

分散型量子計算に向けた ナノ光ファイバー共振器量子電気力学系



青木 隆 朗

早稲田大学理工学術院
takao@waseda.jp

共振器に閉じ込められた光と原子が量子力学的に相互作用する系を共振器量子電気力学 (Cavity Quantum Electrodynamics, CQED) 系という。CQED系では、共振器内の量子ダイナミクスを光と原子のコヒーレントな相互作用が支配し、通常の系では散逸過程に阻まれて困難な、純度の高い量子状態の生成や特異な現象の観測が可能になる。これらの特長から、CQED系は光と原子の量子性を探求する上で理想的な実験対象であり、量子力学の基礎に関わる重要な問題がCQED系を用いて実験的に調べられてきた。さらに次の段階として、CQED系をユニットとしてこれを多数結合した量子ネットワークの実現が期待されている。

また、CQED系は量子計算の実現に有力な系であると期待されている。特に近年では、光共振器の代わりに超伝導電気回路を、自然原子の代わりに人工原子を用いた回路量子電気力学 (circuit QED) 系が考案され、世界中の多くのグループが circuit QED 系に基づいた量子計算機の実現を目指した研究を進めている。

しかし、circuit QED系に限らずどの物理系を用いた実験でも、現在実装できている量子ビットの数は数ビット~数十ビット程度に留まっており、現在の技術の延長では将来的にも数百ビット程度が限界であると考えられている。この限界を打破り、大規模な量子計算を実現する方法として、多数の小規模な量子計算機を接続してネットワーク化する**分散型量子計算**の手法が提案されている。すなわち、量子ネットワークによる量子計算である。

ここで、circuit QED系では、光子の周波

数がマイクロ波領域であり、量子性を保つためには接続チャンネルを含めた系全体を数 mK 程度の極低温に冷却する必要があるため、そのままでは分散型量子計算に適さない。室温でも量子性を失わない光領域の光子で circuit QED 系をネットワーク化するために、マイクロ波光子を光領域の光子に変換する研究も進められているが、高い効率の実現は大きな課題である。

そのため、光領域の光子と直接相互作用するイオントラップ系を用いた手法が分散型量子計算の実装として有力視されている。しかし、イオントラップ系を用いた手法は、ユニット間の接続が確率的にしか動作しないため、効率が悪い。

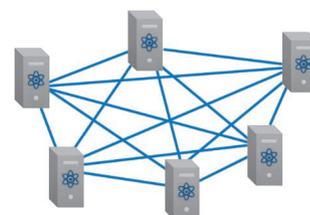
一方、光領域のCQED系を用いた分散型量子計算の手法が理論的に研究されている。光領域のCQED系を用いた手法は、ユニット間の接続が決定論的に動作するという大きな利点をもつ。しかしながら、従来の光領域のCQED系は自由空間共振器を用いたものであり、スケーラビリティに乏しい。さらに、ファイバー光学との整合性が悪く、極度に複雑で精密な調整・制御が必要なため、損失を低く抑えつつ多数のCQED系を連結してそれらを同時に使用することが極めて困難であった。

これに対し、最近、さまざまなナノフォトニクスデバイスを用いたCQED系の研究が次々と始まっている。特に、**ナノ光ファイバーCQED系**は、ファイバー光学との整合性が高く、スケーラビリティに優れる。さらに、共振器との結合レートを保ったまま多数の原子を結合可能という特長ももつため、量子ネットワークや分散型量子計算の実現に適していると期待される。

用語解説

分散型量子計算：

小規模な量子計算機を多数接続してネットワーク化し、ネットワーク全体で大規模な量子計算を実行する手法。



ナノ光ファイバー共振器量子電気力学系：

ナノ光ファイバーとファイバーブラッグ格子を組み合わせた「ナノ光ファイバー共振器」を用いた共振器量子電気力学系。原子はナノ光ファイバーのウェイスト部近傍に光トラップされ、共振器モードのエバネッセント場と強く相互作用する。

