

エンタングル状態を測定して作る量子コンピュータ



竹内 勇貴

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
yuki.takeuchi.yt@hco.ntt.co.jp

近年、Googleの研究チームによって行われた量子超越性の実証実験を発端に、量子コンピュータへの注目がさらに増している。古典力学に基づいた現在の古典コンピュータが情報を0, 1のビットで表現するのに対して、量子コンピュータでは量子ビットとよばれる量子二準位系を用いる。そのため、重ね合わせやエンタングルメントなどの量子力学的性質を計算に利用することができ、量子系のシミュレーションの効率化などに繋がると期待されている。

大規模でエラー訂正可能なフルスペックの量子コンピュータは未だ実現されていないが、小規模のものであればすでにIBM, Google, Rigetti Computing, 中国科学技術大学の研究チームが超伝導を、IonQがイオントラップを用いて実現している。これらの量子コンピュータは、量子回路モデル（または量子ゲート方式）とよばれる量子計算モデルを基にして構築されている。このモデルでは、最初に複数の量子ビットを準備し、それらに量子ゲートとよばれる量子操作を行うことで量子計算を実現しており、古典計算のアナロジーとして捉えることができる。

しかし、様々な物理系で量子コンピュータを構築することを考えたとき、量子回路モデルとの相性がよくない場合がある。そのため、量子回路モデルと計算能力の意味では等価だが計算方法が全く異なる量子計算モデルが複数提案されており、それらは量子コンピュータの新たなアーキテクチャを提供してくれる。その中でも特に有望なのが、測定型量子計算という量子計算特有のモデルである。本モデルでは、はじめに適切なエンタングル状態を準備し、それを

1量子ビットずつ測定するだけで任意の量子計算を行うことができる。重要な特徴として、計算内容に依存して変わるのは測定のパターンだけであり、最初に準備するエンタングル状態の形は内容に依存しない。計算内容に無依存な部分とそうでない部分に分割できるという性質は、量子回路モデルにはない測定型量子計算特有の性質である。また、測定型量子計算とイジングモデルの分配関数やSPT相が関連していることもわかっており、量子計算と物性物理の関係性の深化にも貢献している。

測定型量子計算を実現したいと考えたとき、計算内容に依存しないエンタングル状態の準備は、量子アルゴリズムを走らせる前に成功するまで繰り返せばよく、多少複雑でも問題ないと言える。一方で、その後に行う測定は量子アルゴリズムを走らせることに相当するため、可能な限り簡易に行えることが望ましい。このような背景から、必要な測定の種類を削減するための様々な取り組みが行われてきた。

我々は新たなハイパーグラフ状態を発見することで、必要な測定を2種類のパウリ測定にまで削減できることを理論的に示した。また、我々のハイパーグラフ状態は、どれだけの精度で正しく準備できているかのチェックも同じ2種類のパウリ測定だけで効率よく行える。そのため、我々が提案した測定型量子計算は、計算とその結果のチェックを2種類のパウリ測定だけで効率よく行える簡易性の高いものになっている。本成果は、大規模でエラー訂正可能なフルスペックの測定型量子計算の実現を促進するものであると期待できる。

用語解説

量子超越性：

スーパーコンピュータを含んだあらゆる古典コンピュータに対する、量子コンピュータの優位性のこと。

SPT相：

対称性によって保護されたトポロジカル相のことで、ある対称群 G のもとで不変な量子状態が有するエンタングルメントから生じる。SPT相は、対称群 G によって保護されたエンタングルメントの存在を示唆する現象だとみなせる。

ハイパーグラフ状態：

エンタングル状態の一種で、従来の測定型量子計算において利用されていたグラフ状態を一般化したもの。量子状態をハイパーグラフで表現できるため、この名でよばれている。測定型量子計算やベル不等式など様々な量子情報処理に応用されているだけでなく、SPT相との関連性が議論されるなど物性物理でも有用な量子状態である。

パウリ測定：

パウリ X, Y, Z 基底での3種類の測定の総称で、単一量子ビットに対する測定操作である。本稿では、パウリ X, Z 測定のみを扱う。