

井元 信之

大阪大学先導的学際研究機構  
特任教授

グローバル量子ネットワーク

## § 1. 研究成果の概要

本研究課題では、2016 年からグローバル量子ネットワークに向けた要素技術の研究を実施している。最近では、このような大規模量子ネットワークは、「量子インターネット」とも呼ばれ、2018 年には Science 誌において Review 記事「Quantum internet: A vision for the road ahead」が掲載され、大規模研究計画が欧米中で開始されるなど注目を集めている。このような「量子インターネット」を実現するためには任意のユーザー間に量子もつれを配信することが重要となる。現在の光ファイバー網を利用してこれを実現するためには、光ファイバーでの損失を抑制し、光子を効率よく配信する「量子中継」が必要となる。本研究課題ではこれまで、必要となる量子メモリと通信波長帯光子の量子もつれ(エンタングルメント)生成を、冷却 Rb 原子と偏光無依存波長変換器および光ファイバー通信波長帯での超伝導光子検出器等の開発・高性能化により実現した。また、「量子中継」の核となる「適応ベル測定」を光で実現する全光量子中継の原理を世界初で実証するなど、実験的な成果や量子暗号通信プロトコルに関する多くの理論的な成果を得ている。本年度は、これを更に進める成果が得られた。以下に、その代表的なものを挙げる。

まず、世界的な新たな潮流として、量子インターネットを実現していく上で重要な量子ネットワークの多重化が挙げられる。これを実現するために、周波数多重化を用いた新たな手法を考案し、1400 モードにもなる大規模な多重化の可能性を示すことができた[代表的な原著論文 1]。また、超伝導光子検出器と SFQ 回路による光子の同時検出回路を開発し、その動作を確認した[代表的な原著論文 2]。また、量子通信プロトコルに関して、Twin-Field 量子鍵配送方式のセキュリティ理論の構築を行った。Twin-Field 方式とは、従来の量子鍵配送方式のように送信者から受信者に直接光を送るのではなく、通信したい 2 者が中央の受信局に向けてそれぞれパルス光を送る方式である。これは中央受信局が不正操作されても対処できる方式であるため、外側の 2 者間距離がそのまま量子鍵配送の距離とみなせるので、従来の 200km 程度の限界をおよそ倍に延ばすことができ、さらには一方向型の原理限界性能も超えると期待されていた。その完全なセキュリティ証明は

未解決であったが、今回有限長の統計揺らぎも考慮した完全な証明により、現実的な時間内で一方向型の原理限界性能を超えることを示した[代表的な原著論文 3]。

**【代表的な原著論文】**

1. R. Ikuta, R. Tani, M. Ishizaki, S. Miki, M. Yabuno, H. Terai, N. Imoto, T. Yamamoto, “Frequency-Multiplexed Photon Pairs Over 1000 Modes from a Quadratic Nonlinear Optical Waveguide Resonator with a Singly Resonant Configuration”, *Phys. Rev. Lett.* 123, 193603, 2019
2. S. Miki, S. Miyajima, M. Yabuno, T. Yamashita, T. Yamamoto, N. Imoto, R. Ikuta, R. A. Kirkwood, R. H. Hadfield, H. Terai, “Timing Jitter Characterization of the SFQ Coincidence Circuit by Optically Time-Controlled Signals from SSPDs”, *IEEE Tran. Applied Super.*, 29, 5, 132104, 2019
3. K. Maeda, T. Sasaki, M. Koashi, “Repeaterless quantum key distribution with efficient finite-key analysis overcoming the rate-distance limit”, *Nature Communications*, 10, 3140, 2019

## § 2. 研究実施体制

### (1)「阪大」グループ(研究機関別)

① 研究代表者:井元 信之 (大阪大学先導的学際研究機構量子情報量子生命研究センター 特任教授)

#### ② 研究項目

・量子通信システム

### (2)「NTT 実験」グループ(研究機関別)

① 主たる共同研究者:向井哲哉 (日本電信電話(株)NTT物性科学基礎研究所量子光物性研究部 主任研究員)

#### ② 研究項目

・冷却原子量子メモリの開発

### (3)「NICT」グループ(研究機関別)

① 主たる共同研究者:三木茂人 (情報通信研究機構フロンティア創造総合研究室 主任研究員)

#### ② 研究項目

・高効率・低雑音を兼ね備えた光子数識別器の開発

### (4)「東大」グループ(研究機関別)

① 主たる共同研究者:小芦雅斗 (東京大学工学研究科 教授)

#### ② 研究項目

・光による原子集団の制御測定理論と量子通信プロトコルの開拓

### (5)「富山大」グループ(研究機関別)

① 主たる共同研究者:玉木潔 (富山大学大学院理工学研究部(工学) 教授)

#### ② 研究項目

・量子暗号プロトコル提案・理論的解析