

超伝導量子コンピュータの実現に向けて

Towards realization of superconducting quantum computers

東大先端研¹, 理研 CEMS² °中村 泰信^{1,2}

UTokyo¹, RIKEN², °Yasunobu Nakamura^{1,2}

E-mail: yasunobu@ap.t.u-tokyo.ac.jp

近年、量子情報処理、特に量子計算に向けた研究が盛んに行われている。依然として大規模な量子コンピュータを実現するのは容易ではないが、様々なプラットフォームの上で、量子ビットを実装し、その制御・観測を高い忠実度で行うことが可能になってきている。特に、量子ゲート方式の量子コンピュータの研究としては、数 10 ビット規模の集積化が可能となりつつあり、基礎的な評価と、古典計算機に対する優位性の実証を目指した実験が進められている。理論の面から、その可能性が模索されている段階である。

超伝導回路を用いる量子コンピュータ実現へ向けた試みも、大学や国の研究機関だけでなく大企業やスタートアップ企業も巻き込んで、世界中で活発化している。超伝導回路上では電子の集団励起の自由度を量子力学的に制御することが可能であり、人工的な量子系としての量子ビットを回路設計によって実現することが可能である。約 10 GHz の共鳴周波数を有し熱揺らぎを極力抑えるため 10 mK 程度の極低温環境下で使用される超伝導量子ビットは、ジョセフソン接合の非線形インダクタンスを利用した高い Q 値を持つ非線形 LC 共振回路に他ならない。巨視的なサイズ（典型的には 100 μm ~ 1 mm）の回路でありながら、100 μs を超えるコヒーレンス時間が実現されており、10 ~ 100 ns 程度の時間を要する量子ゲート操作を多数行うことができる。量子ビット読み出しも 100 ns 程度の時間で非破壊に行うことが可能である。近年、これらの制御・観測の忠実度が 99%程度まで向上し、誤り耐性量子計算の実装に必要とされる閾値に迫りつつある。量子ビットのコヒーレンスの改善においては、デコヒーレンス機構の解明や作製プロセスの向上など、不断の努力が継続中である。

一方で、集積化された量子ビットの実装においては、1 量子ビット・2 量子ビットのみの実験では問題にならなかった新たな技術的課題が顕在化してくる。量子ビットを 2 次元平面上に稠密に集積化しようとする、制御・観測のための配線の取り回しが困難になる。超伝導量子コンピュータは基本的にマイクロ波パルスで制御・観測されるので、高忠実度の実現のためにはクロストークに十分に注意する必要がある。また量子ビット周辺の配線が量子ビットのデコヒーレンスに与える影響も考慮する必要がある。さらに制御信号の揺らぎもデコヒーレンスを引き起こす要因であり、周辺エレクトロニクスにも高い性能が要求される。

本講演では、超伝導量子コンピュータ開発の現状を概観し、そこに現れる様々な課題に対するアプローチについて議論する予定である。