

## 誤り耐性量子計算のしくみと大規模計算のオーバーヘッド

### Fault-tolerant quantum computing and its overheads in a large-scale limit

東大工 小芦雅斗

Univ. of Tokyo, <sup>o</sup>Masato Koashi

E-mail: koashi@qi.t.u-tokyo.ac.jp

量子コンピュータがその真価を発揮するには、現状よりもさらなる大規模化が必要であるが、そのためには、随時発生するエラーから量子状態を守りながら計算を進める仕組みが不可欠と考えられている。多数の物理量子ビットを用いて少数の論理量子ビットの情報を格納する量子エラー訂正符号を用いることで、エラーから情報を保護できるが、量子計算ではそれに加えて、論理量子ビットに対する演算やエラーの訂正を誤りのあるゲート操作を用いて実行する必要があり、その仕組みは誤り耐性量子計算 (FTQC) と呼ばれている。FTQC の理論の最大の特長はしきい値定理と呼ばれ、ゲート操作や量子ビットの不完全性のあるしきい値以下に抑えれば、原理的にはいくらでも大規模な計算を実行できることを保証する。

本講演では、FTQC の典型的な仕組みについて説明したうえで、計算が大規模になる極限で、FTQC のどのような構成が効率的か、という問いに関する研究の進展を紹介する。効率の指標はオーバーヘッドと呼ばれ、1 論理量子ビットあたり物理量子ビットを何個使用するかを空間オーバーヘッド、論理量子ビットの回路の 1 ステップの実行に物理量子ビットの回路上で何ステップ要するかを時間オーバーヘッドと呼ぶ。FTQC 理論の黎明期に提案された Steane 符号に基づく連接符号や、固体素子の制約からこれまでよく議論されてきた表面符号は、ともに符号内に 1 個の論理量子ビットを格納する方式のため、大規模計算用に符号が大きくなると、空間オーバーヘッドも大きくなってしまふ。これに対して、複数の論理量子ビットを一度に格納し、しかもその符号化効率を一定以上に保って規模を拡大できる量子 LDPC 符号が提案され、これを用いた FTQC では空間オーバーヘッドが定数に抑えられることが示された。ただし、時間オーバーヘッドのスケールリングは従来の FTQC よりも却って悪化していた。一方、昔ながらの連接符号に基づく手法も、符号化効率が 1 に漸近する量子ハミング符号を接続する、という形に拡張され、より良い時間オーバーヘッドスケールリングで定数空間オーバーヘッドを実現する FTQC が提案されている。さらに最近では、量子 LDPC 符号の FTQC の改善が進み、Steane 符号や表面符号と同じ時間オーバーヘッドスケールリングで定数空間オーバーヘッドを実現できることが明らかになった。これらの結果は、適用するエラーモデルの違いもあって単純な比較はできないものの、誤りのもとで大規模量子計算を行うにはどんな構造が最も効率的なのか、というのはある種の究極的な問いであり、今後の研究の進展にも興味をもたれるところである。

本講演の内容の一部は、JST【ムーンショット型研究開発事業】 Grant 番号【JPMJMS2061】の支援を受けたものです。