

# 量子コンピュータにおけるノイズモデルとその推定手法

東京大学素粒子物理国際研究センター 寺師研 M1 駒田 洲

## 研究背景

### 量子コンピュータ(QC)の現状

現在のQC ... NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum)  
中規模(100量子ビット程度)で誤り訂正が不十分なQC

- ・ 簡単な量子計算 ○
- ・ 素因数分解や量子シミュレーション ✗

量子優位性がある領域での計算はまだまだ先

将来のQC ... FTQC (Fault-Tolerant Quantum Computer)

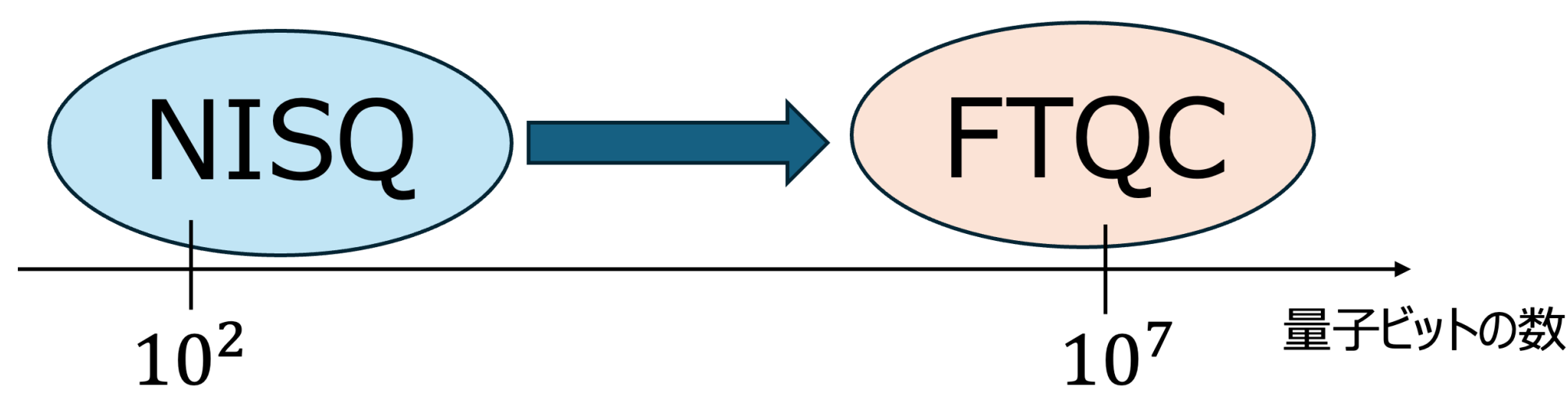


図1. NISQからFTQCに向けて

大量の量子ビットと量子誤り耐性が必要

### 量子誤り耐性の実現

量子ビットはかなり不安定(ノイズの影響を受けやすい)  
ノイズへの対処方法

- ・ 誤り訂正...複数の量子ビットを用いて情報を保護
- ・ 誤り抑制...測定結果に対し古典処理で補正
- ・ 誤り検出など

これらの手法の有効性はノイズに依存する

手法の性能評価をするにはノイズの特徴づけが必要

## 研究目的

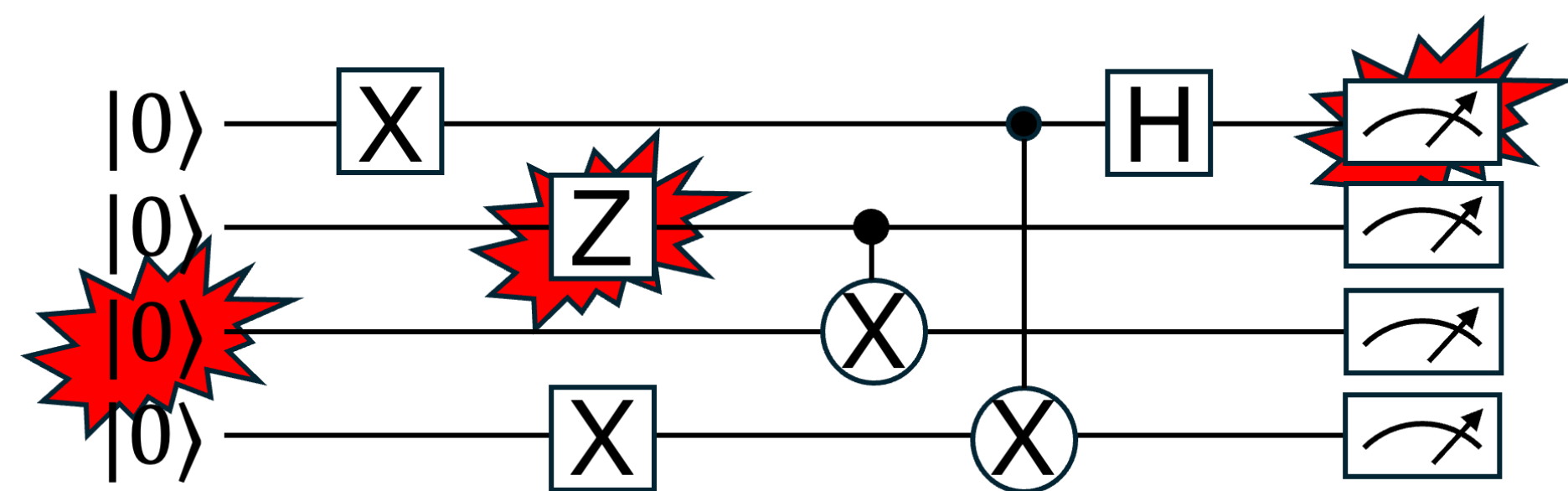


図2. QCにおける量子操作の概念図

1. 初期状態の準備
2. 量子ゲート操作
3. 測定

- ・ 各段階の物理的実装や誤り確率は異なる
- ・ 1と3のエラーはSPAM(State Preparation and Measurement)エラーと呼ばれ2と区別される

### 本研究はゲートレベルのノイズに注目する

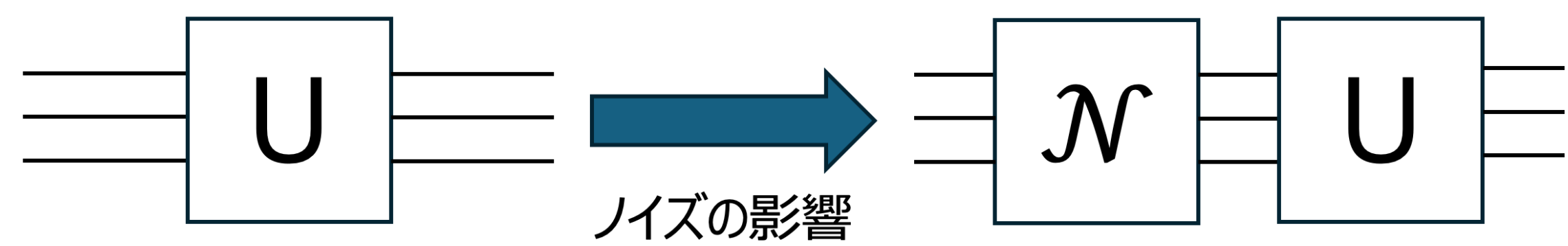


図3. ゲート操作におけるノイズの表現

理想的な量子ゲートに対し確率的にノイズチャンネルが作用していると考え

現在開発されている多くの確率推定プロトコルはノイズを単純なものとして仮定したものしか扱えない

➡ ノイズがマルコフ的であるという仮定している

マルコフ的...ノイズ同士で時間相関性がない(独立している)

しかし近年の研究でleakageエラーなど非マルコフ的ノイズの影響が深刻であることが懸念されている

非マルコフ的ノイズの推定プロトコルの開発を行う

## 先行研究[1]

推定手法開発の中で広く研究されているノイズモデル

... Pauliチャンネル

Pauli行列(X, Y, Z)が確率的に作用するチャンネル

### 先行研究で用いている定義

n量子ビットに対するPauli群

$$P^n = \{\pm I, \pm iI, \pm X, \pm iX, \pm Y, \pm iY, \pm Z, \pm iZ\}^{\otimes n}$$

Pauli演算子

$$P_a = \bigotimes_{k=1}^n i^{a_{x,k}a_{z,k}} X^{a_{x,k}} Z^{a_{z,k}}$$

各Pauli演算子が確率 $p_a$ で発生するPauliチャンネル

Pauliチャンネル

$$\Lambda(\rho) = \sum_{a \in \mathbb{Z}_2^{2n}} p_a P_a(\rho) P_a$$

Pauliエラー率 $p_a$ と等価なPauli固有値 $\lambda_b$ で書き換える

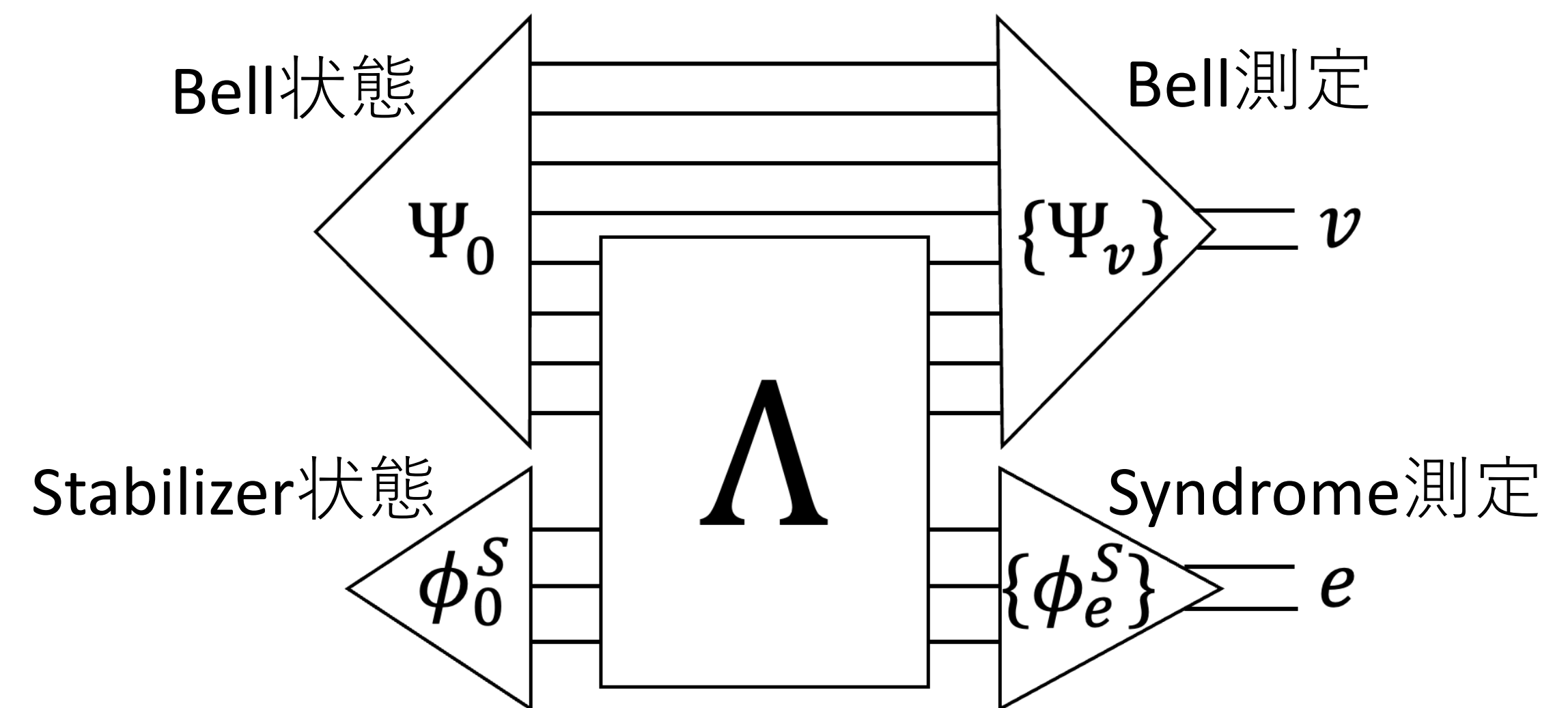
$$\Lambda(\rho) = \frac{1}{2^n} \sum_{b \in \mathbb{Z}_2^{2n}} \lambda_b \text{Tr}(P_b(\rho)) P_b$$

先行研究では $\lambda := \{\lambda_b\}_b$ の推定手法の提案を行っている

### 先行研究で提案した補助量子ビットを用いた推定アルゴリズム

n量子ビットのPauliチャンネル

k(k ≤ n)個の補助量子ビット



\*Stabilizer群...Pauli群の可換部分群

\*Stabilizer状態...Stabilizer群によって固定される状態

\*Stabilizer被覆 O...ある空間を埋め尽くすStabilizer群の集合

このアルゴリズムにおいて推定値 $\hat{\lambda}_a$ が $|\hat{\lambda}_a - \lambda_a| \leq \epsilon$ を $1 - \delta$ の確率で成功させるために必要なサンプル数は

$$N = \mathcal{O}(|O| \times n \epsilon^{-2} \log \delta^{-1})$$

このサンプル複雑性の評価を元に様々な手法に当てはめて補助量子ビットの指数関数的有効性などを議論している

## 今後の展望

- ▶ 先行研究について、対角成分しか考えていないためより一般的なPauliチャンネル $\Lambda(\rho) = \frac{1}{2^n} \sum_{b \in \mathbb{Z}_2^{2n}} \lambda_{ab} \text{Tr}(P_a(\rho)) P_b$ を用いてサンプル複雑性の条件を確認
- ▶ 相関を持ったPauliチャンネルについてこのプロトコルに適應させることを考える

## まとめ

- ▶ FTQCの実現にはノイズ制御システムの確立が重要
- ▶ 誤り訂正や誤り抑制の有効性はノイズの種類に依存する
- ▶ 本研究ではあまり研究が進んでいないが、ノイズ制御の中で重要な非マルコフ的ノイズの特徴付けを目指す
- ▶ 今は一旦先行研究の拡張を考えている

## 参考文献

[1] Senrui Chen, Sisi Zhou, Alireza Seif, Liang Jiang, Physical Review A **105**, 032435 (2022).