

量子インターネットと光技術

株式会社メルカリ R4D（研究開発部）シニアリサーチャー
慶應義塾大学 政策・メディア研究科 特任准教授
永山翔太

1. はじめに

量子インターネットは、量子力学に基づく「量子もつれ（もつれ）」を遠隔ノード間で生成・維持し、高度な分散量子計算や量子セキュリティを可能にする次世代の通信基盤である。特に量子ビットを運ぶ手段としては単一光子を用いたファイバー通信が有力視されるが、量子情報を持つ単一光子は古典的な光アンプでは増幅できない。また、量子複製不可能定理によって量子状態のコピーが禁じられているため単一光子の損失や位相雑音に対してアンプによる増幅は意味をなさず、量子メモリや量子エラー訂正といった新たな工学／光学技術が必要となる。加えて高精度な干渉計や位相安定化も求められ、量子情報理論だけでなく光通信工学との緊密な連携が欠かせない。本稿では、量子インターネットを「光技術」の視点から整理するとともに、装置構成や制御手法、長距離伝送の要となる量子リピータ技術などを概説する。とりわけ光通信分野の専門家には、既存技術との共通点や相違点を把握することで、自らの専門領域が量子インターネットの発展にいかに関与しうるかを考えていただきたい。量子インターネットの応用分野については参考文献に挙げた別稿を参照されたい。量子計算やセキュリティ、分散センシングなど幅広い用途を見据えつつ、高い障壁を乗り越えていくための展望を提示することが本稿の目的である。

2. 量子インターネットの光学的基盤技術

量子インターネットでは遠隔ノード間の量子ビット伝送に光子を用いることが最も有望視されている。これは、光ファイバー網が世界規模で整備されているというインフラ的利点に加え、単一光子レベルでも比較的低損失で長距離伝送が可能だからである。本章では、光子を介した量子ビットの扱い方や、量子メモリとの連携、さらに波長変換技術までを概観する。

2-1 量子ビットとしての光子

(1) 光子の自由度と量子ビットのエンコード

量子インターネットで利用される光子の自由度には、偏光、位相、時間ビン(time-bin)など多様な選択肢がある。とくに実験で広く用いられるのは「偏光」と「時間ビン」である。前者では例えば水平偏光 $|H\rangle$ を $|0\rangle$ 、垂直偏光 $|V\rangle$ を $|1\rangle$ と対応付ける。後者の場合は、パルス列の先頭に光子が位置する場合を $|0\rangle$ 、遅延線を通して遅れて到着する場合を $|1\rangle$ と定義する。いずれの方式も、単一光子の位相や到着タイミングを厳密に制御する干渉実験が鍵となる。

(2) 光子の生成ともつれ操作

単一光子は、自発的パラメトリック下方変換 (Spontaneous parametric down-conversion: SPDC) や量子ドット光源などで生成される。SPDC光源では、ポンプ光を非線形結晶に入射すると、一対のもつれ光子が信号光とアイドラー光として生成される。これら光子を遠隔ノードに送出することで、