

量子インターネットへ向けた多重通信による高レート 量子もつれ生成手法の発明

本研究のポイント

- 量子インターネットは、量子コンピュータ大規模化やグローバル量子暗号通信実現に有望な次世代通信基盤である。
- 量子インターネットには長距離量子通信を可能にする量子中継が必要。
- 本研究では、多重化通信による高い通信レートを維持したまま、量子インターネットアプリケーションへ適用可能な量子もつれ生成を可能にする手法を発明した。

【研究概要】

横浜国立大学の堀切智之教授（大学院工学研究院 / 総合学術高等研究院）と同研究室の吉田大輔さん（理工学府大学院生）は、LQUOM株式会社と共同研究を行い、量子通信長距離化に必須の量子中継による量子もつれ生成高レート化を可能にする手法を発明しました。

通信ネットワークの完全なセキュリティへつながる量子暗号通信や、クラウド量子計算の安全な使用、分散量子計算など数々のアプリケーションを可能にする次世代通信基盤が「量子インターネット」です。それにつながる量子中継には量子メモリが搭載されます。これまで高い量子通信速度を実現し得る多重化システムにおいて、量子インターネット上でのアプリケーション実装に適した2量子間もつれ生成の効率的な手法は実現されていませんでした。今回の成果はそれを可能にするものです。

本研究の一部は、内閣府ムーンショット型研究開発事業(JPMJMS226C)、総務省「量子インターネット実現に向けた要素技術の研究開発」(JPMI00316)、NEDOディープテックスタートアップ支援事業の支援にて行われました。

本研究成果は、国際科学誌「Communications Physics」にて2024年11月15日（ロンドン時間）に掲載されます。

【研究背景】

量子通信は完全な情報セキュリティを保障する通信方式です。インターネットを初めとした現状の通信への付加のみならず、急速に開発が進んでいる量子コンピュータのクラウド使用の安全性保証にも必要な技術として期待されます。さらに、量子インターネットと呼ばれる地球規模の量子通信ネットワークでは、様々な量子デバイス（量子コンピュータ、センシングデバイスなど）が結ばれることにより、次世代の情報通信技術の基盤となる期待がされています。量子インターネットは、量子状態を送信するインフラという事ができます。そのための基礎が量子もつれ（エンタングルメント）の共有能力です。

数100kmを超える光ファイバネットワークを用いた量子通信によって、この量子もつれ共有の長距離化実装が待望されていますが、長距離化には量子中継と呼ばれる技術が必要になります。量子中継は、遠方ノードにある量子メモリ間に量子もつれを共有する手法です。

これまでに、さまざまな量子中継の手法が提案され、実験的な実証も少しずつできています。その中でも、ある区間を結ぶ両端の量子メモリからの計1光子のみを共有する

(一光子干渉とよびます) 量子もつれは、量子中継の実装方法としてその高効率性から有望な方法です。しかし、光路や遠隔地のレーザー位相を精密に制御する必要があり、特に遠隔地間での適用には課題がありました。そこで私たちは、多重化技術を活用することで、従来の効率を維持しつつ、位相制御の難易度を大幅に緩和する新しい手法を提案しました。

【研究成果】

今回、研究グループは一光子干渉を用いた新しい量子中継の手法を提案しました。この手法は、一光子干渉を利用しつつも従来の方法とは異なり、位相制御の難易度を大幅に軽減できる点が特徴です。特に、光路の位相や遠隔地間のレーザー位相を厳密に合わせる必要がなくなり、遠隔地での利用がより容易になりました。

新たな手法では、複数のモードを用いて、従来の一光子干渉を利用した手法と同様に、位相に敏感な量子もつれの生成を試みます。この際、2つ以上のモードで量子もつれの生成が成功するよう、十分な数のモードで試行する（多重化）ことが重要です（次頁図1参照）。成功した2つのモードは、時間的な変化も少ない似た環境による位相の影響を受けるため、それらをペアにすることで位相の類似した部分を打ち消すことができます。このペアリングによって、従来と比較して位相制御の難易度が大幅に緩和されました。

さらに、特定の条件下では、従来の一光子干渉に基づく手法よりも高いもつれ配送率を達成することが確認されており、今後の量子インターネット基盤技術としての発展が期待されます。

【今後の展開】

発明した多重化量子メモリ搭載量子中継による実用的量子もつれの高速生成手法は、全ての要素が現在実装可能な実験手法で構成されています。したがって、本提案手法を我々のグループで実装することが今後の目標です。開発技術実装により量子中継機能の実証へと早期に進む計画です。

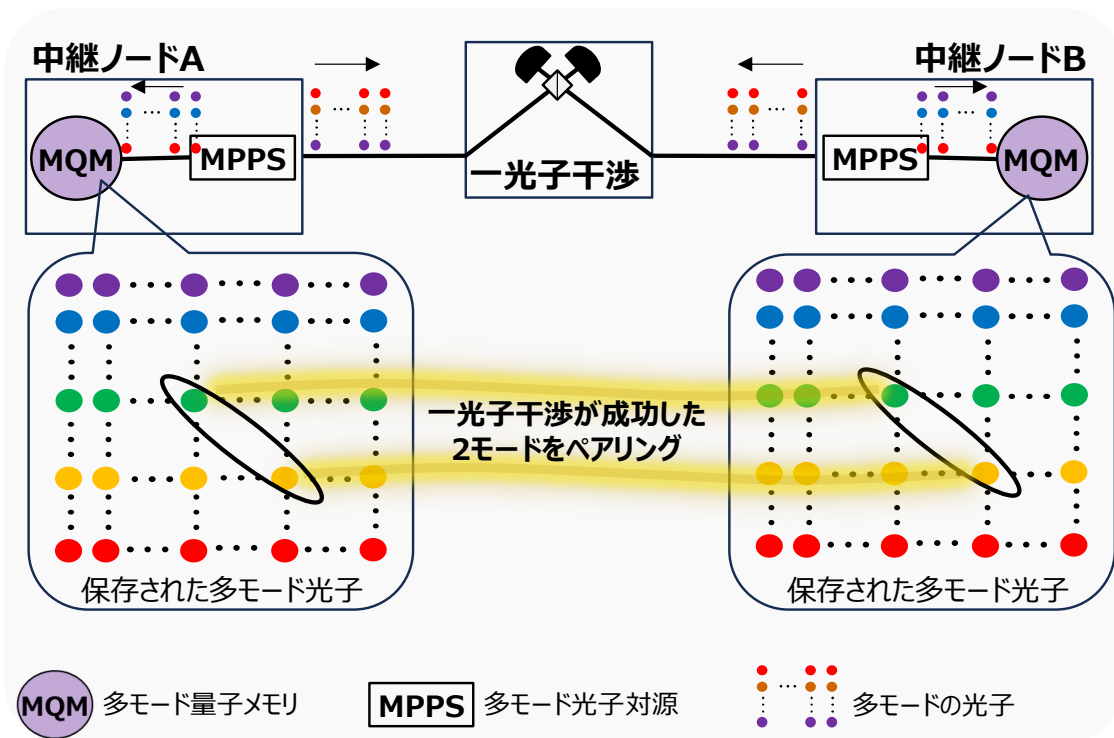


図 1. 提案スキームの概要図.

従来の位相制御の難易度が高い 1 光子干渉を多モードで行う. その後, 成功したモードをペアリングすることでもつれを作る. この時, ペアリングした 2 つのモードは光路においてほとんど同様の位相ノイズの影響を受けるため, 差動通信のようにノイズの影響を打ち消すことができる. また, 1 光子干渉が成功してからペアリングするため効率性が保たれる.

【謝辞】

本研究は、内閣府ムーンショット型研究開発事業(JPMJMS226C)、総務省「量子インターネット実現に向けた要素技術の研究開発」(JPMI00316)、NEDOディープテックスタートアップ支援事業の支援にて行われました。

【掲載論文】

雑誌誌： Communications Physics

著者： Daisuke Yoshida and Tomoyuki Horikiri

論文タイトル： Multiplexed quantum repeaters based on single-photon interference with mild stabilization :

DOI: [10.1038/s42005-024-01849-6](https://doi.org/10.1038/s42005-024-01849-6)

【用語解説】

1. 量子

光の最小単位である光子や、物質を構成する原子・電子などは量子である。波と粒子双方の性質を併せ持ち、量子通信においては、主に光が通信路（光ファイバーなど）伝送に用いられ、電子などが量子メモリとして用いられる。

2. 量子通信

単一光子や量子もつれ（エンタングルメント）光子対などの量子を利用することで、安全な暗号通信が可能となる通信方式。

3. 量子中継

量子通信の長距離化には、中継技術が必要となる。量子通信に必要な光は大変微弱であり、光ファイバで送っても、距離とともに届く確率が指数関数的に減衰するからである。このため、例えば中継なしに 1000km 遠方に届けるのは困難になる。そこで、光ファイバ伝送を短い距離に区切って行い、量子メモリ物質への保存などの技術を用いて距離延長を行う量子中継技術が研究されている。

4. 量子もつれ（エンタングルメント）

多体間の量子力学的な相関。例えば2つの物体A,Bを、離れた2地点にいるユーザー1と2に片方ずつ配分した場合、ユーザー1がAを受け取れば、ユーザー2はBを受け取ったとわかる。これだけなら古典的な相関である。

しかし、例えば量子もつれにある2光子があり、ユーザー1と2に分配した場合、ユーザー1が偏光板を通して出てきた光子を観察した結果水平偏光であるならば、ユーザー2が同様に偏光板を通した場合も水平偏光である。これは上の古典相関と同じであるが、加えて彼らが円偏光状態を見た時も完全に相関が現れる。つまり、ユーザー1が、やってきた光子が左回り円偏光か、右回り円偏光かを測った場合、同様に円偏光の測定をしたユーザー2も100%相関した結果を得る。

このように、水平偏光で見ても円偏光で見ても完全な相関がユーザー1と2の測定結果に現れるのが（2体間の最大）量子もつれの特徴的な性質である。

量子もつれをまず短距離間で生成し、段々と距離を伸ばしていくのが量子中継の代表的な手法である。

5. 量子メモリ

伝送された光子の量子状態を物質中の電子スピンなどの量子状態に置き換え、長時間保存するデバイス。

本研究に関するお問い合わせ先

【横浜国立大学】

大学院工学研究院/総合学術高等研究院 教授 堀切智之

Tel:045-339-3356

E-mail: horikiri-tomoyuki-bh@ynu.ac.jp

本報道に関するお問い合わせ先

【横浜国立大学】

総務企画部 リレーション推進課

E-mail: press@ynu.ac.jp