

量子コンピューターが実現すると、それらの端末同士を量子ネットワークで結ぶことにより、膨大な情報の送受信が可能になるとともに、総体としての量子コンピューター群の能力は指数関数的に高まる。この実現に向けて、すでに世界中に張り巡らされた光ファイバーを使った量子通信技術の開発が進む。大阪大学量子情報・量子生命研究センターの井元信之特任教授(現東京大学特命教授室特命教授)は、光子の量子状態を長距離でも光損失による伝送速度の低下を抑えて配信する量子中継器の原理実証に成功し、「グローバル量子ネットワーク」実現に向けて着実に歩み続けている。

量子通信

長距離で中継器の原理実証に成功

井元 信之 Imoto Nobuyuki

大阪大学 量子情報・量子生命研究センター 特任教授
(現東京大学 特命教授室 特命教授)
2016~2021年度CREST研究代表者

英国で概念誕生に立ち会う
厄介者が可能性を拓くカギに

今日の情報社会を担っているのは、インターネットに象徴される情報通信の発展だ。とりわけ、大容量・高速に情報を伝送できる光ファイバーネットワークが大きな役割を果たしている。一方で情報社会の進展につれて、セキュリティー性の高い通信手段として量子通信に対する関心が高まっている。

量子通信では、量子力学に基づく「0であり1」でもあるという重ね合わせた状態を情報単位である量子ビットとして扱う。この量子ビット間では、片方の状態が決まると他方もそれに応じて状態が確定するという量子力学特有のエンタングルメントと呼ばれる現象があり、それを基にして量子情報が伝送される。そのため、光ファイバーを使った量子ネットワークを構築するには、これまでの光通信技術に加え、量子情報に対応

した新たな技術が必要となる。

具体的には、距離の離れた送信側と受信側を短い区間に分け、各区間の両端に配したエンタングルメントを量子中継で繋いで行くことにより送信側と受信側に長距離エンタングルメントを形成し、それをを用いて送信側の量子情報を一気に受信側にテレポートするものである。ここで、全ての区間でエンタングルメントが同時形成されるまで繰り返すと、無中継の場合と同様、距離の指数で待ち時間が増えてしまう。しかし、成功した区間はエンタングルメントを保存し、そうでない区間だけ形成を繰り返すようにすれば、距離の多項式まで次数を下げるができる。

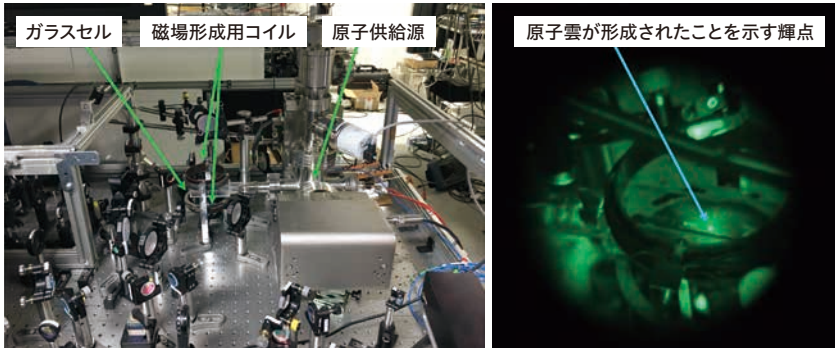
これを行うには量子情報を壊さず光で読み書きする技術、伝送の途中でエンタングルメントを一時保管する量子中継器、情報を受け取る量子受信機など、現行の光通信設備とは全く原理の異なる機器・システムが必要となる。こうした「長距離量子

ネットワーク」の研究を進めてきたのが、大阪大学量子情報・量子生命研究センターの井元信之特任教授(現東京大学特命教授)だ。

井元さんは、1977年に日本電信電話公社(現・NTT)に入社し、武蔵野通信研究所で光通信の研究に取り組んできた。NTTは80年代半ばから光ファイバーネットワークを整備してきたが、井元さんは光波長多重通信などの技術革新を通じて情報ネットワークの高度化に貢献してきた。そして、85年頃から光通信における量子雑音の悪影響について研究するようになった。

量子による悪影響を解決しようとしていた井元さんが、本格的に量子の世界に飛び込むきっかけとなったのは、90年に滞在了英国工セックス大学での出来事だったという。「幸運にも量子コンピューターと量子暗号の概念の誕生に立ち会いました。学生時代から量子力学には関心がありましたが、改めてその面白さに気づき、

図1 ルビジウム原子雲量子ドット発生装置(左)と電子雲の形成を示す輝点(右)



実験装置には量子ビットとして用いるルビジウム原子雲のトラッピング(真空中捕獲)を行うガラスセルと、捕獲のための磁場形成用コイル、原子供給源を備えている(左)。真空ガラスセル中に原子雲が形成されたことを示す輝点を、赤外線カメラで撮影した様子(右)。この光る小さな雲がひとつの量子ビットとして働く。今後はもっと微小な雲を多数捉える「アトムチップ」として、多量子ビットの集積化が図られる。

量子情報処理の研究を始めました」。厄介者だった量子がむしろ、新たな光通信の可能性を拓くカギになった。2004年には大阪大学の教授に就任し、長距離量子ネットワークを実現するための基礎研究を続けてきた。

光通信に適した波長へ変換 10キロメートルの伝送に成功

研究実績を基に、井元さんは大阪大学を中心とする研究チームを組織し、16年からCRESTで「グローバル量子ネットワークの実現」をテーマとした研究プロジェクトをスタートした。大きな目標は、長距離量子ネットワークのカギとなる「量子中継」に関する要素技術を究めることだ。現行の長距離光ファイバーネットワークでは、数十キロメートルごとに中継器を設置しており、伝送されてきた情報を保管しつつ減衰した光を増幅して送り出している。量子通信では、この中継器を量子通信に交換しなければならない。

量子中継で情報をためる役割を担う量子メモリーへの情報の読み書きには、780ナノ(ナノは10億分の1)メートルの可視光付近の短い波長の光が使われる。しかし、そのまま光ファイ

バーで伝送すると光が急速に減衰してしまうことが大きなネックとなっていた。

そこで研究チームは、量子メモリーから情報を読み取った可視光を、量子情報を壊さずに光通信に適した1522ナノメートルの近赤外光に変換する高性能の波長変換器を開発した。16年には冷却ルビジウム原子の量子メモリーを使って量子情報を近赤外光に変換し、光ファイバーに流すことで、量子情報を維持したまま読み書き伝送できることを確認した(図1)。

さらにこの成果を発展させ、18年には波長変換器と光干渉計を一体化させることにより、光子の偏光状態を変えずに通信波長帯に波長変換できる「偏光無依存型波長変換器」を実現した(図2)。また、カルシウムイオンから発する光子を波長変換し、その量子性を保って当時の世界最長記

録となる10キロメートル以上の長距離量子通信を達成した。「これにより、光ファイバーネットワークを活用して、遠く離れた原子メモリー間で量子ネットワークを形成し、長距離セキュリティ通信ができることを実証できました」と井元さんは語る。

続く19年には、光デバイスだけで構成された「全光量子中継」の原理検証実験に世界で初めて成功し、高速かつ低消費電力の「グローバル量子ネットワーク」の実現につながる大きな成果となった。また量子もつれによって初めて可能となる「時間反転」という全く新しい原理を実証するとともに、量子中継において必須となる2つの粒子が取り得るもつれ状態の中でどの状態が最大かを問う「適応ベル測定」を、世界で初めて実施したことから大きな反響を呼んだ。

「ネットワークアーキテクチャーや損失のない集積光学回路と量子もつれ光源の研究開発、高効率通信に対応する量子受信機などの課題が数多くありますが、一連の研究がグローバル量子ネットワークへの大きな一歩となったと確信しています」と井元さんは総括する。

量子通信は、光ファイバーネットワークのみならず衛星通信など無線通信においても、ドラスチックな革新をもたらす技術革新だ。すでに量子暗号通信が実用化されつつあるが、今後、社会インフラを支える技術として重要性は一層増していくことだろう。

(TEXT: 森部信次、PHOTO: 石原秀樹)

図2 偏光無依存型波長変換器により形成された量子ネットワーク

