

分野：自然科学系 キーワード：波長変換、冷却原子、超伝導光子検出器、量子ネットワーク

世界初！冷却原子量子メモリを光ファイバー通信で動作 —長距離量子ネットワークの新技术—

【研究成果のポイント】

- ◆ 冷却原子量子メモリ^{※1}と光ファイバー通信波長帯の光子との量子ネットワーク^{※2}の実証に成功
- ◆ 波長ギャップを埋めるための波長変換器^{※3}の偏光無依存化によって可能に
- ◆ 量子コンピューター^{※4}によるハッキングにも耐性のある長距離セキュリティ通信に期待

❖ 概要

大阪大学大学院基礎工学研究科の山本俊准教授および生田力三助教らの研究グループは、大阪大学 井元信之名誉教授、NTT 物性科学基礎研究所 向井哲哉主任研究員、情報通信研究機構(NICT)未来ICT研究所 三木茂人主任研究員、東京大学大学院工学系研究科 小芦雅斗教授らと共に、量子メモリとなる冷却原子と光ファイバーネットワークにアクセス可能な通信波長帯光子の量子ネットワークの実証に世界で初めて成功しました。

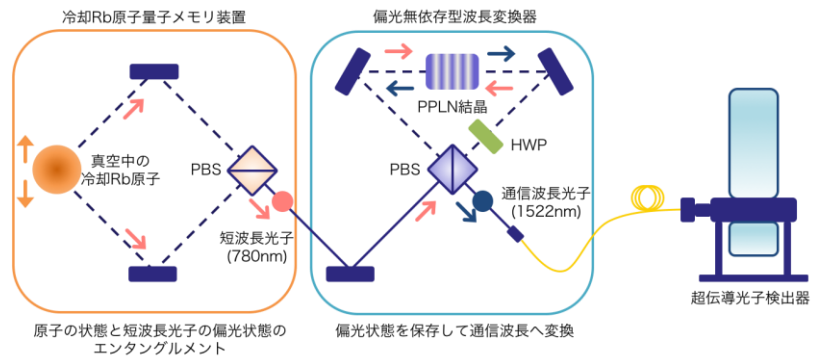


図1 原子と通信波長光子の量子ネットワークの概要

量子ネットワークは量子コンピューターによるハッキングにも耐性のある量子暗号などのセキュリティ通信を実現します。その長距離化のためには、効率的に量子状態を送受信するための中継器が必要とされています。現在のネットワークにおけるサーバーのような役割をもつこの量子中継器^{※5}は、量子状態を壊すことなく保存することができる量子メモリによって構成されます。しかし、これまでは光ファイバー通信で利用される波長の光量子状態を長時間保存する量子メモリがなく、量子ネットワークの長距離化を阻む一つの原因になっていました。これを解決するため、効率的に波長を変換する必要がありました。

本研究グループは、量子の不思議を利用できる状態のまま、光子の波長を新開発の波長変換器によって光ファイバー通信波長に変換し、これまで研究されてきた冷却原子による量子メモリと光ファイバー通信波長の光子の間で量子ネットワークが形成されることを実証しました。

この新しい量子ネットワークを光ファイバーで繋げることで、遠く離れた原子メモリ間の量子ネットワークの形成や、それを利用した長距離セキュリティ通信に役立つことが期待されます。

本研究成果は、英国科学誌「Nature Communications」に、5月21日(月)掲載されました。

❖ 研究の背景

量子コンピューターに代表される新しい計算機の出現に対して、現在の通信のセキュリティが十分に確保されるかは定かではありません。量子暗号はこのような新しい計算機の出現に対してもセキュリティを確保できることが証明されている唯一の通信ですが、この量子暗号を実現する量子ネットワークの長距離化には大きな課題が残っています。

現在のネットワークでは光ファイバーでの光損失の少ない(1)通信波長帯(1550nm 帯)の光を使い、(2)光増幅器や

Press Release

(3)サーバーでのデータ保存により効率化し長距離化を行っています。しかし、光の量子状態によって通信を行う量子ネットワークでは、(2)や(3)は量子状態を壊してしまうため直接利用することができません。一方、量子力学の原理の範囲内で(3)に相当する長距離化の方法が考案されており、量子中継と呼ばれています。その中核となるのは光の量子状態に対するサーバーである量子メモリになります。この光量子メモリは世界的に研究されており、様々な媒体で実証されています。しかし、現在の光ファイバー通信のインフラに適合した通信波長帯(1550nm 帯)の光量子メモリはほとんどなく、あっても十分な寿命を達成できるものではありませんでした。そこで、波長ギャップはあるものの寿命の長い冷却原子量子メモリに波長変換器を組み合わせることで、通信波長帯(1550nm 帯)での利用を可能にする研究が盛んに行われるようになりました。

これまで開発してきた単一光子の波長変換器では、特定の偏光の光子しか波長変換できていませんでした。しかし、光子の偏光を量子状態として用いる場合には、任意の偏光の光子を波長変換できる「偏光無依存型波長変換器」が必要となります。

❖ 今回の研究

本研究グループでは、これまで開発してきた単一光子の波長変換器を光干渉計と一体化させる新しいアイデアにより、光子の偏光状態を変えずに通信波長帯へ波長を変換する「偏光無依存型波長変換器」を実現し、これにより世界で初めて冷却原子量子メモリと通信波長光子の量子ネットワークを実現しました。この実現のために、NTT 物性科学基礎研究所の冷却 Rb 原子^{※6}トラップ技術を応用した冷却原子量子メモリを大阪大学で構築し、開発した偏光無依存型波長変換器を組み込むことにより、発生した短波長光子(780nm)を通信波長帯(1550nm 帯)に変換しました。この時、冷却原子量子メモリと光通信波長帯の光子の量子状態が「エンタングルメント^{※7}」と呼ばれる量子力学特有の性質を持つことが量子ネットワークの重要な証拠となります。通信波長帯光子を限りなく低雑音で計測できる情報通信研究機構(NICT)未来 ICT 研究所で開発された超伝導光子検出器(SSPD)^{※8}を利用し、東京大学と協力し観測データの解析を行い、このエンタングルメントをもつことを確認することができました。これにより、冷却原子量子メモリと通信波長帯光子が量子ネットワークの1つのノードを形成し、光ファイバーを介した長距離化が可能になります。

❖ 本研究成果が社会に与える影響（本研究成果の意義）

本研究成果により、量子ネットワークを長距離化する量子中継の実現に向けた新しい道筋を示すことができました。これにより、量子コンピューターのような強力な計算機によるハッキングに耐性のある量子暗号などの次世代のセキュリティ通信の長距離化にまた一歩近づきました。

❖ 特記事項

本研究成果は、2018年5月21日(月)に英国科学誌「Nature Communications」(オンライン)に掲載されました。

タイトル：“Polarization insensitive frequency conversion for an atom-photon entanglement distribution via a telecom network”

著者名：Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Tetsuo Kawakami, Shigehito Miki, Masahiro Yabuno, Taro Yamashita, Hiroataka Terai, Masato Koashi, Tetsuya Mukai, Takashi Yamamoto and Nobuyuki Imoto

DOI: 10.1038/s41467-018-04338-x

なお、本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST)「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」研究領域における研究課題「グローバル量子ネットワーク」(研究代表者：井元信之)の一環として行われました。また、本研究は、文部科学省 科学研究費補助金 基盤研究(A)、新学術領域研究および大阪大学大学院基礎工学研究科附属未来研究推進センターの支援により行われました。

❖ 用語説明

※1 量子メモリ

現在の情報通信では「0」と「1」の2文字(ビットといいます)で計算や通信を行っていますが、量子情報通信は「0」と「1」の重ね合わせ状態も使います(量子ビットといいます)。現在のコンピューターで使われているメモリでは、ビットは記憶できますが量子ビットを記憶できません。量子ビットを記憶する装置を量子メモリと呼びます。本研究では冷却 Rb 原子を用いています。

※2 量子ネットワーク

量子情報をつなぐ通信網の総称。2つのシステム間にエンタングルメントがあれば、量子テレポーテーションを使って量子情報を送受信できるため、エンタングルメントは量子ネットワークにおいて重要な役割を果たします。

※3 波長変換器

和・差周波発生といった非線形光学効果を利用した波長(周波数)変換器。量子状態を壊さない高性能な単一光子波長変換のためには、わずか光子1個分の雑音さえ許さないクリーンな波長変換技術が求められます。

※4 量子コンピューター

現在の情報通信では「0」と「1」の2文字(ビットといいます)で計算や通信を行っていますが、量子情報は「0」と「1」の重ね合わせ状態も使います(量子ビットといいます)。エンタングルメント状態にある量子ビットを使うと、莫大な数の事象や処理を現実的な数の量子ビットで表すことができます。これを利用して複雑な計算を並列処理するのが量子コンピューターです。ある種の問題を解く際に、原理的に従来のコンピューターをはるかにしのぐ性能が得られます。

※5 量子中継器

離れた中継点にある量子メモリ間に蓄積されたエンタングルメントを利用し、量子テレポーテーションを行うことで長距離量子通信を可能にする量子通信手法。光子の直接送信では送信距離に対して指数関数的に受信効率が減少しますが、中継点間に蓄積されたエンタングルメントを利用することでこの受信効率の減少を大幅に改善することができ、1000kmを超える量子情報通信が可能になると考えられています。

※6 冷却 Rb 原子

レーザー冷却等の技術を用いて極低温まで冷却され、捕捉されたルビジウム(Rb)原子気体。極低温まで冷やすことで、量子力学的な性質を積極的に活用することが可能です。量子情報処理では、量子メモリとしての活躍が期待されています。

※7 エンタングルメント

複数の量子ビット間の量子力学的な相関を表します。例えば、エンタングルメントをもつ2つの光子の場合、片方の状態が決まると、もう一方の状態もそれに応じて決まり、その関係は光子間の距離に依存しないといった特異な性質があります。量子情報処理において、情報伝達、高速(効率)演算、セキュリティなど、ほぼすべての応用においてリソースとしての重要な役割を果たしています。

※8 超伝導光子検出器(SSPD)

超伝導現象を利用した単一光子検出器。本研究で用いた超伝導単一光子検出器は、受光面に対して超伝導細線を敷き詰めた構造をしています。超伝導状態が壊れやすいように電流バイアスが加えられた細線に光子が吸収されると、光子のエネルギーによって超伝導状態が壊れ、光子検出が可能となります。

❖ 本件に関する問い合わせ先

大阪大学 大学院基礎工学研究科
准教授 山本俊(やまもと たかし)

NTT物性科学基礎研究所
主任研究員 向井 哲哉 (むかい てつや)

情報通信研究機構 未来ICT研究所 フロンティア創造総合研究室
主任研究員 三木 茂人 (みき しげひと)

情報通信研究機構 広報部 報道室

東京大学大学院工学系研究科 光量子科学研究センター
教授 小芦 雅斗(こあし まさと)