

3.2.4 新世代ネットワーク研究センター 量子 ICT グループ

グループリーダー 佐々木雅英 ほか 8 名

量子情報通信技術の研究開発

概要

現在の情報通信技術は 19 世紀に確立された物理法則に基づいており、すでに光ファイバの電力密度限界や最新技術による暗号解読の危機が指摘されるなど、今後も次々と物理的限界を迎える事が予測される。このような限界を打破するため、究極の物理法則「量子力学」に基づいて、絶対安全な量子暗号通信や従来理論の容量限界を打破する量子情報通信の研究開発を産学官連携により戦略的に進めている。

量子暗号通信は、送受信者間で絶対安全な鍵を共有するための量子鍵配送技術がキーになる。単一光子、或いは特殊な結びつきをもった一対の光子である量子もつれ状態で鍵を送信する技術の研究を行っている。

量子情報通信は、量子力学を用いて現在の光通信の様々な性能限界を乗り越え、大容量かつ安全な通信を実現するための新世代ネットワーク技術として期待されている。ネットワーク上のさまざまな場所で量子もつれによる結びつきを共有する事が出来れば、超並列計算や盗聴不可能な暗号通信、さらには低電力・大容量通信実現の道が拓かれる。

平成 21 年度の成果

(1)量子暗号通信分野におけるブレークスルー: ハイブリッド量子もつれ光源による量子鍵配送実現

量子鍵配送は、単一光子レベルまで弱めたレーザー光を光源に用いるのが主流だが、量子もつれ状態で鍵を送信するための量子もつれ光源を用いた方式も、次世代システムの主力候補として世界で研究が進んでいる。通常、暗号鍵は光パルスとして生成され、光ファイバを通じて送信される。ここで問題となるのが光パルスの到達距離であるが、光ファイバには減衰や雑音の影響が存在するため、長距離化には限界がある。一方、ファイバを使わない自由空間では、より遠距離へ暗号鍵を配送することができる。そのため、周回衛星などを利用する事で、地球全体をカバーするグローバルな量子鍵配送が可能となる。しかし、光ファイバと大気とでは光の伝搬特性に大きな違いがあり、従来はそれぞれ異なった量子鍵配送の運用手法が用いられてきた。

本年度に実現したハイブリッド量子もつれ光源は、NICT が新規に考案した量子もつれフォーマット変換器と、NEC が開発を進めてきた波長の異なる量子もつれ光子対発生器とで構成される (図 1)。量子もつれ光子対発生器から出力される光子は、一方は空間伝送に適した波長 (810nm)、他方は光ファイバ伝送に適した波長 (1,550nm) で生成される。送信者 (Alice) と受信者 (Bob) の 2 者間での暗号鍵配送実験では、波長 1,550nm の光子は光ファイバを通じて受信者側へ伝送される。一方、波長 810nm の光子は、送信者側のフォーマット変換器により、空間伝送に適したフォーマットに変換される。

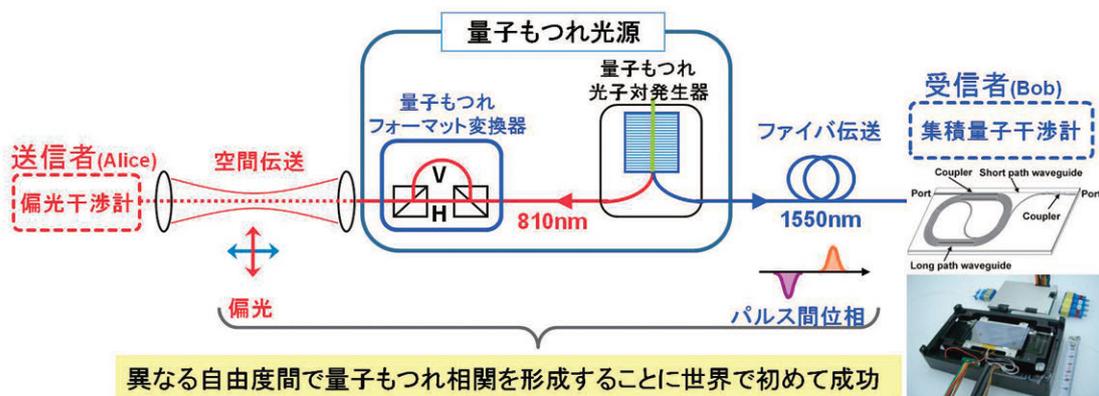


図 1 量子もつれフォーマット変換器を含む量子鍵配送実験の概略図

生成した量子もつれの強さは、送信者側と受信者側に送信された光子の相関の大きさとして評価できる。この量子もつれの強さをテストした結果、量子もつれがない場合の相関 (光学干渉の明瞭度) の限界値 (71%) を大きく凌駕する 88% 以上の値を得る事に世界初で成功した。この結果が評価され、本成果は米国物理学会

速報誌「Applied Physics Letters」に掲載された。今回、自由空間・光ファイバハイブリッド型量子もつれ光源の性能を実証した事で、空間通信と光ファイバ通信統合型の、よりフレキシブルな量子鍵配送システム実現への道を拓いた。また、自由空間側の受信機には小型の偏光素子と単一光子検出器さえあればよく、装置の小型化、軽量化が可能である。これは将来、衛星などの移動体への搭載を見据えた際の大きなメリットとなる。

(2)量子情報通信分野におけるブレークスルー：連続量量子もつれ蒸留に世界で初めて成功

量子情報通信では、空間的に離れた複数の場所で、量子もつれを共有する事が必須である。しかし量子もつれは減衰に極めて弱く、そのため伝送路の損失で減衰した結びつきの強さをネットワークノードにおいて復元・増強する操作が欠かせない。このような操作は一般的に量子もつれ蒸留と呼ばれ、エルビウムドープファイバ増幅器（EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier）など従来の光信号増幅技術では実現不可能である。この量子もつれ蒸留は、これまでに他の研究機関で光子対の偏光の相関を増強する事に成功している。しかし、光子対の光電場の位相振幅に関する量子もつれ蒸留（「連続量量子もつれ蒸留」）については、さらに技術的にハードルが高く、いまだ実現していなかった。

NICTでは、2つの光パルス間での連続量量子もつれ蒸留に世界で初めて成功した。ここで鍵となったのは、NICTが独自に開発した、光パルス内の光子を自在に抽出する技術である（図2）。ここでは、量子もつれ光源から生成された2つの光パルスについて、伝搬途中で光子を抽出する操作を行う。光子抽出前後での量子もつれの大きさを比較すると、光子抽出後に量子もつれの度合いが増強される様子が観測された（図3）。出力で得られた状態は、これまで世界で観測された光の状態の中で最も純度が高いものであった。今回の結果は、量子通信における重要課題を達成した成果として評価され、英国科学雑誌「Nature Photonics」オンライン版に掲載された。

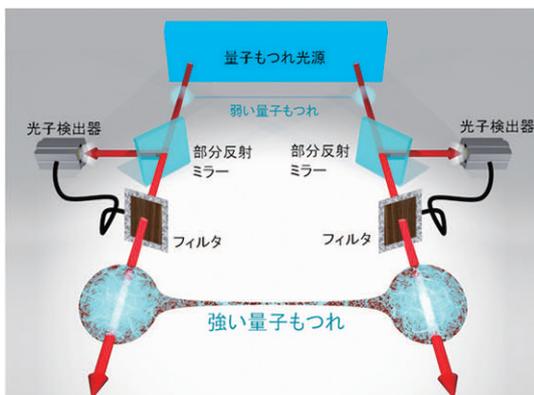


図2 量子もつれ蒸留実験のイメージ図

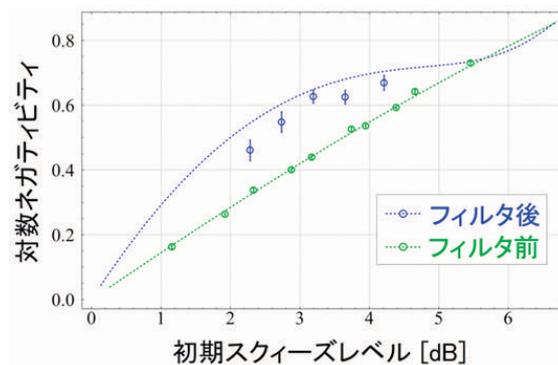


図3 実験結果：
縦軸は量子もつれの大きさ、
横軸は量子もつれの度合いに対応した量、
さまざまなレベルの量子もつれで実験し、
フィルタ（光子抽出）後に量子もつれの増強を確認した

今回実証に成功した手法を用いる事で、従来の古典通信で実現できる限界を超えて、量子もつれを復元・増幅する事ができる。また将来的に、量子もつれを形成する光パルス内の光子数をさらに増やし、ネットワークノードにおいて今回の手法と量子計算を組み合わせる事が可能になれば、最低電力・最大容量の通信ネットワーク構築も夢ではない。