Qubits ride the photon bus

光子バスに乗る量子ビット

Antti O. Niskanen、中村泰信

電気回路をまるごと使った量子力学など、実現の可能性はないように思われるかもしれない。けれども、超伝導状態にある電気回路を利用すれば、原子が光子を放出したり吸収したりするのと同様に、しかもそれ以上の効率で、単一の光子を送ったり捕らえたりすることが可能になるのである。

Nature Vol.449 (415-417) / 27 September 2007

光と物質の相互作用は至るところにみられる。我々が周囲の物体を見ることができるのは、それを構成する原子が絶えず電磁波を放出したり吸収したりしているからだ。可視光だけでなく、 γ 線からラジオ波までのすべての電磁波、送電線の交流やデジタルコンピューターの内部のギガヘルツクロックの信号でさえ、基本的には同じものが異なるエネルギースケールで現れているにすぎない。それは、電磁エネルギーの不連続な塊、すなわち光子の伝播である。

通常の場合では、単一の光子の有無によって物理現象に顕著な違いは現れない。けれども、量子コンピューティングという新しい研究分野では、必ずしもそうとは限らない。本号（Nature 2007 年 9 月 27 日号）に掲載された Sillanpää ら¹と Majer ら²による 2 本の論文の重要性は、まさにこの点にある。著者らがここで報告した実験は、電気抵抗がゼロになるように低温下に置かれた超伝導回路において、互いに離れた位置にある 2 つの量子ビット（キュービット）の間で単一の光子が量子情報を転送するというものである。先週号に掲載された Houck らの関連論文は³、同様な超伝導回路を利用してチップ上で単一の光子を生成させる方法を実証したものであった。これら 3 本の論文は、我々が大規模量子コンピューターの実現という究極の目標に着実に近づいていることを示している。一方でこれらの論文は、自然界に遍在する原子と光の相互作用を科学が模倣できることを示した点でも大きな意義がある。

原則として、実用的な量子コンピューターは、多数の完全に制御可能な量子ビットから構成されている必要がある。量子ビットは、0 と 1 に対応する 2 つの状態をもち、量子力学に従う物理系なら、ほとんどどんなも

のでもかまわない。実際には、この物理系は、すべてのものからできるだけ完全に隔離されていなければならない。量子ビットの候補として最初に思いつくのは、自然界に存在するイオン、原子、分子、電子、光子などである。これらの微視的な存在は、環境からうまく隔離できることが多い。しかし一方で、これらを制御することは多くの困難を伴う。

適切に設計された超伝導電気回路は、巨視的な大きさであるにもかかわらず、量子コンピューターに向けた有望な基盤要素である。回路のパラメータを自由に調整することができると同時に、個々の量子ビットの制御や測定は比較的容易であり、また集積化によりシステムを大きくしていくこともできるからである。一方で量子コンピューターは、個々の量子ビット間の相互作用を制御して、その量子状態を絡み合わせる「汎用エンタングルメント操作」を行う能力を備えていなければならない。量子ビットは、互いに強く結合できるだけでなく、別の瞬間にはきちんと切り離せなければならない。今回の新しい研究¹⁻³はこの点に関係するものであり、チップ上の光子場が量子情報の「バス」または導管としてふるまい、遠く離れ 1 対の量子ビットを自在に相互作用させるための仕組みを示している。

Sillanpää らの量子ビット¹は、注意深く設計されたマイクロメートルサイズの超伝導回路要素である。2 つの量子ビットは、チップ上の電氣的共振器（キャパティ）の両側に 1 つずつ結合される。共振器の中には、波長数ミリメートルの電磁波の定常波が閉じ込められている。著者らはまず、外部のマイクロ波光源を使って、一方の量子ビットを基底状態と第一励起状態の重ね合わせの状態とした。次に、この状態を、隣接する共振

器の光子場（バス）へと転送した。最後に共振器の反対側で、基底状態にある他方の量子ビットの状態に光子場の状態を写し取った。量子ビット間の汎用エンタングルメント操作は、量子ビット回路のより高いエネルギー状態や共振器中のより光子数の多い状態を利用するなどの工夫によって今後可能になると考えられる。そのような工夫はしばしば、電磁トラップに閉じ込められた複数のイオンの間で、光子の代わりにイオンの振動の量子をバスの媒体とする実験で利用されている^{4,5}。

Majer らの研究²も同様であるが、さらなるひねりが加えられている。量子状態の長距離の転送を行う点では同じであるが、彼らの方法では、中間の光子場を実際に励起させることはせず、共振器中の光子場による非常に弱い摂動として「仮想」光子を利用したのである。この巧妙な方法により、著者らはバスそのものに影響を及ぼすことなく、遠く離れた 1 対の量子ビットの上で汎用エンタングルメント操作を行うことができた。

これらを補完するのが Houck ら³の研究であり、共振器の中に閉じ込められ、決まった空間的位相でもって振動する光子の代わりに、前方に飛んでいく光子を生成する「単一光子銃」の実証を行った。彼らはまず、共振器に強く結合した超伝導量子ビットを任意の量子状態に用意した。次に、この量子ビットを自然に減衰させて 1 個の光子を放出させ、これをマイクロ波伝送線へと送り込んだ。量子ビットと光子の量子状態のトモグラフィによる解析から得られた説得力あるデータは、量子ビットの初期状態がどのようにして光子に転写されるかを示している。

このような「共振器量子電気力学（キャビティ QED）」のアプローチ⁶⁻⁸を利用した最近の回路構成の大きな長所として、超伝導量子ビットと共振器との相互作用を、これに対応する現実の原子と空洞共振器との結合よりもはるかに大きくできることが挙げられる。加えて、原理的には数百個の量子ビットを同じチップの上に並べる余地がある。任意の量子ビットの対の間の結合が可能であるため、量子コンピュータのアルゴリズムやエラー訂正コード⁹の開発はかなり容易なはずである。さらに、Houck ら³が示したような移動する量子ビットをチップ間の伝達に利用することで、さらなるスケールアップが可能になると考えられる。

しかし、光子場をバスとして用いることで複数の量子ビットを結合させることができたとしても、これらはきちんと切り離すことができるのだろうか？ 量子ビット間の結合を切り離す方法の 1 つは、量子ビットの励起周波数が共振器の共振周波数と同じにならないようにすることであろう。確かにこれは量子ビットと共振器との結合

2 個の小さい超伝導位相量子ビットを接続する長いジグザク形の共振器、つまり量子バスを示している。

を抑制する助けにはなるかもしれないが、長いタイムスケールや多数の量子ビットについてはまだ不十分であるかもしれない。将来の方向性として考えられるのは、共振器すなわちバスを利用する回路構成と「非線形パラメトリック結合器¹⁰」の長所を組み合わせることである。これにより、可変な結合と、「オフ」状態のよりよい隔離の双方が可能になる。

複雑な多量子ビット状態を、量子計算を行えるだけの長時間にわたり持続させることができるかどうかはまだわからない。とはいえ、共振器と量子ビットの相互作用に関する最新の実験¹⁻³は、すでに得られている多くの証拠とともに、巨視的な物体であっても量子力学の法則に従ってふるまうことができることを示しており、大規模な応用が可能であることを強く示唆している。 ■

Antti O. Niskanen、VTT 技術研究センター（フィンランド）
中村泰信、NEC ナノエレクトロニクス研究所（つくば市）、独立行政法人理化学研究所（和光市）

1. Sillanpää, M. A., Park, J. I. & Simmonds, R. W. *Nature* **449**, 438-442 (2007).
2. Majer, J. et al. *Nature* **449**, 443-447 (2007).
3. Houck, A. A. et al. *Nature* **449**, 328-331 (2007).
4. Cirac, J. I. & Zoller, P. *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4091-4094 (1995).
5. Schmidt-Kaler, F. et al. *Nature* **422**, 408-411 (2003).
6. Wallraff, A. et al. *Nature* **431**, 162-167 (2004).
7. Schuster, D. I. et al. *Nature* **445**, 515-518 (2007).
8. Astafiev, O. et al. *Nature* (in the press).
9. Shor, P. W. *Phys. Rev. A* **52**, R2493-R2496 (1995).
10. Niskanen, A. O. et al. *Science* **316**, 723-726 (2007).