

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9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、すでに光ファイバー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10年スケールで次々と物理的限界を迎えて行く。このような限界を打破し、インターネットの大容量化や新しい情報通信サービスを長期にわたって持続的に支えて行くためのICTを提供するために、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る。

平成20年度の成果

(1) 量子受信機の原理実証

インターネットの急速な普及など、光ネットワークの通信量は日々爆発的に増加し続けている。多重化信号のトータル光電力がファイバーの限界に達してしまうと、さらなる大容量化のためには、各信号を超微弱光にする必要が生じる。また惑星間レベルの超長距離の通信では、信号は宇宙で拡散し、やはり超微弱光しか受信できない。これら極限的な通信状況では、光子数個程度の極端に微弱な信号から最大限の情報を取り出す受信機の開発が重要課題となる。現在の光通信技術で最高の受信感度を実現できるのは、コヒーレント通信という方式である。しかし、光子レベルの超微弱光では、光の量子雑音の影響が顕著になり、コヒーレント通信の受信機でさえ低誤り率の信号検出は不可能になる。一方、量子物理学の理論では、この限界は原理的には超えられることが予言されていた。その実現の有力な候補が量子受信機である。しかし既存の量子受信機の提案は技術的難易度が極めて高く、研究開発はあまり進んでいなかった。

今年度は独自の理論研究を進め、現在の光技術でも十分に実現可能な新しい量子受信機の方式を提案した。また、その原理が正しいことを実験により検証した。図1に示すように従来のコヒーレント通信の受信方式

では、光の波の性質である干渉を使って、信号の位相と振幅を測定している。しかし量子雑音の影響をできる限り除去するには、光の波動性だけでなく量子性、すなわち光子としての性質も最大限に活用する必要がある。量子受信機では、光を適切に干渉させた後に、光子検出器で光子を直接検出することでそれを実現している。我々の提案では、干渉に用いる外部参照レーザーのパラメーターを量子力学的に最適化することで、既存の提案に比べ装置を劇的に簡略化することに成功した。

実験では、平均光子数が1光子以下の極めて弱い2値位相変調(BPSK)信号に対して、光子検出器の量子効率を補正した条件で、コヒーレント通信の理論限界を超える低誤り率での信号検出を世界で初めて実証した。量子受信機は新しい微弱光検出技術であり、深宇宙通信や超低消費電力通信以外にも、超高感度計測技術や低エネルギー粒子検出、周波数標準技術など様々な分野への応用が期待されている。

(2) コヒーレント状態の量子重ね合わせ状態の生成制御技術

光回線の究極の通信路容量に関する最新の理論 (V. Giovannetti, et al., Phys. Rev. Lett. 92, 027902 (2004).)によると、与えられた電力制限の下で究極の通信路容量を達成する方法は、送信側ではコヒーレント

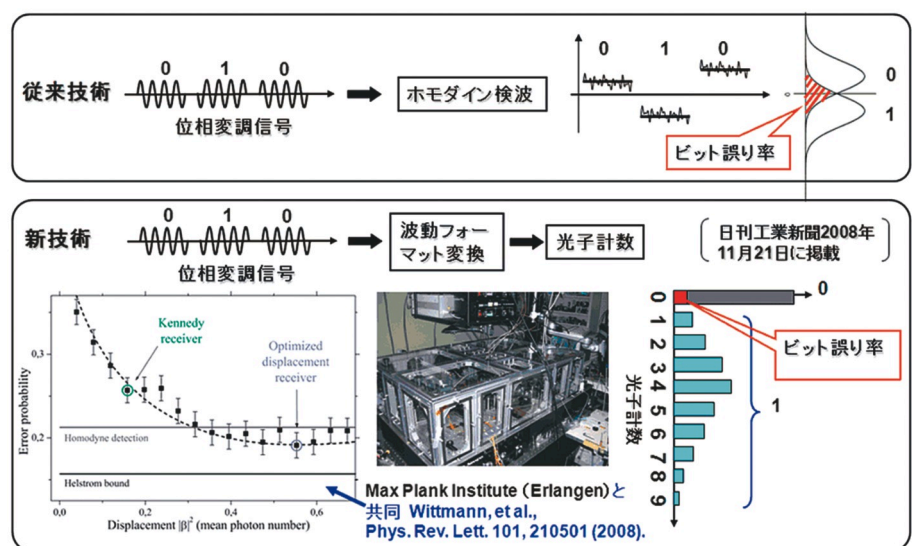


図1 従来のコヒーレント受信方式と量子受信機の構成の比較

状態に連続稠密変調を施したパルス列で情報を符号化して送信し、受信側ではコヒーレント状態にいったん量子信号処理を施してからパルス毎に量子最適受信機による測定を行って復号化する（量子一括復号）というものである。この技術は、超大容量データの低電力伝送を実現するための究極の技術である。量子一括復号を実現する方法は、あらかじめ受信回路の中にコヒーレント状態の量子重ね合わせ状態を多数用意しておき、それを入れてきた光波信号列と相互作用させ、適切な重ね合わせ状態に変換してから測定を行って信号判定を行うというものである。この相互作用は、従来の光波制御技術で実現できる。したがって、コヒーレント状態の量子重ね合わせ状態さえ生成制御できれば、量子一括復号を実現できることになる（図2）。

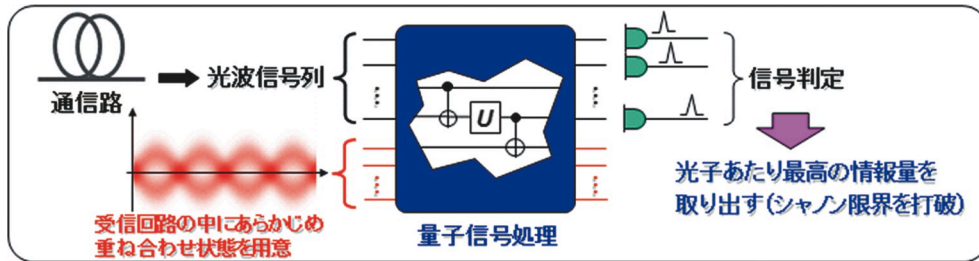


図2 量子一括復号の構成法

コヒーレント状態という巨視的な光波信号の量子重ね合わせ状態は、歴史的にシュレーディンガーの猫状態と呼ばれ、長年、量子力学のパラドックスであった。またその生成には高度な技術が要求され、光のシュレーディンガーの猫状態が生成できるようになったのは2006年以降のことである。当グループは、2006年にフランスのシャルル・ファブリ研究所やデンマークの、ニールス・ボーア研究所と並び、光のシュレーディンガーの猫状態の生成にはじめて成功した。そこで用いた手法はスクイズド光に光子検出器による測定誘起型非線形操作を施す技術である。これによって単一光子状態の生成や、異なる二つの波が同時に存在する量子力学的な重ね合わせ状態の自在な生成が可能になった。

今年度は、その制御技術の高度化に取り組んだ。具体的には、連続波スクイズド状態から任意の時間 t_1 、 t_2 において光子を一個ずつ抜き取る操作を実現し、偶・奇の両パリティのシュレーディンガーの猫状態を自在に生成する技術を開発した。特に、100ns程度のコヒーレンス時間内で時間間隔 $t_2 - t_1$ を変化させることにより、シュレーディンガーの猫状態の振幅サイズを増強できることを見出し、その機構が二つの異なる時間波形モードからの識別不可能な2光子抜き取り過程の量子干渉に起因すること解明した。

進行波のシュレーディンガーの猫状態は、図3のようなスキームで生成できる。

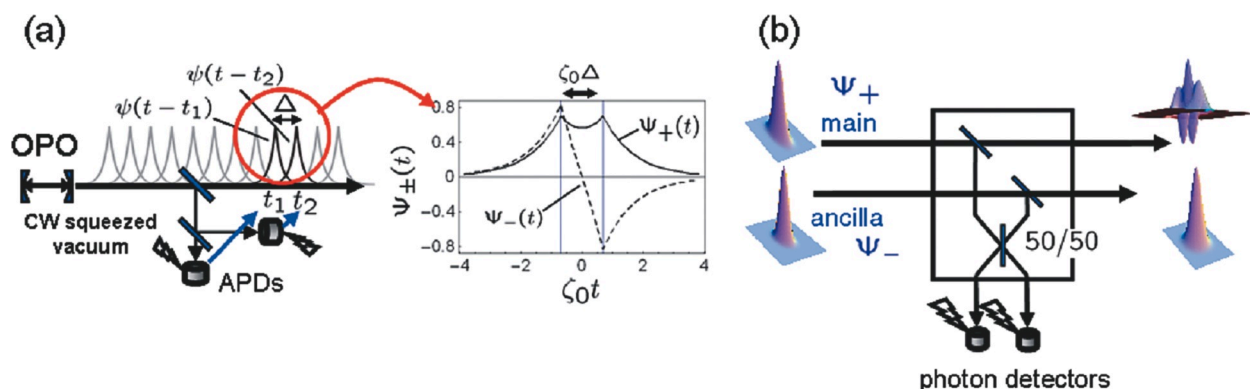


図3 2光子抜き取り操作によるシュレーディンガーの猫状態生成と補助状態によるサイズ制御。
(a)CWスクイズド光と時間モード。(b)等価的な2モードモデル。

まずスクイズド光の一部（数%）を高透過率のビームスプリッターごとにわずかに分岐させ、二つの光子検出器へと導く。分割されたビームには量子エンタングルメントが形成されており、光子が検出されたときのみ透過モードを観測することで高い非線形効果を誘起でき、シュレーディンガーの猫状態が生成される。光子検出イベントをトリガーとして透過光にはホモダイン測定を行い、量子トモグラフィーを実行することで、量子状態のウィグナー関数が再構成される。

この実験で用いるスクイズド光は連続波であり、直感的には指数関数型の波束 $\psi(t)$ の連続した系列とみ

なせる。各光子検出器での光子検出時間を t_1 、 t_2 とすると、これらの光子検出イベントをトリガーとして透過光には二つの波束 $\psi(t-t_1)$ 、 $\psi(t-t_2)$ が選択される(図3(a))。この二つの波束は、一般に重なっており非直交モードであるが、線形結合を取って直交する対称、反対称モード $\Psi_+(t)$ 、 $\Psi_-(t)$ を構成できる(図3(a)の上のモード波形)。偶パリティのシュレーディンガーの猫状態は、この対称モード $\Psi_+(t)$ に生成される。 $\Psi_-(t)$ には、わずかな光子数しか含まれないが、重ね合わせ振幅増強を行う際に重要な補助モードとして利用される。一方、もともとの二つの波束 $\psi(t-t_1)$ 、 $\psi(t-t_2)$ には、それぞれには奇パリティのシュレーディンガーの猫状態が生成されている。ホモダイン測定では、ホモダイン電流にこれらのモード関数によるフィルタリングを掛けることによって、所望の重ね合わせ状態にアクセスすることができる。

連続波スクイズド光のコヒーレンス時間内は100ns程度であるが、この範囲でトリガー光子の検出時間間隔 $\Delta=t_2-t_1$ を徐々に伸ばすことによって、偶パリティのシュレーディンガーの猫状態の振幅サイズを増強できることを見出した。その機構は以下のように理解される。図3(a)での2光子抜き取り操作では、互いに直交する対称モード $\Psi_+(t)$ 、あるいは反対称モード $\Psi_-(t)$ のいずれかのみから2光子が抜き取られる。図3(b)はこれを分かりやすく50/50ビームスプリッターを用いた空間モードのモデルで等価的に表したものである。光子のボーズ統計性によりそれ以外の可能性は排除される。ただし、対称、反対称モードのどちらから抜き取られたかは、量子力学的に全く識別不可能である。この量子力学的識別不可能性は、 $\Psi_+(t)$ 、 $\Psi_-(t)$ の2モード空間上の重ね合わせ状態を生成させる。重ね合わせ状態の二つの成分の比重は、トリガー時間間隔 Δ に依存する。ここで、 Δ を徐々に増やすと、補助モード $\Psi_-(t)$ の光子数もわずかに増加するが、その増加分が、メインの信号モード $\Psi_+(t)$ では、少数光子成分を抑圧するように働き、結果として信号モード $\Psi_+(t)$ での平均光子数が増加して、シュレーディンガーの猫状態の振幅サイズが増加する。

実験では、2光子が同時検出されるイベント数は1光子検出の確率の約2乗で極端に減少するため(数count/sec)、光学系の位相ロックを長時間安定化させるための制御系の改良などを行った。実験結果を図4に示す。系の不完全性を含めた数値解析とも良い一致が見られ、特に $\Delta=32\text{ns}$ では、 $|\alpha|^2=2.0$ というこれまでで世界最高のサイズの進行波のシュレーディンガーの猫状態を生成することに成功した。特に、このサイズで非古典性の直接的証拠である明瞭な負のウィグナー関数を観測したのは初めてである。

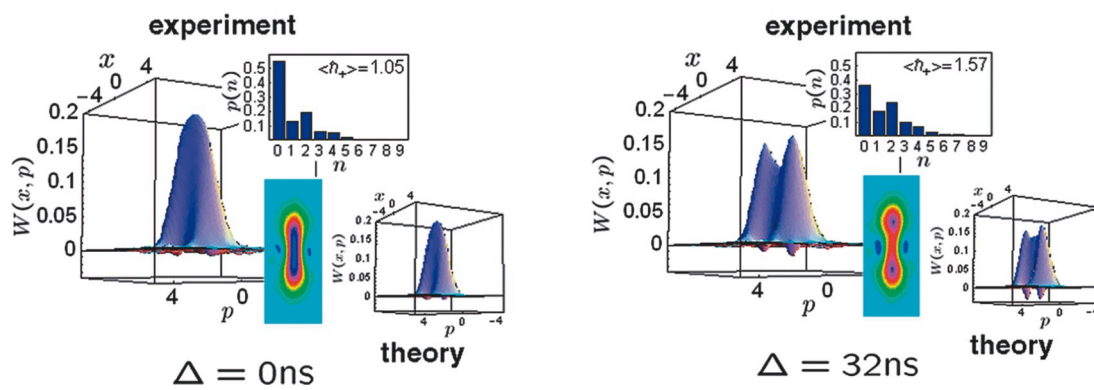


図4 偶パリティ・シュレーディンガーの猫状態の生成とサイズ制御の実験結果

(3) 量子鍵配送フィールド実験

現在インターネット上で使われている暗号技術は、公開鍵暗号と呼ばれる方式で、コンピュータの能力が飛躍的に向上すると、解読される危険性ははらんでいる。ところが、量子暗号は将来どんなに科学技術が進歩しても、絶対に盗み見られない特徴を持っている。

これまでの量子暗号システムのほとんどは、実験室内に設置したコイル巻き状の光ファイバーを用いて実験されており、それでもファイバー長が100kmを超えると、絶対安全な鍵の生成速度は1秒当たり数10ビットまで下がってしまうのが現状だった。また、鍵の生成速度を無理に上げると、ごく限られた盗聴法に対してしか安全性を保証できなくなるという難点もあった。さらに、送り手と受け手のタイミング合わせも、数メートル以下の電気ケーブルに限定されるなど、実用化には遠い実験となっていた。

今年度は、実際の敷設光ファイバーで97kmにわたり、絶対安全性を保証する「おとり信号付きBennett-Brassard 84」と呼ばれる暗号方式を用いて、世界最高の鍵生成速度(1秒当たり700ビット)を達成した。これは従来の室内実験に比べても10倍、敷設光ファイバー実験では100倍以上の向上に相当する。

3 活動状況

大幅な性能改善を実現した技術は、以下の三つに集約できる。

- ① 伝送途中での光子への擾乱をうまく相殺し、高い明瞭度で光子の暗号鍵を判定できる光回路（平面光回路量子干渉計）を開発したこと。
- ② 従来より高速かつ極めて低雑音で光子を検出できる超伝導単一光子検出器を開発したこと。
- ③ 一本の光ファイバーの中で、光子の伝送を邪魔することなく、送り手と受け手で正確にタイミングを合わせる技術（量子波長分割多重伝送技術）を開発したこと。

これらの技術を集積し、現在最高の安全性を保証する量子暗号鍵配送方式を敷設光ファイバー上で世界最長かつ最高速に動作させることに成功した。

今回の成果は、日本電気株式会社（以下NEC）がNICTの委託研究「量子暗号の実用化のための研究開発-課題イ-1 都市圏量子暗号ネットワーク技術-」の一環として開発した量子暗号システムと、NICT及びNIST（National Institute of Standards and Technology、米国コロラド州）が共同開発した高速かつ低雑音の超伝導単一光子検出器、さらに3機関共同で開発した量子波長分割多重伝送技術を用いて、NECとNISTが、NICTの有する敷設光ファイバー施設（JGN2plus）においてフィールド実験を行った成果である。

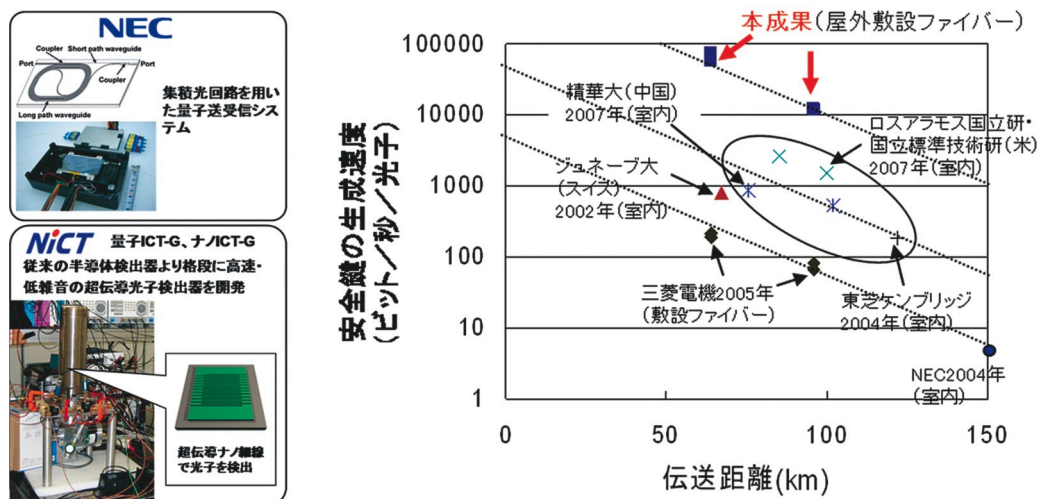


図5 量子鍵配送フィールド実験における安全鍵の生成速度