

論文の内容の要旨

論文題目 自然な相互作用による論理量子ビットの駆動法

氏名 國分 直明

量子系の時間発展は環境との相互作用がノイズとなり容易に乱れてしまう(デコヒーレンス)。量子系の本来の時間発展を維持することは、量子系の本来の性質を調べる基礎研究に役立つだけでなく、応用上も、例えば量子計算機で有意義な結果を得るために必要なことなので、非常に重要である。デコヒーレンスを防ぐ手法はいくつかあるが、本研究では任意のエラーに対応できるという汎用性を持つ量子誤り訂正に着目した。

量子系の時間発展に量子誤り訂正を適用するのは簡単ではない。このことを説明するために、例えば2準位系(量子ビット)のラビ振動に量子誤り訂正を適用する。ラビ振動に量子誤り訂正を適用すると、単一の量子ビットの時間発展であるラビ振動 $\cos(\omega t)|0\rangle + i\sin(\omega t)|1\rangle$ を、複数の量子ビット系の特別な2次元部分空間(コード空間)内の時間発展 $\cos(\omega t)|0_L\rangle + i\sin(\omega t)|1_L\rangle$ で再現することである。任意のエラーに対応できるコード空間は、例えば 2^9 次元ヒルベルト空間の中の

$$|0_L\rangle = (|000\rangle + |111\rangle)(|000\rangle + |111\rangle)(|000\rangle + |111\rangle)/\sqrt{8}$$

$$|1_L\rangle = (|000\rangle - |111\rangle)(|000\rangle - |111\rangle)(|000\rangle - |111\rangle)/\sqrt{8}$$

で張られる2次元部分空間である。9量子ビット系の状態をコード空間内に留めつつ、さらにラビ振動を再現するのは容易ではない。

この困難に対して、従来の方は計算機理論に端を発していることもあり、コード空間内の時間発展を万量子ゲートと呼ばれる代表的なユニタリー変換の組み合わせで実現する。その際、必要な時にゲートをオンにして、邪魔になった時にゲートをオフにできると仮定される。万量子ゲートには2つの量子ビットに対するユニタリー変換も存在するので、ゲートのオンオフは相互作用のオンオフを意味する。そのため、従来の方は相互作用のオンオフが容易である物理系を量子ビットとする場合に適している。例えば、光子の左右の偏光を量子ビットとする系では、放っておけば相互作用がオフになり、

非線形光学効果を起こす物質を置けば相互作用がオンになる。ただし、相互作用をオンオフできる物理系で1つ1つのゲートを精度良く実行するのは難しく、ゲートを多数回実行しようとする、さらに困難になる。量子ビット系の状態をコード空間に維持するためには多数のゲートを実行する必要があり、さらにコード空間内で状態変化させるには非常に多数のゲートが必要になる。

そこで、本研究では相互作用をオンオフしない方法を考える。そのために、近くに配置された量子ビット同士に自然に相互作用が発生する物理系を量子ビットとし、その相互作用が常にオンである状況で、量子系の状態をコード空間に維持するための時間発展と、コード空間内で状態変化させる時間発展の両方を実現することを目指した。用いる相互作用は可能な限り物理的で自然なものを考え、量子ビットを配置しただけで目的の時間発展が駆動されることを目指した。

この方法では近くの量子ビット同士の相互作用が常にオンになっているので、好きな時にオフにできる従来の方法には無かった問題に対処する必要があった。対処した問題の1つ目は、単純なエラー訂正では時間発展を乱すので、特定の手順に従ってエラー訂正する必要がある点。この点について、ノイズのモデルを設定して、具体的に量子誤り訂正を実行しながらのハミルトニアン時間発展を計算して、手順の詳細について解析した。対処した問題の2つ目は、時間発展を止めることができない点。従来の方法では、例えばコード空間に状態を維持するためのゲート操作中は、コード空間内で状態変化させるゲート操作を止めておける。常にオンにしている本研究では、この2種類の時間発展を同時に駆動する必要があるので、一方の時間発展が他方の時間発展に悪影響を及ぼしていないかを慎重に検討し、一部で特殊なエラー訂正を行えば影響はないことを明らかにした。それ以外にも、目的の相互作用を生じるための配置にどの程度の自由度があるのかを明らかにし、この方法による量子誤り訂正の適用の実現性を向上させた。