

# 9者間の量子もつれ制御による 量子誤り訂正実験に成功

東京大学 大学院工学系研究科教授の古澤明氏の研究グループは、「9者間量子もつれ(9つの量子同士の相関)」を生成し、それを用いて量子コンピューティングの必須基本技術である量子誤り訂正実験に成功した。

量子誤り訂正は、エラーフリーな量子コンピュータ実現のために最も重要な基礎技術。多者間量子もつれ制御技術の確立によって、複数の量子同士の相関を制御でき、多量子間もつれを利用できるようになる。従来の量子誤り訂正実験では5者間量子もつれまでしか利用できず、それ以上の量子もつれを作って利用する技術の開発が望まれていた。

古澤氏は1998年、米カリフォルニア工科大学において、最も基本的な量子もつれ制御プロトコルである決定論的量子テレポーテーション実験に世界で

初めて成功<sup>(1)</sup>。その後、同氏らの東京大学の研究グループはこの結果を拡張し、2004年に3者間の量子もつれ制御である3者間量子テレポーテーションネットワーク実験にも成功。研究グループは今回、さらに量子もつれの規模を3倍に拡張して9者間量子もつれとし、それを利用した量子誤り訂正実験に成功した。これは世界初の9者間量子もつれ生成／利用の成功であり、量子コンピュータ実現への巨歩といえる。

## 量子コンピュータ

古澤氏によると、量子コンピュータは、「重ね合わせ状態」と「量子もつれ」を重要な特徴としている。重ね合わせ状態を使うことで、それに応じた並列計算ができる。 $n$ 量子ビット使うと、 $2n$ 通りを同時に重ね合わせることができ、23では8つの状態を重ね合わせること

ができる。単純な並列計算では、今のコンピュータと同じだが、量子コンピュータではもう一つの特徴、「量子もつれ」を使うことで論理ゲート数を劇的に減らすことができる。

「量子コンピュータは、量子もつれを生成してそれを使うことが本質となる。何量子ビットを同時に使って、量子もつれにできるかによって性能が決まる」(古澤氏)。

今回は、9者間の量子もつれを生成し、実際にそれを使用して量子回路を動かした。

もつれは、8個のもつれた光(スクイーズド光)と入力ビームとで作った。OPOで2個ずつのもつれた光を出し、ビームスプリッターで入力ビームと混ぜるが、ここに光チップを使いコンパクトで安定なシステムに集積しようとする動きも見えていると言う。

## 量子誤り訂正実験

量子誤り訂正が発明される以前、1994年までは量子コンピュータは実現不可能と考えられていた。情報処理は、必ず誤り訂正をその中に含んでいる。誤りを訂正するには測定が必要になる。測定すると量子ビットは壊れる。「情報を壊すことなしに測定はできない、したがって量子コンピュータは実現不可能」というのが1994年までの考えた方だった。

1995年にピーター・ショル氏は、量子もつれを使うことで量子誤り訂正が可能であることを示した。「訂正したい量子そのものを見ると情報は壊れるが、量子もつれを使えば、量子情報を見ることなしに誤りだけを検出できる」と

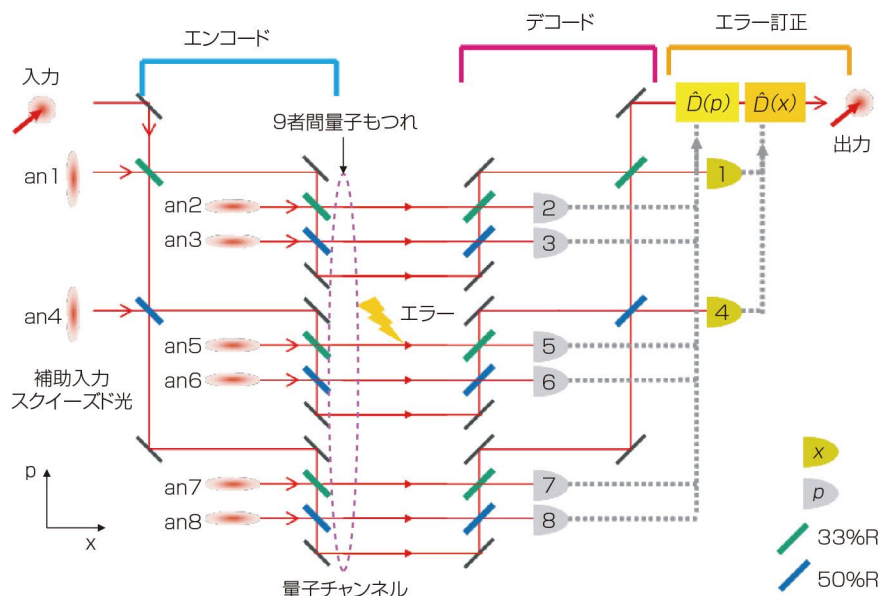


図1 量子誤り訂正実験概念図(anはスクイーズド光)。

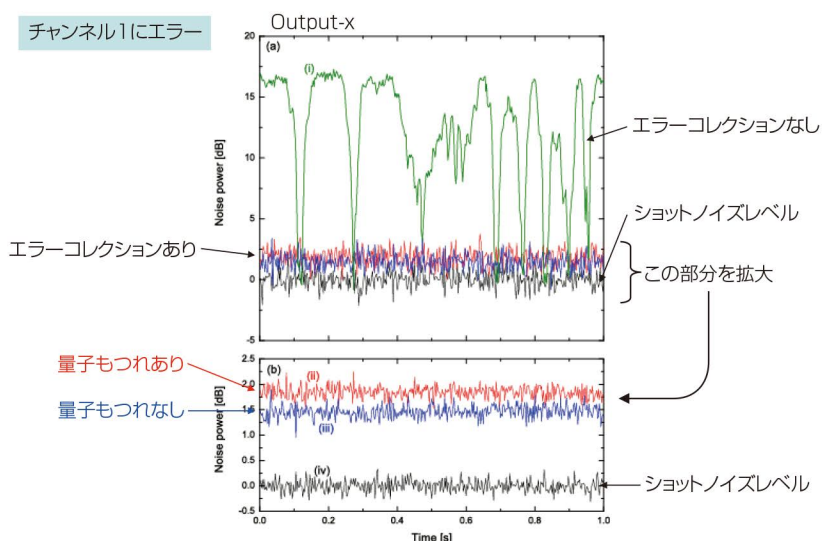


図2 誤り訂正実験の結果。エラーコレクションをしたかどうかの差、量子もつれを使った場合と使わなかった場合とで実験の成功度を見た。入力では、ノイズのない状態(ショットノイズレベル)の光を入れている。完全にエラー訂正が成功すれば、このレベルになる。用いているエンタングルメントが完全でないため、実験的なエラーはあるが、ほぼ元通りになっている。グリーンは、エラーコレクションしない場合。赤と青はエラーコレクションした場合。黒は、入力の状態に相当。エラーコレクションありとなしの場合、ありの場合が明らかに入力状態に近づいていることが分かる。量子もつれがあった場合と、ない場合とでは、あった場合が、元の状態に近くなっている。

いう理論だが、後にこの理論を古澤氏の研究グループが実証した。2者間の量子もつれを使い、1998年に量子テレポーテーションの実験に成功。「これが最も基本的な量子演算であることが認知され、それ以来、2009年6月19日現在でのこの論文の被引用件数は1154件となっている」(古澤氏)。

誤り訂正の実験では、誤りを導入し、それを測定する。

「誤りの挿入は、ある光をブロックしたり、ノイズを混入したりする。その後、量子もつれを使い、誤りのみを取り出す測定をする(エラーシンドローム測定)。その測定により、どこの光ビームでエラーがあったか、どれだけエラーがあったかなど、全ての情報が得られる。それを使って入力の状態を出力側で再現する。出力側では、入力側と全く同じ状態が出てくることを確認した」(図1)。

この誤り訂正の実験では、エラーコレクションした場合としなかった場合

の差、量子もつれを使用した場合と使わなかった場合の違いなども明らかにされている(図2)。実験結果について古澤氏は、「9個ある量子チャンネルの中で、どのチャンネルにどんなノイズ、誤りを入れても必ず元の状態に戻ること、量子もつれを使わなかったときに比べて、使ったときの方が必ずよい結果が得られることを全てのチャンネルで確認した。それが古典限界を破ったことの証明になっている。さらに、量子誤り訂正の成功は、9者間の量子もつれが存在して初めて成功するものなので、この成功は9者間の量子もつれを使ったことの強い証明にもなっている」とコメントしている。

## 次の展開

この実験では入力と同じものが出力される恒等演算が可能なが示されている。次の展開では、「ユニバーサルな量子コンピュータ」を作ることが目標の一つに掲げられている。計算を

するにはプログラムが必要になるが、これは「測定規定」の変更に相当する。テレポーテーションの量子回路の中で測定の部分を変えると、その変え方に応じて出力が変わることが知られている。プログラマブルな量子コンピュータだ。プログラム(測定規定)通りに出力が得られる、つまりユニバーサルだ。古澤氏は、このプログラマビリティについて、「これはこの間にエンタングルメント(もつれ)があるからだ」と説明している。

さらに同氏は、もう一つの目標として「量子通信」を掲げている。

「送信者側はコヒーレント光通信だ。レーザの位相に情報をコードする。情報のコードの仕方は特殊な使い方を用いている。受信者側では、重ね合わせの状態 で情報を読む、つまり射影する。元のコードの重ね合わせの状態に射影すると、誤り確率が極端に減ると言うことが知られている。重ね合わせの状態 で情報を読むと言うことは、量子計算をすることを意味している。これによってシャノン限界を超えた通信容量が得られることは知られている。単一光子で通信をするのはかなり難しい。しかし、レーザの位相に情報をコードして受信側でのみ量子計算をするという方法であれば、量子計算の部分は頑なに守っていられる。光通信なので、光の量子状態をダイレクトに扱う、測定するという方法を見出しつつあるので、実現の可能性はある。」

古澤氏の言う「量子通信」の具体像は、まだ明らかにされていないが、これまでの単一光子で暗号鍵を送る「量子暗号通信」ではない「量子通信」を目指していることは確かなようだ。

(井上 憲人)

## 参考文献

(1) A. Furusawa et al., Science 282, 706 (1998)