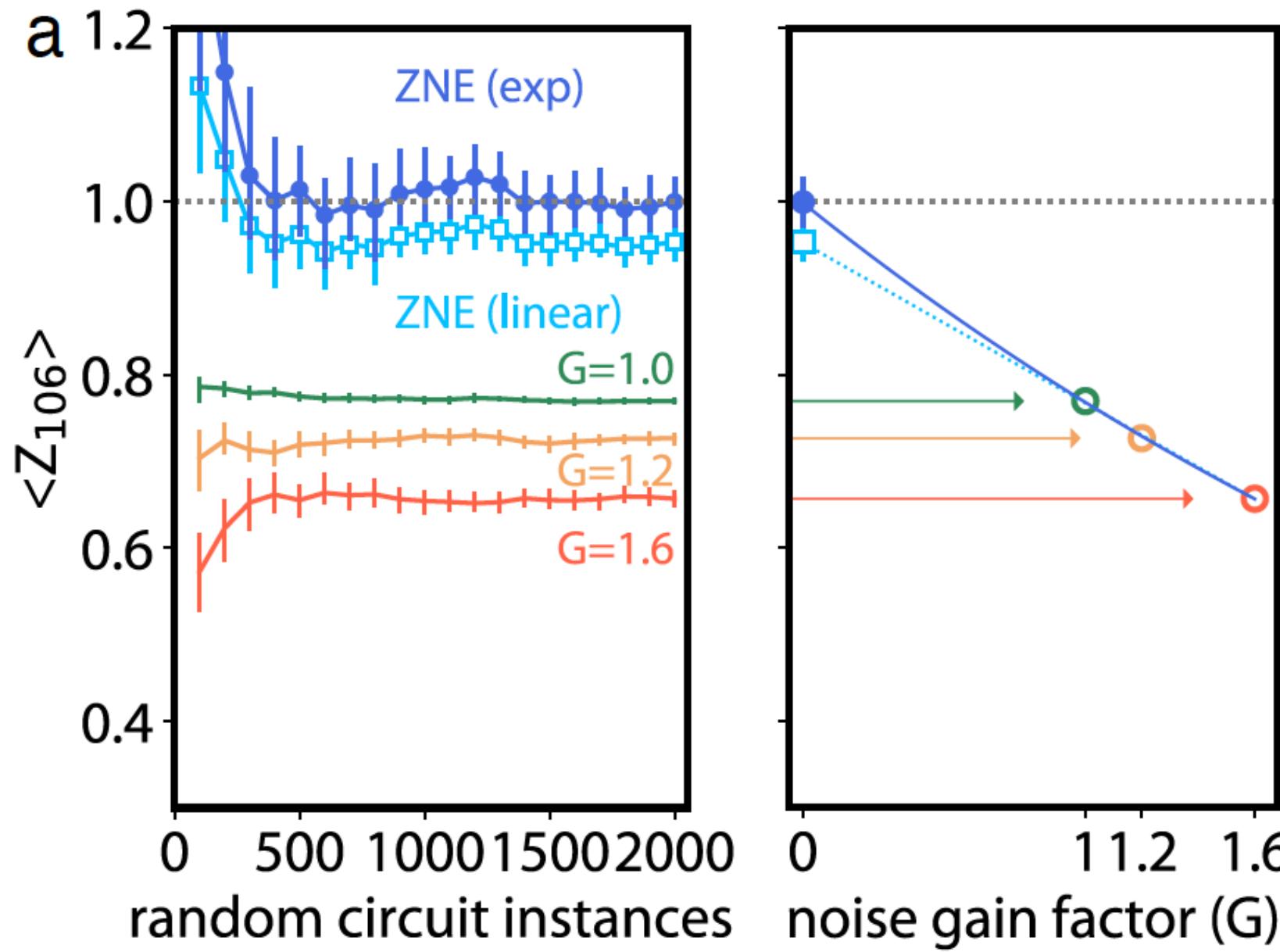
$\Lambda_2$



$\Lambda_3$



# 特定のスピン1個の期待値



Probabilistic Error  
Amplification (PEA) を使った  
ZNE

初期状態:  $|0\rangle^{\otimes 127}$

$\theta_h = 0$ : 横磁場なしの場合

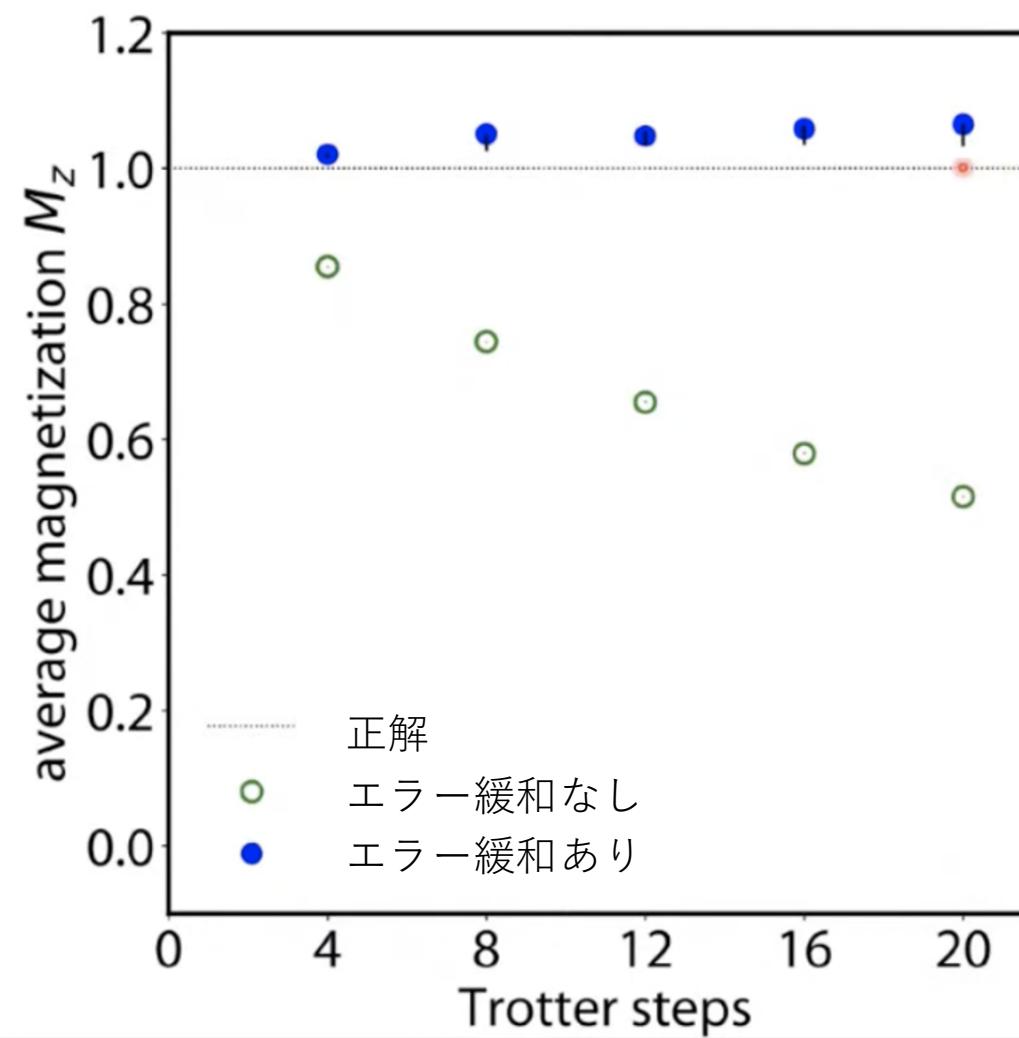
4 トロッター・ステップ

→ 線形より指数関数を用いた  
外挿がより良い結果

Exponential extrapolation:

1. Endo et al PRX 8, 031027 (2018).
2. Z. Cai, npj Quantum Information 7, 80 (2021)

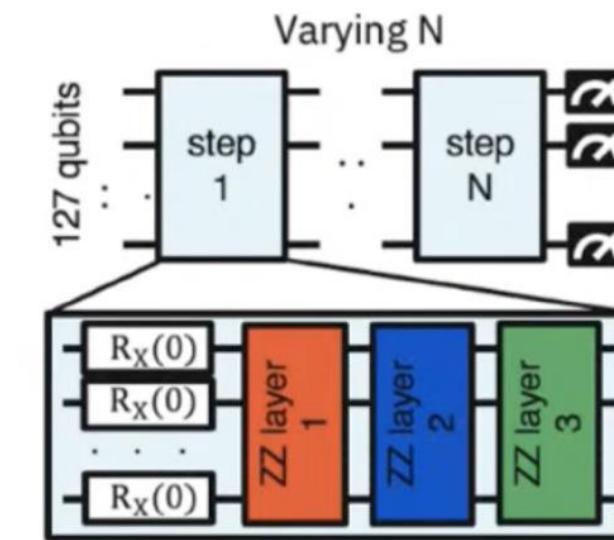
# 磁化率



$$M_Z = \frac{1}{127} \sum_q \langle Z_q \rangle$$

$\theta_h = 0$  : 横磁場なしの場合

20 トロッター・ステップ<sup>°</sup>  
(127 量子ビット × 60 レイヤー)



→ 20 トロッター・ステップ (CNOT深さ 60) でも ZNE で良い結果が得られた

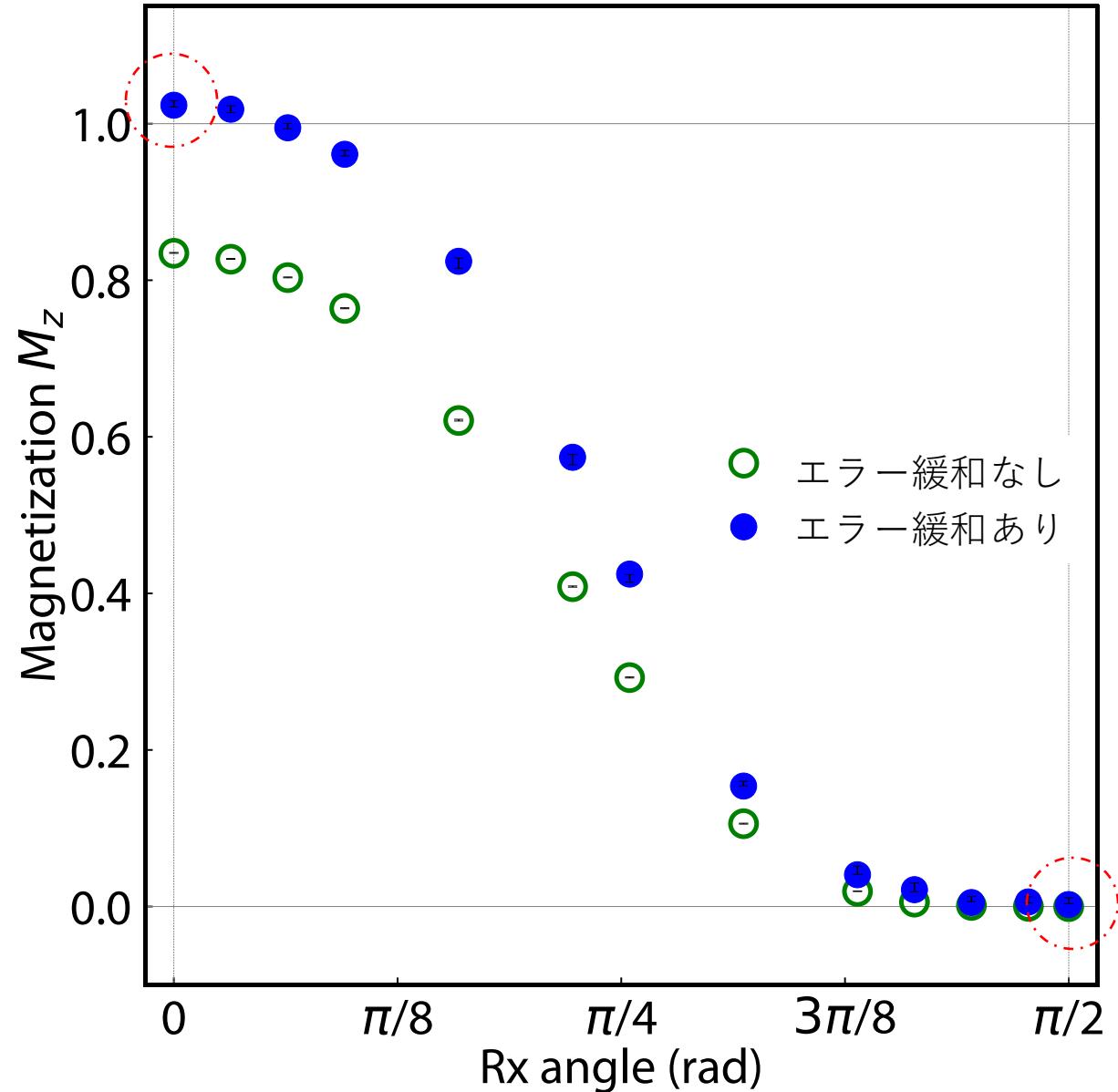
# 磁化率

$$M_Z = \frac{1}{127} \sum_q \langle Z_q \rangle$$

5 トロッター・ステップ  
(127 量子ビット × 15 レイヤー)

Clifford:  $\theta_h = 0, \pi/2$   
Non-Clifford:  $\theta_h \in (0, \pi/2)$

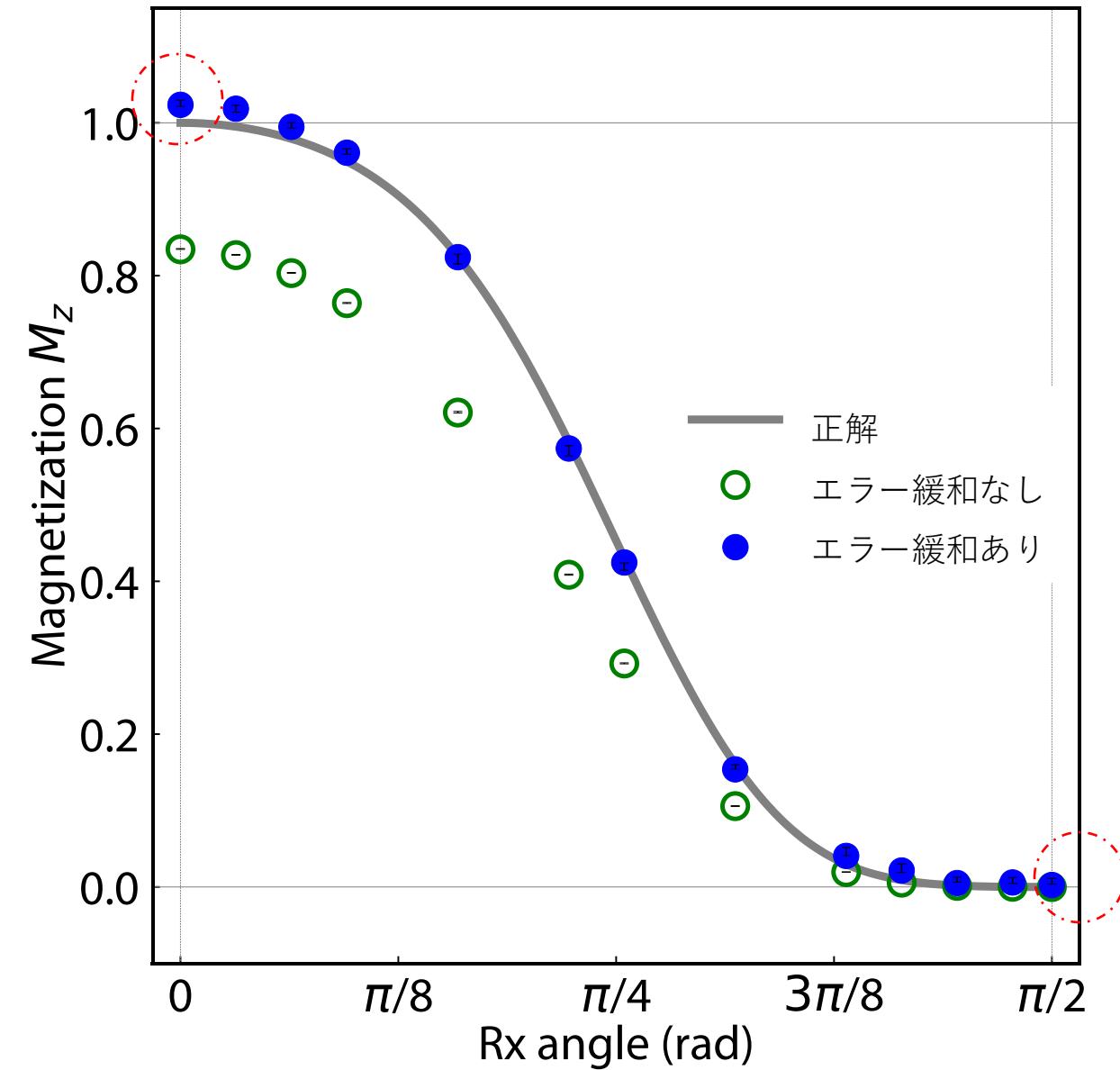
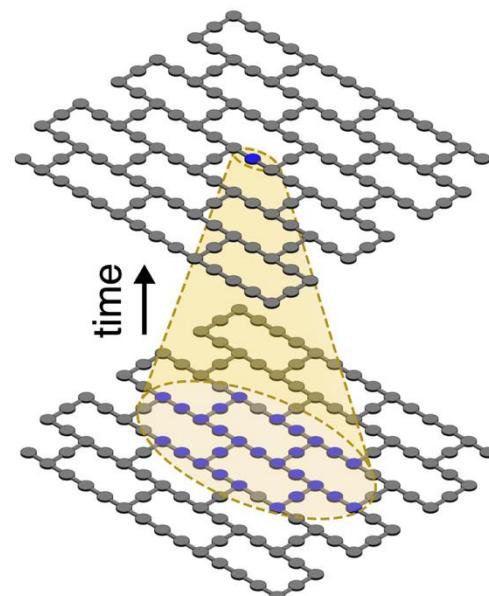
5 トロッター・ステップ  
(127 量子ビット × 15 レイヤー)



# 磁化率

5 トロッター・ステップ  
(127 量子ビット × 15 レイヤー)

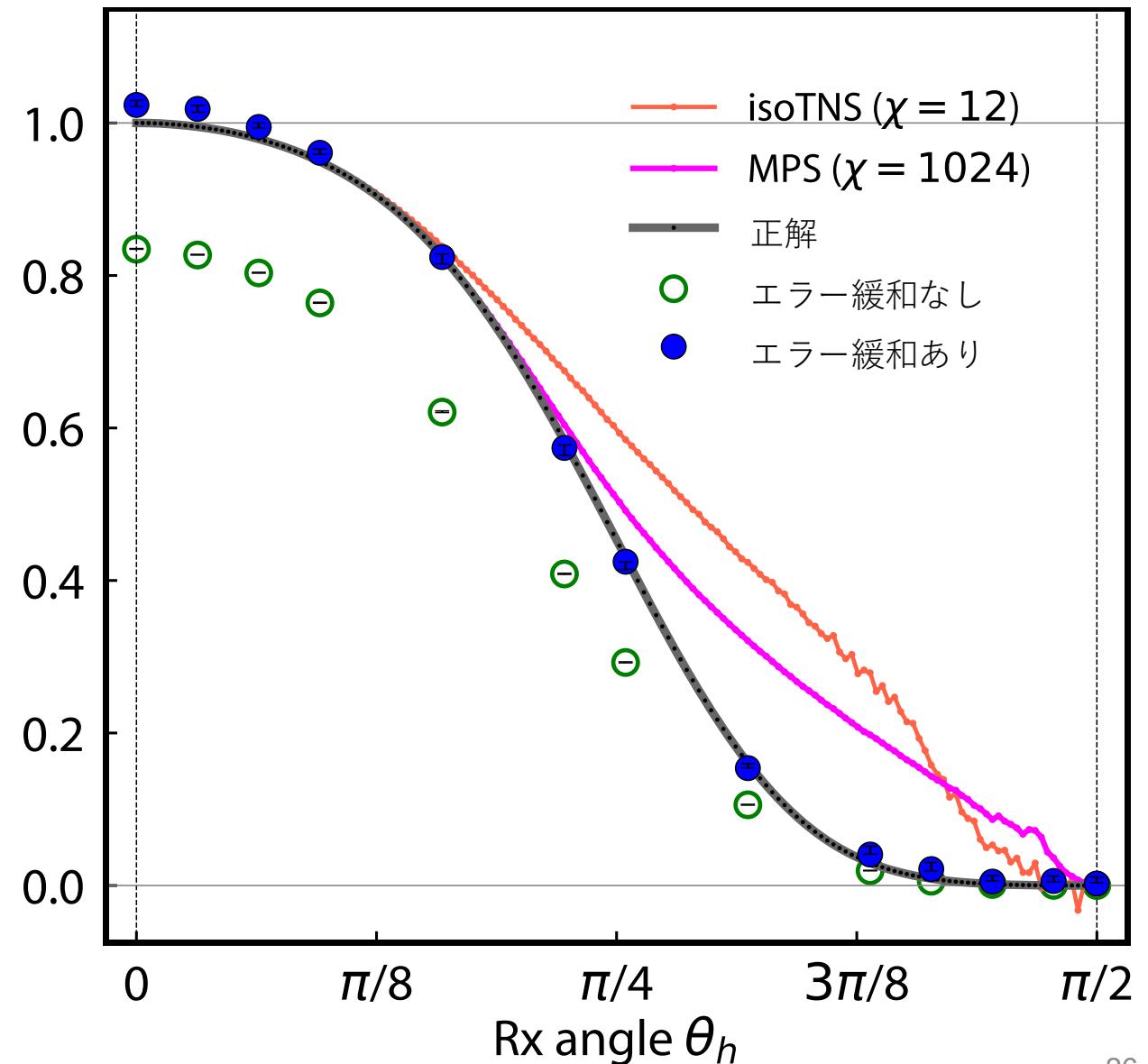
- 古典ではライト・コーン・リダクションによって非クリフォード回路の正確なシミュレーションが可能（ある程度まで）



# 磁化率

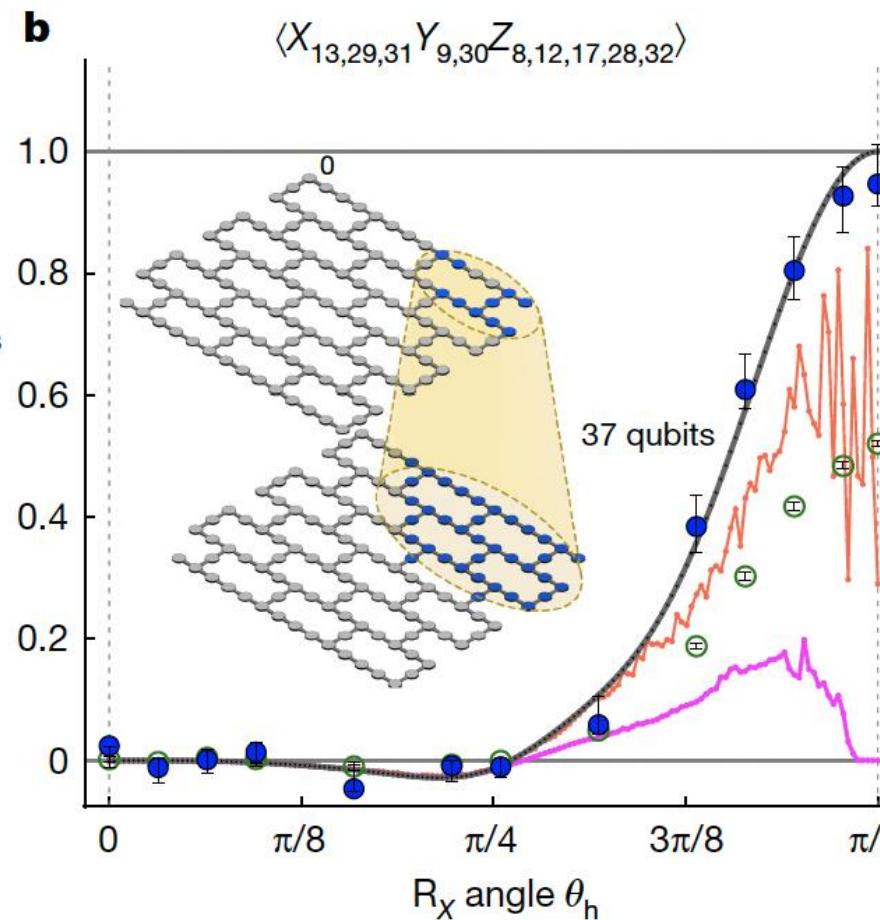
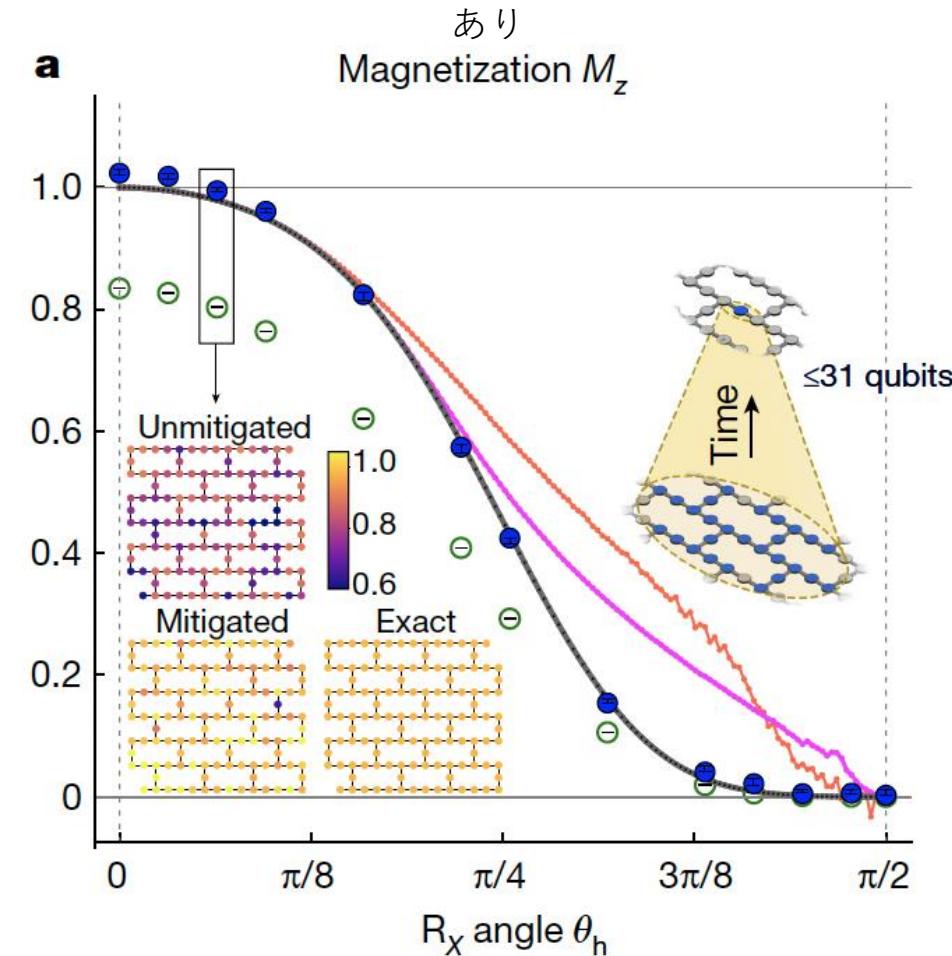
5 トロッター・ステップ  
(127 量子ビット × 15 レイヤー)

- 古典ではライト・コーン・リダクションによって非クリフォード回路の正確なシミュレーションが可能（ある程度まで）
- MPSとisoTNS手法はエンタングルメントが増えると計算に失敗する



# 正確に検証が可能な回路での実験結果

○ エラー緩和なし ● エラー緩和 — MPS ( $\chi = 1,024$ ; 127 qubits) — isoTNS ( $\chi = 12$ ; 127 qubits) — 正解

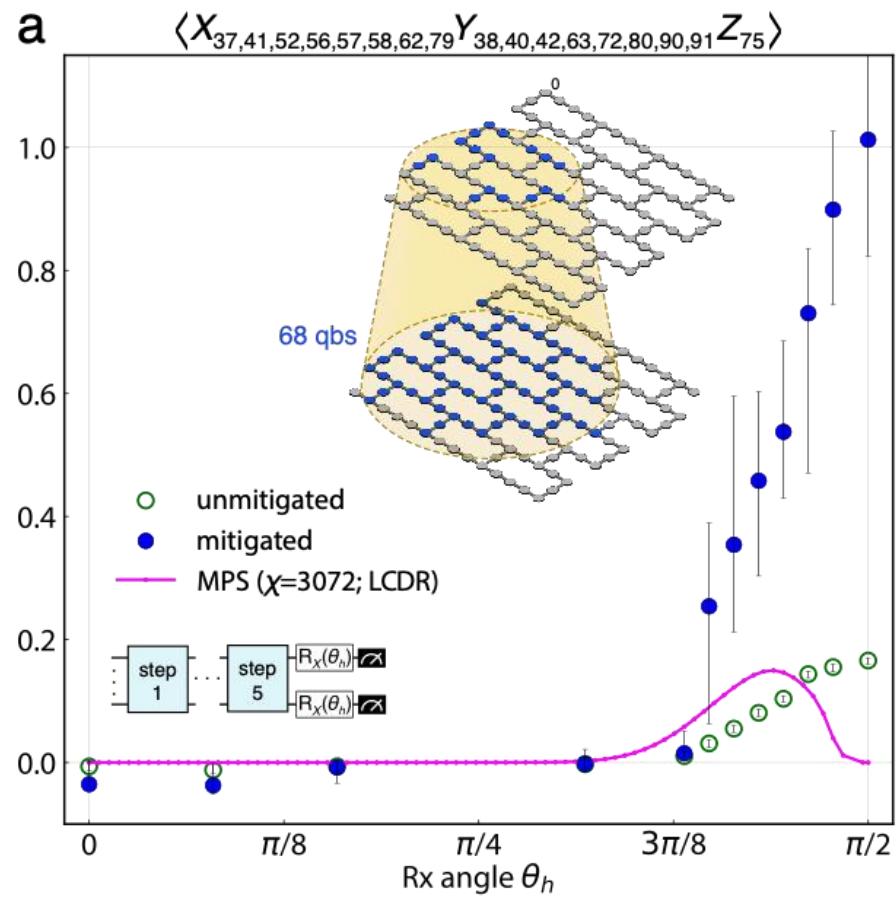


エラー緩和を用いた量子実験結果は正確な古典シミュレーションと一致

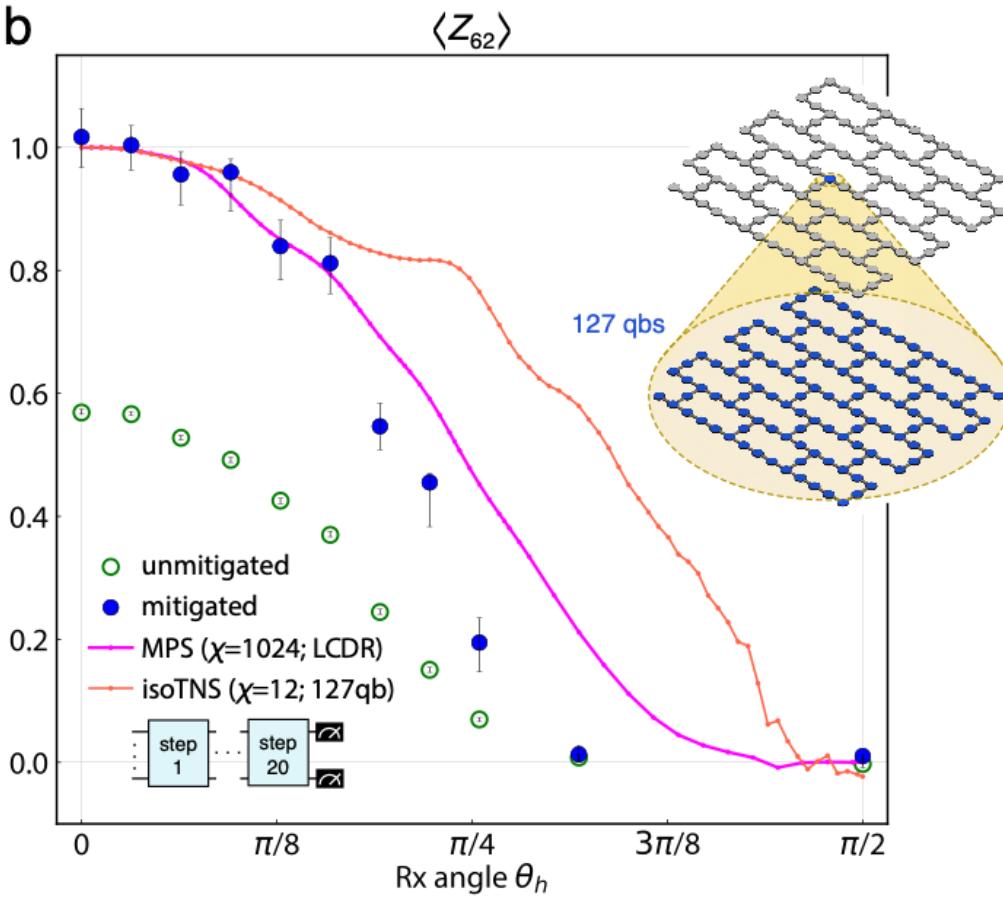
古典近似手法はエンタングルメントが増えると不正確になる傾向

# 正確な検証可能範囲を超えた実験

5トロッター・ステップ  
(127量子ビット × 15レイヤー)



20トロッター・ステップ  
(127量子ビット × 60レイヤー)



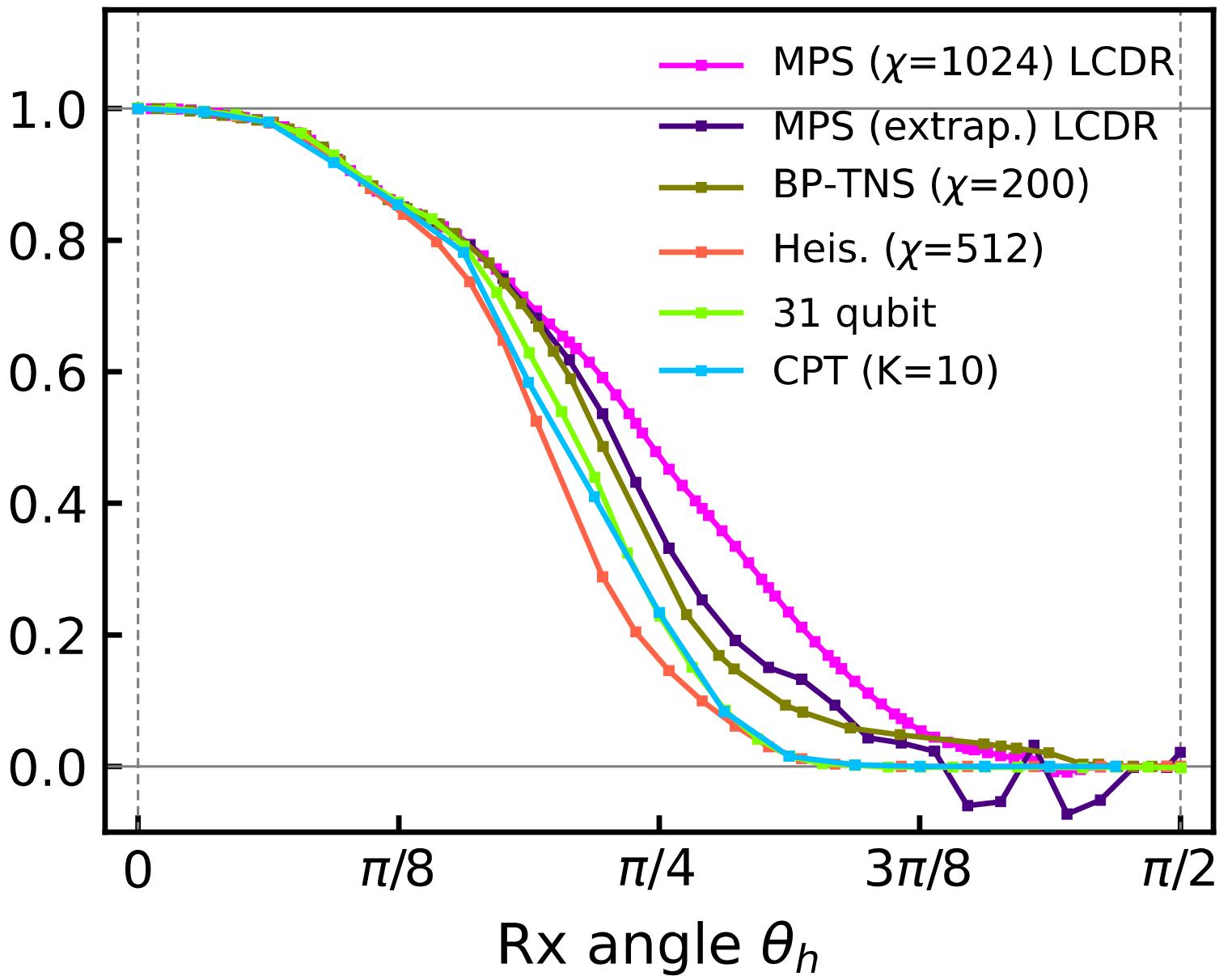
古典シミュレーションは量子の2-3倍の時間がかかるだけでなく結果が破綻

古典 : 30時間  
量子 : 9.5時間

量子ハードウェアでの実行は5分のみ。  
ランタイムのボトルネックは古典処理。

# 正確な検証可能範囲を超えたZNEを古典手法と比較

$\langle Z_{62} \rangle$



arXiv:2306.14887 (BP-TNS)

arXiv:2306.16372 (CPT)

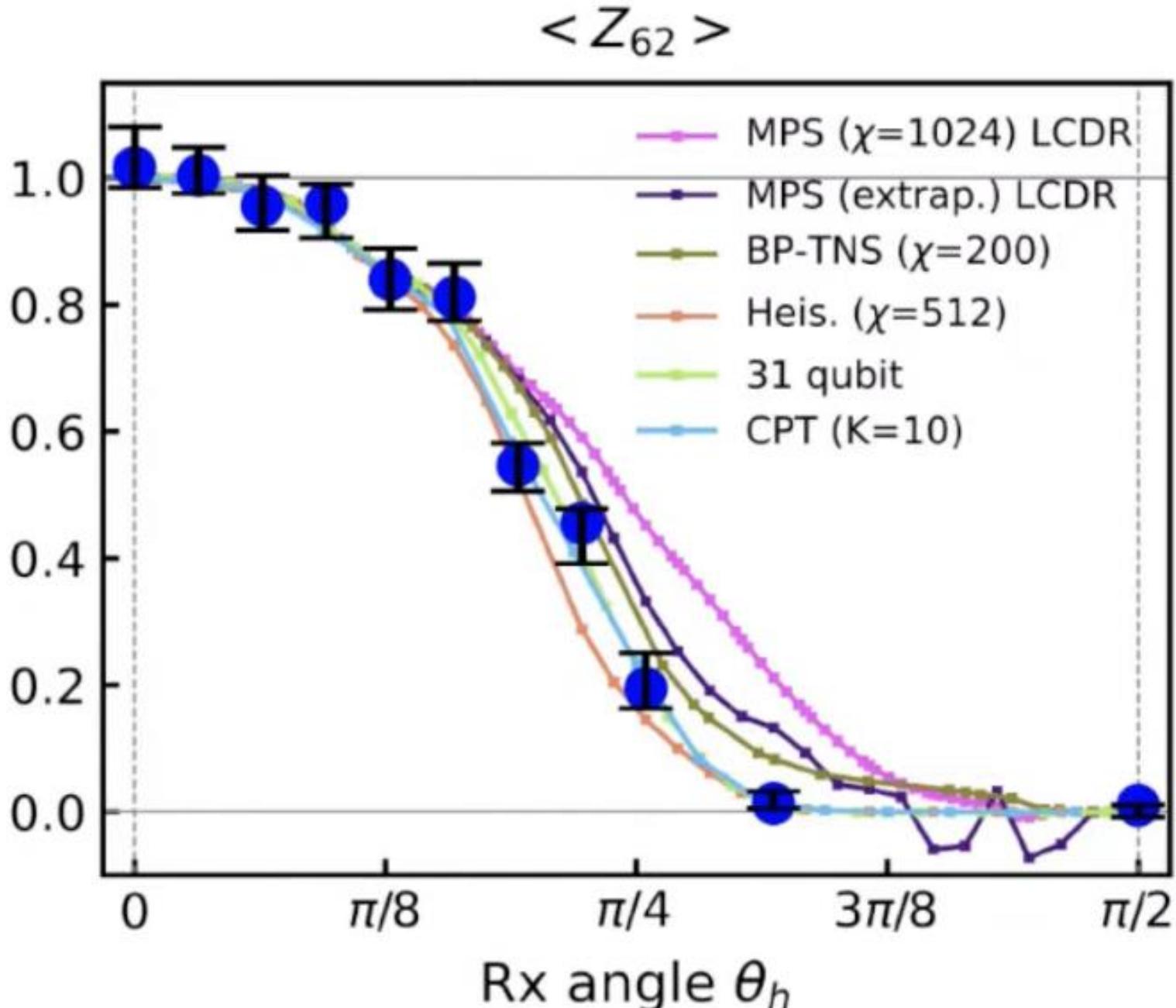
arXiv:2306.15970 (31 qubit)

arXiv:2306.17839 (MPS extrap., Heis.)

# 正確な検証可能範囲を超えたZNEを古典手法と比較

様々な古典手法はそれぞれ20%程度の誤差を持っていた。  
ZNEを用いた量子手法はそれらと同等の精度を示した。

arXiv:2306.14887 (BP-TNS)  
arXiv:2306.16372 (CPT)  
arXiv:2306.15970 (31 qubit)  
arXiv:2306.17839 (MPS extrap., Heis.)



今日の量子コンピューターによって、  
brute-forceな（愚直な・近似のない）古典計算を超えるスケールで信頼性のある  
結果を得られる  
(ただし、これは量子優位性ではありません)

# 最後に：もっと勉強したい方へ



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

ユーティリティー・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 日本語版

Quantum Tokyo 過去イベント資料

Quantum Tokyo



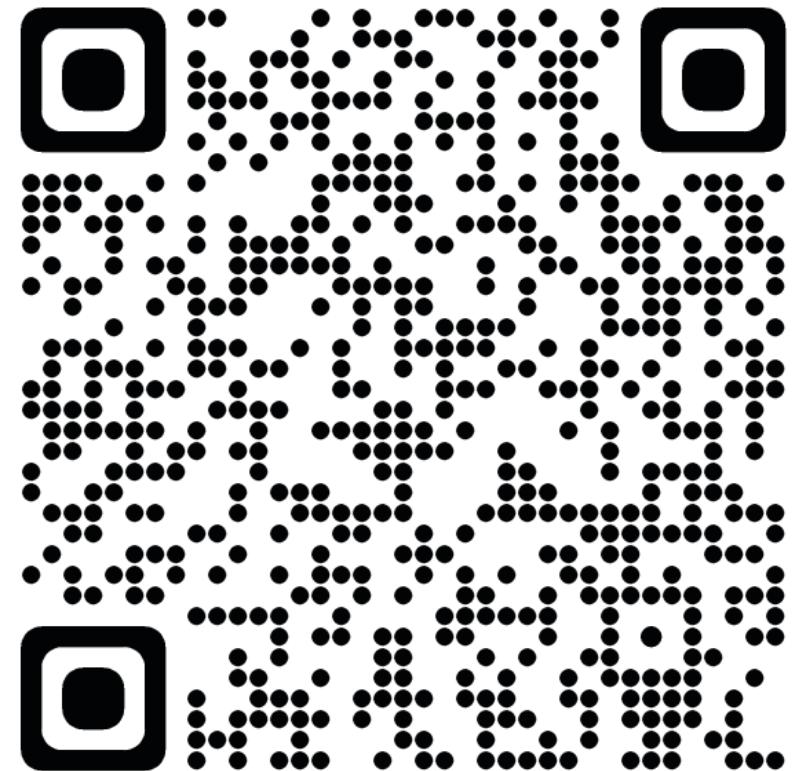
## ユーティリティー・スケール量子コンピューティング

### 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（ユーティリティー・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ーの実験 I](#)
13. [量子ユーティリティーの実験 II](#)
14. [量子ユーティリティーの実験 III](#)



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



# IBM Quantum Learning

## 「Utility-scale quantum computing」の日本語解説

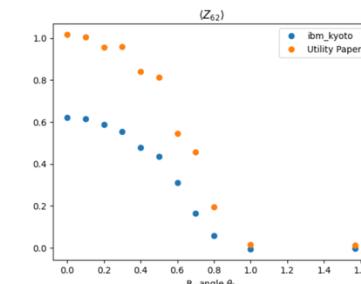
元のコース：<https://quantum.cloud.ibm.com/learning/en/courses/utility-scale-quantum-computing>

1. はじめに(飛ばします)
2. 量子ビット・量子ゲート・量子回路(7/7(月))
3. 量子テレポーテーション(7/16(水))
4. グローバーのアルゴリズム(7/16(水))
5. 量子位相推定(7/28(月))
6. 量子変分アルゴリズム(7/28(月))
7. 量子系のシミュレーション(8/22(金))
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ーの実験 I
13. 量子ユーティリティーの実験 II
14. 量子ユーティリティーの実験 III

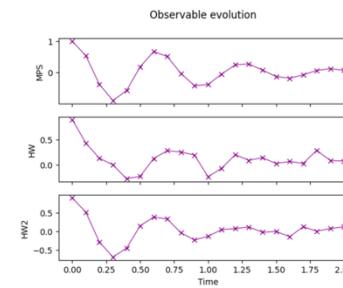


今回の回のJupyter notebookの和訳：  
<https://quantum-tokyo.github.io/introduction/courses/utility-scale-quantum-computing/quantum-simulation-ja.html>

I. Nature paper  
(127 qubits x 60 entangling gates)



II. 1D Transverse Ising model  
(70 qubits x 80 entangling gates)



III. The largest GHZ state challenge

