

量子もつれ光子対を用いた量子通信 ——量子情報の中継に向けて

量子暗号の通信距離をさらに増大し、大陸間規模の秘匿通信を実現するためには、量子もつれ状態を利用した量子情報の中継が必要であると考えられています。本稿では、量子もつれ光子対の発生と、それを用いた量子中継実現に向けたNTTの取り組みを紹介します。

たけすえ ひろき

武居 弘樹

NTT物性科学基礎研究所

はじめに

量子もつれを用いない量子暗号の鍵配送距離は、「送られる光子が光ファイバ伝送路の損失により減っていき、検出器の雑音に埋もれて検出できなくなる」地点で決まります。通常の光通信では、光増幅器を用いることにより伝送距離を延長できますが、「任意の量子情報を持つ光子のコピーをつくることはできない（増幅できない）」ことが安全性の源となっている量子暗号においては、この方法を使用できません。このため、これまでの光ファイバ上の量子暗号実験では200 kmの鍵配送距離が限界でした。今後、検出器の性能が飛躍的に向上しても、既存方式では500 kmを超える鍵配送距離を実現することは困難であると考えられています。一方、量子もつれ光子対を用いることにより、量子暗号の鍵配送距離を増大し、さらには量子情報の中継を実現することが可能です。

光通信波長帯における量子もつれ光子対の発生

量子もつれ光子対とは、2個の光子の間に古典論では説明のできない相関が存在する状態を指します⁽¹⁾。例えば

光の偏波状態に関する量子もつれ光子対（偏波もつれ光子対）においては、個々の光子の偏波状態は確定していませんが、2光子の測定結果には相関があります。NTTでは光ファイバ上での量子もつれ状態の伝送を目的として、光子の時間位置と位相に関するもつれ光子対（時間位置もつれ光子対）を発生しています。

時間位置もつれ光子対の発生の第一段階として、発生時刻に相関のある2光子を発生するために、自然放出パラメトリック過程^{*1}を用います。2次または3次の非線形光学効果^{*2}を有する媒質に、適切な波長のポンプ光を入力します。例えば2次の非線形光学媒質を用いる場合、自然放出パラメトリック下方変換（SPDC: Spontaneous Parametric Down-Conversion）により、ポンプ光の中から1光子が消失し、その光子とエネルギー保存則を満たす2個の光子（光子対）が生成されます。また、3次の非線形光学媒質の場合は、自然放出四光波混合（SFWM: Spontaneous Four-Wave Mixing）により、2個のポンプ光子が消失し、光子対が生成されます。いずれの場合も、2光子は必ず同時刻に発生する「時間相関光子対」

となっています。このとき、光子対の一方を「シグナル光子」、他方を「アイドラ光子」と呼びます。

時間位置もつれ光子対を発生するためには、ポンプ光として、コヒーレントな（光の位相関係が定まっている）2連光パルスを上記の非線形光学媒質に入力します。ポンプ光が十分弱く、2つのパルスがともに光子対を発生する確率が十分小さいとき、SPDCやSFWMにより、重ね合わせ状態を得ることができます。この状態は次の式で表すことができます。

$$|\Phi\rangle = (|1\rangle_s |1\rangle_i + |2\rangle_s |2\rangle_i) / \sqrt{2} \quad (1)$$

ここで、状態 $|X\rangle_y$ はモード y （1：シグナル、2：アイドラ）の光子が1個、 X 番目のパルスの位置に存在している状態を表します。この状態は、2光子の発生時刻に関する測定（状態 $|1\rangle_y$ にあるか、 $|2\rangle_y$ にあるか）において相関があるだけではなく、非直交な測定〔例えば各光子が状態 $|1\rangle_y$ 、 $|2\rangle_y$ の位相差0の重ね合わせ状態であるか $((|1\rangle_y + |2\rangle_y) / \sqrt{2})$ 、

*1 自然放出パラメトリック過程：パラメトリック増幅において、信号光の入力がなくても自然放出により光子が発生する過程。

*2 非線形光学効果：光強度に依存して、光信号の位相や周波数などが変調される現象。

π の重ね合わせ状態であるか ($(|1\rangle_y - |2\rangle_y)/\sqrt{2}$) に対しても相関のある結果を示すという特徴があります。

NTTでは、光ファイバ^{(1),(2)} やシリコン細線導波路⁽³⁾ 中のSFWMや、周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate) 導波路中のSPDC⁽⁴⁾ を用いて、光ファイバ通信に適した1.5 μm 帯の量子もつれ光子対の発生に成功しています。図1に光ファイバを用いた時間位置もつれ光子対発生の実験系を示します⁽²⁾。時間間隔1 nsの2連光パルスを用いて光ファイバ中のSFWMを誘起することにより、時間位置もつれ光子対を発生します。発生した光子対は、フィルタによりシグナルおよびアイドラ光子に波長で分離され、それぞれ1ビット遅延干渉計 (2連光パルスの時間差に相当する光路差を2腕につけた光干渉計) に入力されます。干渉計の出力ポートは単一光子検出器に接続されています。干渉計の2腕の間で誘起される位相差 ϕ_y を設定することにより、状態 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_y + e^{-i\phi_y}|2\rangle_y)$ にある光子を検出する、という測定を実現することができます。今回石英光波回路技術に基づいた1ビット遅延干渉計を使用し、基板温度の変化によって、干渉計の位相差を変化させることができました。この測定を両光子に対して行うことにより、位相差 ϕ_y の関数として、各光子の計数率および2光子の同時計数率を測定します。図2に実験結果を示します。図中×は、アイドラ光子の干渉計の位相差を変化させたときの、光子検出器におけるアイドラ光子の計数率を示します。このように計数率はほぼ一定であることから、各々の光子の位相差 ϕ_y は定まっていないことが分かります。一方、シグナル光子側の干

渉計位相差を固定し、アイドラ側干渉計の位相差を変化させ、両光子の同時計数を測定した結果を図中□で表しています。ここでは同時計数に明瞭な正弦波状の変化が観測されました。このことから、「各光子の状態は定まっていなくても、2光子の量子状態には相関がある」という量子もつれ状態の性質が確認できました。

量子もつれ光子を用いた量子暗号

量子もつれ光子対を用いて量子暗号 (量子鍵配送) を行うことができます。2人のユーザ (アリス、ボブ) の真ん中に配置された、量子もつれ光子対発生源から出力された光子対の一方をアリスに、他方をボブに、光ファイバを

介して送付します。アリスとボブは送付された光子に対し、2種類の測定からランダムに選んだ一方の測定を行います。測定の内容としては、例えば「光子が状態 $|1\rangle_y$ にあるか、 $|2\rangle_y$ にあるか」を判別する測定と、「光子が状態 $(|1\rangle_y + |2\rangle_y)/\sqrt{2}$ にあるか、 $(|1\rangle_y - |2\rangle_y)/\sqrt{2}$ にあるか」という2種類の測定を用いることができます。このような2測定は、前述の1ビット遅延干渉計と、その出力ポートに接続された2台の単一光子検出器により行うことができます。

NTTでは、時間位置もつれ光子対を用いた長距離量子鍵配送実験に成功しています⁽⁵⁾。この実験では、PPLN導波路を用いた高品質時間位

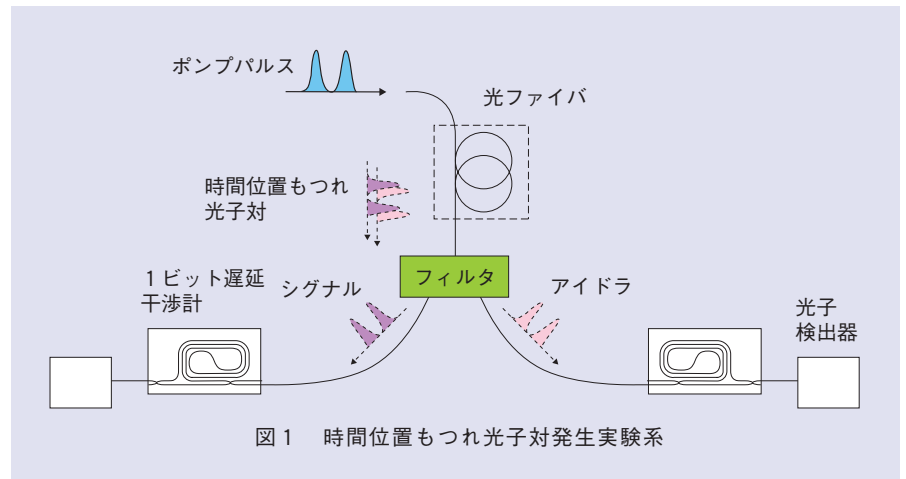


図1 時間位置もつれ光子対発生実験系

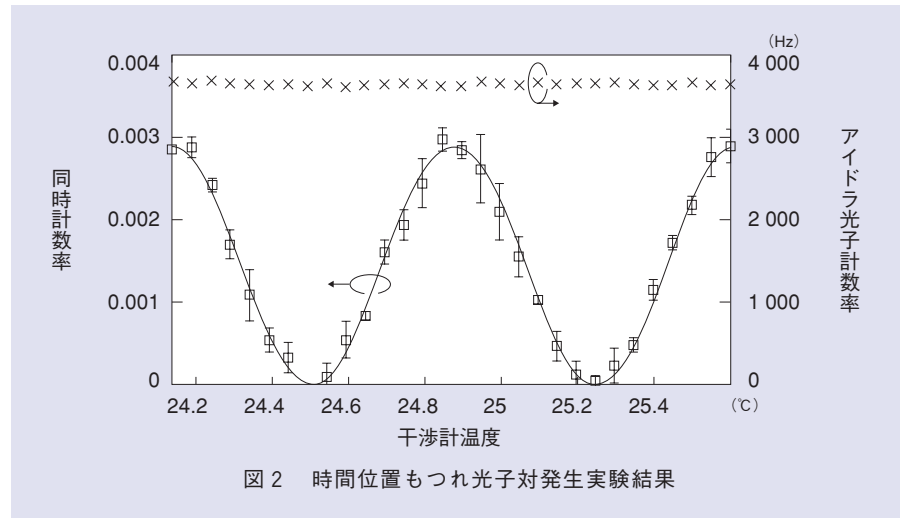


図2 時間位置もつれ光子対発生実験結果

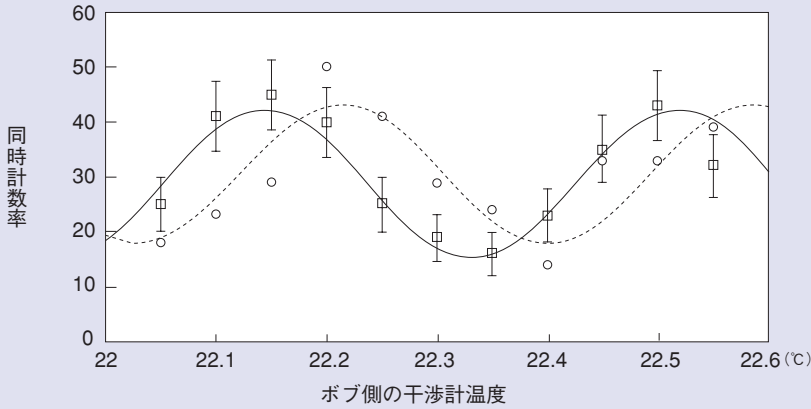


図4 量子もつれ交換実験結果

た事象を抽出することにより、独立した光源から出力され、もともと無相関であった2つの独立したシグナル光子の間に量子もつれを発生することができます。これら一連の操作を量子もつれ交換と呼びます。

中継ノードにおいて、ベル状態 $|\Psi_{\bar{r}}\rangle$ が観測された場合において、アリスとボブに送付された2つのシグナル光子に対して同時計数測定を行いました。その結果を図4に示します。この実験でボブ側の干渉計温度が変化すると、同時計数率にも明瞭な正弦波状の変化が観測されました。このことから、独立した2光源から発生したシグナル光子の間に、量子もつれが生成されることが確認できました。

上記では2つの光源を用いた1段の量子もつれ交換について述べましたが、3つ以上の量子もつれ光源を用いて量子もつれ交換を多段に接続することも可能です。これにより、原理的には量子もつれ状態を分配する距離を飛躍的に増大することができます。

今後の課題

前述の量子もつれ交換で生成された量子もつれ状態を用いた量子暗号により、鍵配送距離は大幅に増大すること

ができます。しかし現実には、各光源における光子対の発生確率は100%ではないため、多段の量子もつれ交換を行うと、量子もつれの生成確率は指数関数的に減少してしまいます。よって長距離においては、原理的に量子もつれの発生は可能ではありますが、その発生確率が著しく小さく、現実的には量子鍵配送などへの使用は不可能、ということが起こります。

この問題を解決するためには、光の量子状態を保存する「量子メモリ」が必要です。量子メモリは、光子の量子状態を原子の内部状態などに転写し、長時間保存した後、任意の時間に再び光子に再変換して出力するものです。これにより多段の量子もつれ交換をする場合も、ある1つの区間で量子もつれ交換に成功した光子を量子メモリに保存しておき、隣のリンクのもつれ交換の成功を待って、次の段階の量子もつれ交換を行うことができるため、もつれ生成確率の指数関数的減少を回避することができます。現在、NTTを含むさまざまな研究機関で量子メモリの実現を目指す研究が行われています。その一方で、量子中継システムをさらに高速化、高機能化するための理論研究も盛んに行われています。

このように、量子もつれ交換と量子メモリなどの新たな量子光制御技術を組み合わせることにより、スケラブルな量子情報の中継システムを実現することが可能です。

参考文献

- (1) 武居：“1.5 μ m通信波長帯における偏波もつれ光子対の発生,” NTT技術ジャーナル, Vol.18, No. 2, pp. 33-36, 2006.
- (2) H. Takesue and K. Inoue: “Generation of 1.5- μ m band time-bin entanglement using spontaneous fiber four-wave mixing and planar lightwave circuit interferometers,” Phys. Rev. A, Vol.72, No.4, 041804(R), 2005.
- (3) H. Takesue, K. Inoue, O. Tadanaga, Y. Nishida, and M. Asobe: “Generation of pulsed polarization-entangled photon pairs in a 1.55- μ m band with a periodically poled lithium niobate waveguide and an orthogonal polarization delay circuit,” Opt. Lett., Vol.30, No.3, pp. 293-295, 2005.
- (4) 武居・原田・都倉・福田・土澤・渡辺・山田・板橋：“シリコン細線導波路を用いた量子もつれ光子対発生,” NTT技術ジャーナル, Vol. 21, No. 12, pp. 32-35, 2009.
- (5) T. Honjo, S. W. Nam, H. Takesue, Q. Zhang, H. Kamada, Y. Nishida, O. Tadanaga, M. Asobe, B. Baek, R. Hadfield, S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, Z. Wang, K. Inoue, and Y. Yamamoto: “Long-distance entanglement-based quantum key distribution over optical fiber,” Opt. Express, Vol.16, No.23, pp.19118-19126, 2008.
- (6) H. Takesue and B. Miquel: “Entanglement swapping using telecom-band photons generated in fibers,” Opt. Express, Vol.17, No.13, pp.10748-10756, 2009.



武居 弘樹

光の最小単位である光子を自在に飼いならすことを目標にしています。「もつれた」光子を発生したり、光子の量子状態を「テレポート」したり、と一歩一歩目標に近づいてきました。次の目標は、光子を「止める」ことでしょうか。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子光物性研究部
TEL 046-240-3489
FAX 046-240-4726
E-mail takesue.hiroki@lab.ntt.co.jp