

量子情報の記録とエラー訂正

1 古典情報の記録とエラー訂正

- 古典情報 → 情報をビット 0、1 に変換
- ビットは電圧の高低などのマクロな古典系に記録
→ 稀に熱や磁場でビット反転エラーが発生
- そこで、 $0 \rightarrow 00 \dots 0$, $1 \rightarrow 11 \dots 1$ とビットを複製
→ 少数のビット反転は多数決で復元可能

2 量子情報の記録とエラー訂正

- 量子情報 → 情報を量子状態 $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ に変換
- 量子状態は原子レベルのミクロな量子系に記録
→ 2 種類のエラーがあり、エラーが発生しやすい
 $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \rightarrow \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$: ビット反転エラー
 $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \rightarrow \alpha|0\rangle - \beta|1\rangle$: 位相反転エラー
- しかも、同じ情報を持つ状態を複製できない
→ ミクロな系の性質。多数決以外の手法が必要

2.1 手法例 1: トーリックコード

- トーリックコード [1] : 量子エラー訂正の手法
浮き輪型の立体 (トーラス) の表面を用いる
- トーラスの穴の数が重要
→ 空間的な特徴を利用して量子情報を保護

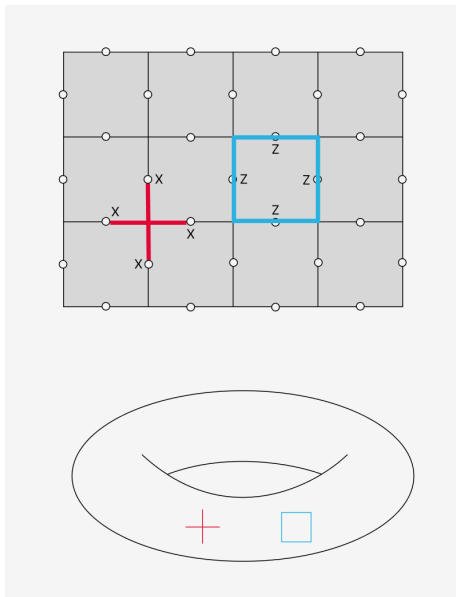


図 1: トーリックコード。トーラス上の正方格子の辺上にスピン 1/2 粒子を配置し、赤と青で示されたような 4 体のスピン相互作用を考える。穴の数が g 個のとき $2g$ 個の量子ビットを収納できる。

2.2 手法例 2: ハニカムコード

- ハニカムコード [2] : 量子エラー訂正の手法
「チェック演算子」と呼ばれる量を周期的に測定
- チェック演算子の測定の順番が重要
→ 時間的な特徴を利用して量子情報を保護

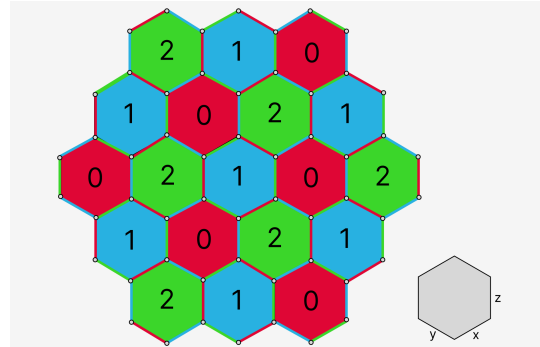


図 2: ハニカムコード。トーラス上の六角格子の頂点にスピン 1/2 粒子を配置し、0、1、2 の番号がついた辺に対して 0、1、2、0、1、2... の順に二体のスピン演算子 (チェック演算子) を測定する。ただし、 i 番目の番号がついた面同士を結ぶ辺に番号 i が割り当てられ、チェック演算子は傾きが正の辺に対して XX 、負の辺に対して YY 、垂直な辺に対して ZZ の形をしている。

3 量子エラー訂正の物理

- 量子エラー訂正は、基礎理論の観点からも興味深い
例 1) トーリックコード
→ 「トポロジカル秩序相」と呼ばれる新奇な相や奇妙な統計性を持つ準粒子「エニオン」が出現する
例 2) ハニカムコード
→ 測定による量子状態操作の理論の発展に寄与?
- 量子系の実験技術は近年飛躍的に進歩しており、それと共に理論も日々発展している

参考文献

[1] A. Kitaev. “Fault-tolerant quantum computation by anyons” *Ann. Phys* **303.1** (2003) : 2–30.
[2] M. B. Hastings and J. Haah. “Dynamically generated logical qubits” *Quantum* **5.564** (2021).