

3.6.2 未来 ICT 研究所 量子 ICT 研究室

室長 佐々木雅英 ほか5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。

【平成23年度の成果】

(1) 量子暗号技術：高速化技術や新機能の開発

量子暗号の高速化に必要な検出器-鍵蒸留基板間のインターフェース技術を確立させるために、超伝導光子検出器の読出し回路と鍵蒸留基板への信号転送部の最適化に必要な雑音源の特定に取り組み、高速化に伴い新たな雑音（アフターパルス現象）が出現することを突き止めた。従来技術では2.43%というビット誤り率となるところを新たに開発した最適フィルタにより1.36%に低減させることに成功した（図1）。

産学との連携・共同により波長多重量子鍵配送システムを開発、テストベッドTokyo QKD Networkに組み込んで世界初となる都市圏敷設ファイバ（小金井～大手町間45km）での波長多重量子鍵配送のフィールド実証に成功し、量子暗号の高速化に向けた突破口を開いた（図2）。具体的には、波長の多重で鍵生成速度208kbpsという世界トップクラスの鍵生成速度を達成し、成果をアメリカ光学会速報誌（Optics Letters）など主要誌6編で発表し、主要国際会議ECOC, CLEO, QCRYPT, AAAS等で招待講演を行った。

マルチユーザ化とセキュリティ機能拡張に向けた研究開発として、量子鍵配送を利用した上位レイヤのネットワークスイッチの認証方式を考案した。さらにTokyo QKD Network上の量子鍵配送装置を用いてシステム実証実験を行い基本動作を確認した。この技術はネットワークスイッチにおけるなりすまし攻撃や改ざんの防止に有効な技術になると期待される（図3）。

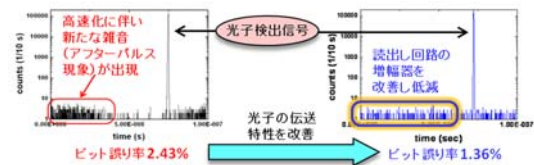


図1 量子暗号高速化に伴い、超伝導光子検出器の読出し回路においてアフターパルス現象による雑音が発生することを突き止め、最適フィルタによる解決策を開発

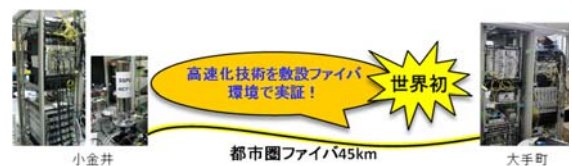


図2 都市圏敷設ファイバ（小金井～大手町間45km）での波長多重量子鍵配送のフィールド実証に成功し、量子暗号の高速化に向けた突破口を開いた



図3 量子鍵配送を利用した上位レイヤのネットワークスイッチの認証方式を考案し、ネットワークスイッチにおけるなりすまし攻撃や改ざんの防止に有効な技術を開発

(2) 量子ノード技術：光通信におけるビット誤り率の理論限界打破

量子デコーダの光電変換部の基本となる量子受信器を開発するために、3値、4値信号に対して、光子検出器と光波制御フィードバックにより従来限界を超える量子受信回路の構成理論を構築した。さらに、2値信号で、光通信におけるビット誤り率の理論限界を打破する実証実験に世界で初めて成功した（Physical Review Lettersに発表）。この実験では、0と1のビット信号をそれぞれ波の山と谷が互いに反転した光の波（いわゆるコヒーレント光通信で使われる最も基本的な2値位相変調信号）に乗せて伝送させ、それを量子受信器で検出する。今回開発した量子受信器では、図4に示すように、0と1の波をそのまま測るかわりに、それぞれの波を参照光と干渉させ、いったん、別の波の状態に変換してから、最後に光子の数を測定する。光子が1つでも検出されれば1と判定し、それ以外は0と判定する。これによって、光通信で使われる

信号を、量子雑音の効果を抑圧しながら高精度で識別することができる。光子は気まぐれ（専門的にはハイゼンベルグの不確定性原理として記述される）で、信号パルスの中で勝手に現れたり消えたりする。光を波として扱ううちは光子の気まぐれを制御しきれないが、光子という粒を正確に測ると最大限にその気まぐれを抑え込めると解釈できる。

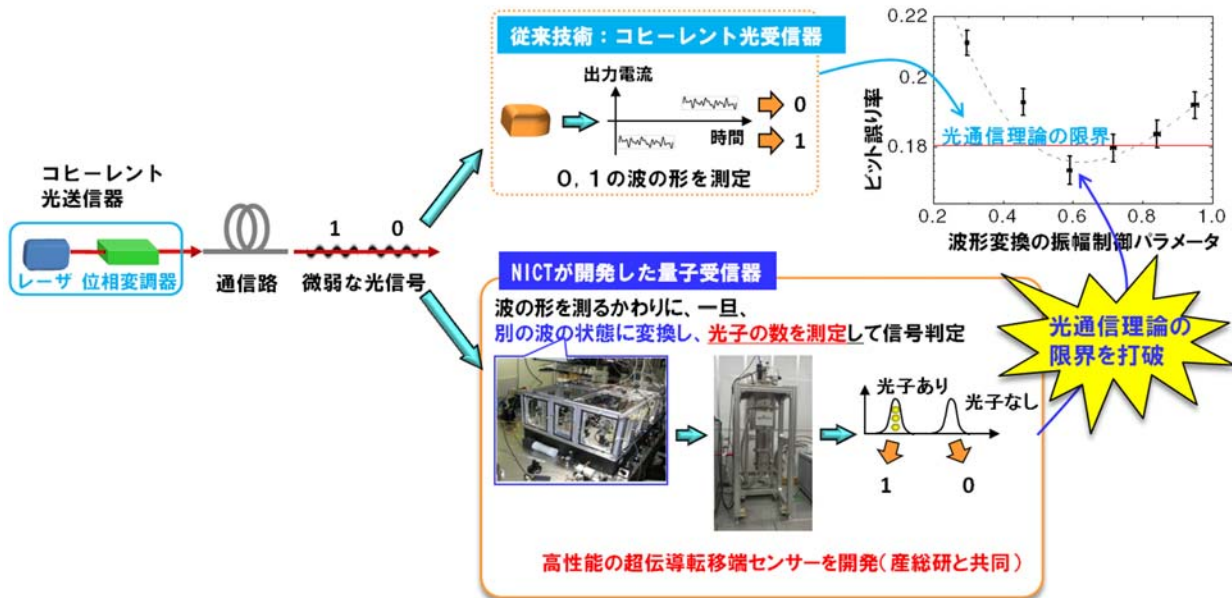


図4 量子受信器と従来のコヒーレント光受信器の比較。量子受信器では、光信号をまず波として変換処理した後で最後に粒子（光子）として測定することで優れた受信性能が実施できる

高純度のパルススクィーズド光生成に向け導波路素子の最適化を進め、光導波路素子でのスクィージング記録を -4.1dB から -5dB に更新した光源を完成し（図5）、成果をアメリカ光学会速報誌（Optics Letters）に発表した。これは、将来、量子ノードにおいて量子信号処理を集積回路上で実現する上での重要な光源技術になるものである。

光周波数の極限計測技術として、インジウムイオンをカルシウムイオンとの共同冷却によってレーザー冷却する技術を開発（図6）するとともに、真空紫外光生成技術を開発して出力特性及び周波数安定度のデータを取得した。これらの基礎技術を用いると量子情報的手法を駆使したNICT独自方式の光周波数標準が実現すると期待される。

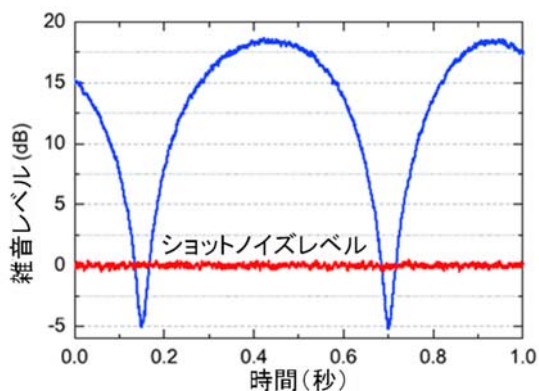


図5 スクィーズド光の雑音レベルの実験結果（赤線より下に下がった青線が、量子雑音が抑圧されている時間領域）

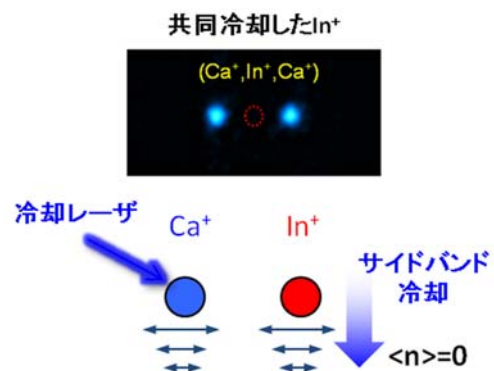


図6 2個のカルシウムイオン(Ca⁺)で共同冷却されたインジウムイオン(In⁺)(上) サイドバンド冷却により振動量子数 $n=0$ に初期化