

光ファイバ中での量子もつれ光子対の300 km 伝送実験

量子暗号による秘匿通信の長距離化には、量子もつれ状態にある光子対を遠く離れた拠点間へ配送することが重要です。本稿では、光ファイバ中での量子もつれ光子対の長距離配送実験と、量子通信の長距離化に向けたNTTの取り組みを紹介します。

いながき たかひろ たけすえ ひろき
稲垣 卓弘 / 武居 弘樹

NTT物性科学基礎研究所

量子暗号通信と量子もつれ

現在利用されている暗号通信の多くは、暗号解読に要する膨大な計算時間が安全性の根拠になっています。しかし、この計算時間は因数分解など数学的な問題の難しさによるもので、将来の計算機やアルゴリズムの進歩によって短縮される可能性があります。これに対して、量子力学の原理に基づいた秘匿通信として量子暗号通信の研究が行われています。この量子暗号通信では、「1つの光子の持つ量子状態を、完全に複製することはできない」という物理的な性質を利用してランダムな暗号鍵を配送します。このランダムな暗号鍵を用いて暗号化を行うことで、安全性が保障された通信が可能になります。もし、盗聴者が伝送途中の光子を測定した場合、完全に同じ量子状態の光子を複製して再度送信することは原理的にできないので、盗聴行為の影響がエラーとして現れます。これによって、伝送路上の盗聴者の介在が検知可能となり、暗号鍵配送の際の盗聴行為を防止することができます。このように量子暗号通信では、暗号解読の計算時間ではなく量子力学の原理を安全性の起源とするため、今後、科学技

術が進歩したとしても、通信の安全性が脅かされる心配がなくなります。

この量子暗号鍵配送は、すでに都市圏の光ファイバ伝送路で実証実験が行われており、数10 kmの通信範囲で光子による暗号鍵配送が可能になっています。一方で、この量子暗号鍵配送によるネットワークをさらに広域な都市間、国家間に拡張するためには課題もあります。量子暗号鍵配送では光ファイバを用いて送信者から受信者へと光子を送信しますが、その際に光吸収などによって光子に損失が発生します。例えば、通信波長帯の光子1個を長さ300 kmの光ファイバ中で伝送した場合、受信者までその光子が伝達できる確率は約100万分の1にまで減少してしまいます。伝達される光子の数が少なくなると、光検出器によって発生するノイズに埋もれてしまい、配送が不可能になってしまいます。しかし量子暗号鍵配送では、任意の量子状態の単一光子を無雑音で増幅することは不可能なので、光増幅器での信号中継はできません。このため、光子伝送の成功確率と発生するノイズとの比率（信号雑音比）によって、量子暗号鍵配送の伝送限界距離は決まることになります。

この量子暗号鍵配送の伝送限界距離

を伸ばすために、量子もつれ状態^{*1}を利用して暗号鍵を配布する「もつれ量子鍵配送」が考案されました⁽¹⁾。もつれ量子鍵配送では、配送区間の間に配置した「量子もつれ光子対源」から、それぞれの通信者へと量子もつれ光子対を配送することで、離れた通信者間でランダムな暗号鍵を安全に共有できます。ここで従来の一方向の量子暗号鍵配送と同じ伝送距離で比較すると、光検出器で発生するノイズの量は変わりませんが、それぞれの光子の伝送距離は半分になるので伝送の成功確率は高くなります。これによって信号雑音比が改善され、伝送限界距離をさらに伸ばすことができます。

NTTでは、2008年に全長100 kmの光ファイバ上でもつれ量子鍵配送を実施し、2009年には量子もつれ光子対の200 km配送実験を実現してきました⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。最近、低ノイズ化および高効率化された超伝導単一光子検出器を利用することで、量子もつれ光子対の配送距離をさらに全長300 kmに拡張することに成功しました⁽⁵⁾（図1）。

*1 量子もつれ状態：複数個の量子が1つの量子状態を形成している状態をいいます。この複数の量子の間には、古典力学では説明のできない相関が現れます。

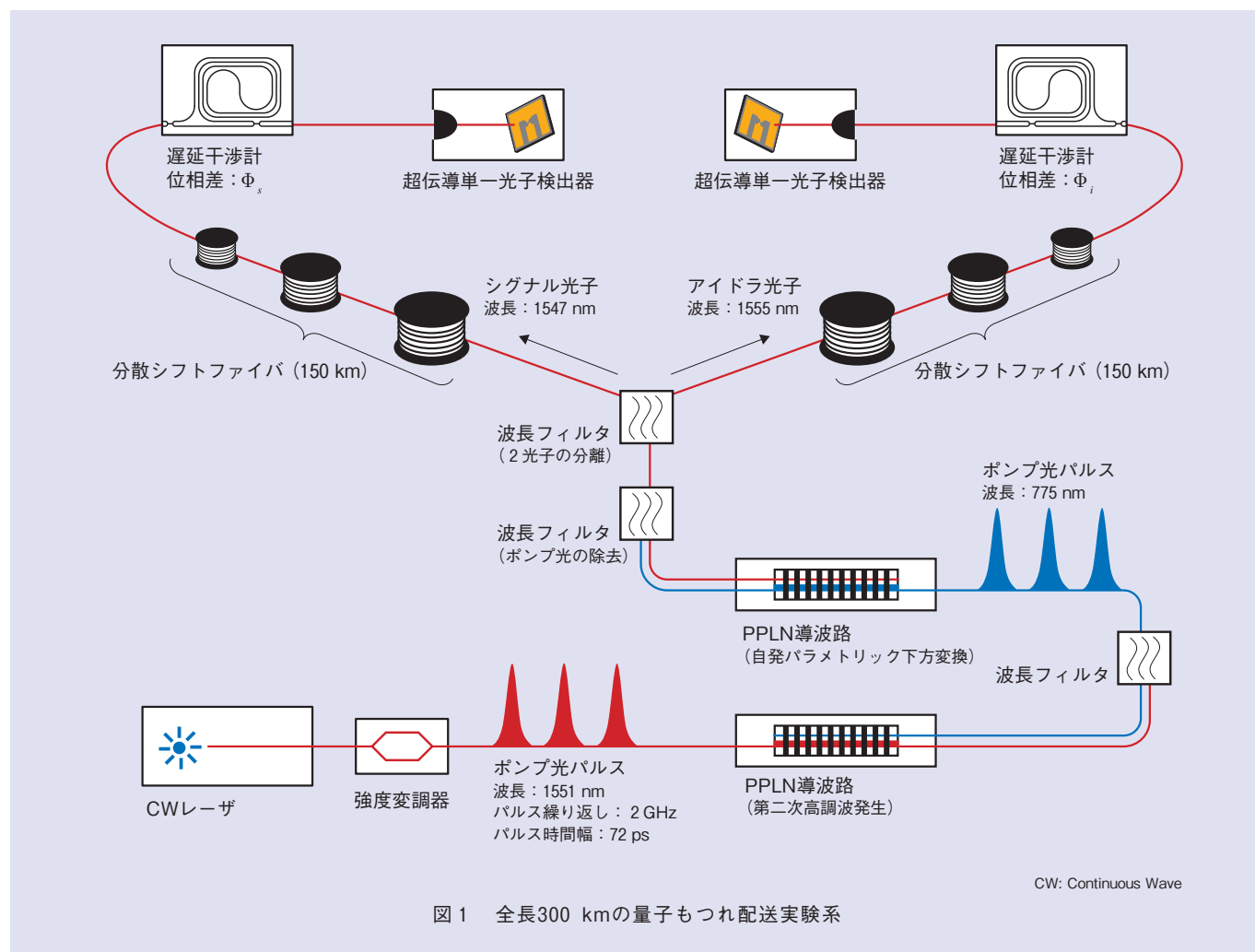
量子もつれ光子対の発生

量子もつれ光子対とは、2つの光子が絡み合って1つの定まった量子状態を形成している状態を指します^{(1),(2)}。このとき、各光子だけの量子状態に着目すると、1つには定まらない不確定な状態となっています。この量子もつれ光子対では、どちらか一方の光子に対して測定を行うと、他方の光子の量

子状態もその測定結果を反映して1つに定まります。このため2つの光子の測定結果には、2つの光子が遠く離れていても必ず相関が現れることになります。これは、従来の古典力学では説明のできない特殊な相関になっています。

NTTでは光ファイバ中での量子もつれ光子対の長距離伝送に向けて、光子の時間位置に関する量子もつれ光子対

(時間位置もつれ光子対)を利用して、時間位置もつれ光子対を発生させるためには、まず2個の光子が同時に発生する仕組みが必要です。この実験では、2光子発生のために自然放出パラメトリック過程を用いています⁽⁶⁾。例えば、2次の非線形光学効果を持つ媒質に適切な波長のポンプ光を入力すると、自然放出パラメトリック下方変換 (SPDC: Spontaneous Parametric



Down Conversion) によって、ポンプ光に含まれる多数の光子のうちの1個が、その光子の運動量とエネルギーを保存するかたちで2個の光子に変換されます。これによって、同時刻に2個の光子を発生させることが可能になります。このとき、発生する光子対の一方を便宜的に「シグナル光子」、他方を「アイドラ光子」と呼びます。今回は、2次の非線形光学媒質として周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate) 導波路を利用して、時間位置量子もつれ光子対の発生を行っています (図2)。PPLNではニオブ酸リチウムの自発分極を周期的に反転させることで、SPDCの発生効率を飛躍的に向上させています。また、導波路の入出力は光ファイバに直接接続されているため、ポンプ光の入力と発生した

光子対の出力を、光ファイバ端子を介して簡単に行うことができます。

次に、ポンプ光として位相関係の定まった2連の光パルス为非線形光学媒質に入力することで、2つの時間位置に位相関係を保ったまま光子対が生成されるようになります。このとき、2つの光パルスの各々が同時に光子対を生成しない程度に、光パルス強度が十分に小さいならば、次の式で表されるような重ね合わせ状態を生成することができます。

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

ここで $|x\rangle_y$, 状態はモード y (s : シグナル, i : アイドラ) の光子が x 番目の時間位置に1個存在している状態を表しています。

量子もつれの検出と2光子干渉実験

時間位置量子もつれ状態の検出には、それぞれの光子に対して状態 $|1\rangle_s$ と $|2\rangle_y$ の重ね合わせ状態の測定を行います。この重ね合わせ状態は、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腕に設けた光干渉計) を用いて、異なる時間位置の状態を干渉させることで測定することができます。この干渉計の出力ポートは超電導単一光子検出器に接続されていて、干渉計の2腕の間の位相差 Φ_y を設定することにより、状態 $(|1\rangle_s + e^{-i\Phi_y} |2\rangle_y) / \sqrt{2}$ にある光子を選択的に検出することが可能となります。今回の実験では、石英光波回路技術に基づいた遅延干渉計を用いており、位相差 Φ_y は干渉計の基板温度の変化によって任意に制御することができます。

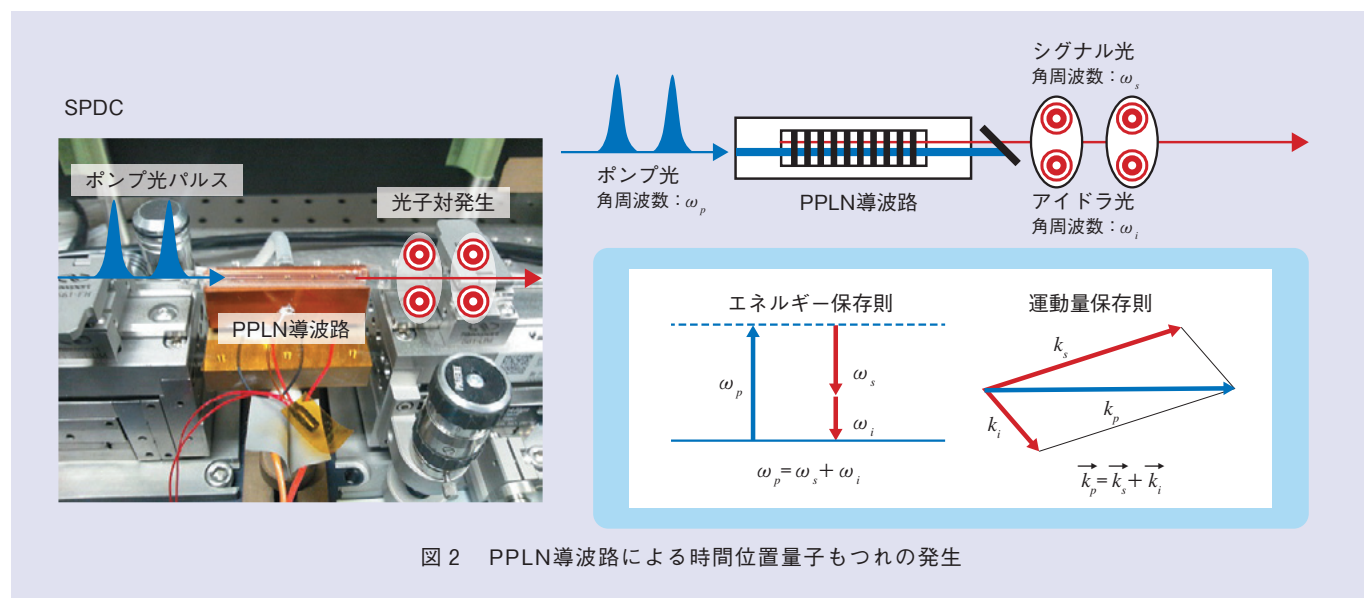


図2 PPLN導波路による時間位置量子もつれの発生

すでに述べたように、量子もつれ状態では、2つの光子の関係性は定まっていますが、1つひとつの光子の量子状態は定まっていません。このため、どちらか1つの光子だけの光検出を行った場合、位相差 Φ_j を変えてどの状態を測定しても、光子が検出される確率は同じになります。これに対して、シグナル光子とアイドラ光子の両方が同時に光検出される確率を測定すると相関が現れます。図3の実験結果は、光子対発生源からそれぞれ150 kmの光ファイバを伝搬した後の2光子同時計数が、2つの干渉計の位相差 Φ_s 、 Φ_i によって変化する様子を表しています。この現象は2光子干渉と呼ばれ、1つの光子の測定で見えなかった

相関が、2つの光子を同時に測定することによって初めて現れる現象です。今回の実験では、300 km離れた光子どうしであっても、その相関関係は保たれているということが確認されました⁽⁵⁾。

ベルの不等式の破れ

ここで、2光子同時計数に表れる相関が、本当に古典論では説明できない量子もつれ状態によるものか否かを判別する手段として、ベルの不等式^{*2}の破れを測定する方法があります。ベルの不等式の実験では、4つの異なる位相差をそれぞれの干渉計に設定し、合計16種類の位相差 Φ_s 、 Φ_i の組合せにおいて、2光子同時計数を測定する

ことで求められるSパラメータと呼ばれる量の値が2を超えるかどうかを判定します。古典論で説明できる2光子間の相関としては、2光子の状態が最初から1対1に対応関係の定まった状態として考えられます。このような古典的な相関を持った光子対での測定では、いかなる状態の組合せにおいても観測されるSパラメータが2を超えることはありません。

一方、量子もつれ状態ではそれぞれの光子の状態は測定が行われるまでは不確定のまま配送され、一方の光子の測定を経て初めて、他方の光子もその測定結果と相関のある量子状態へと定まります。この効果によって、観測されるSパラメータは2を超え、ベルの不等式を破ります。

今回の実験では、長距離配送された量子もつれ光子対に対してSパラメータの測定を行い、 2.41 ± 0.14 という値を得ました。この結果から、量子もつれ状態による非古典的な相関が光路長で300 km離れた光子対においても現れ、ベルの不等式を破ることが実証されました。

量子暗号通信の長距離化に向けて

長距離の量子もつれ光子対配送実験では、もつれ光子対源から単一光子検出器にまで光子が到達する確率が、光

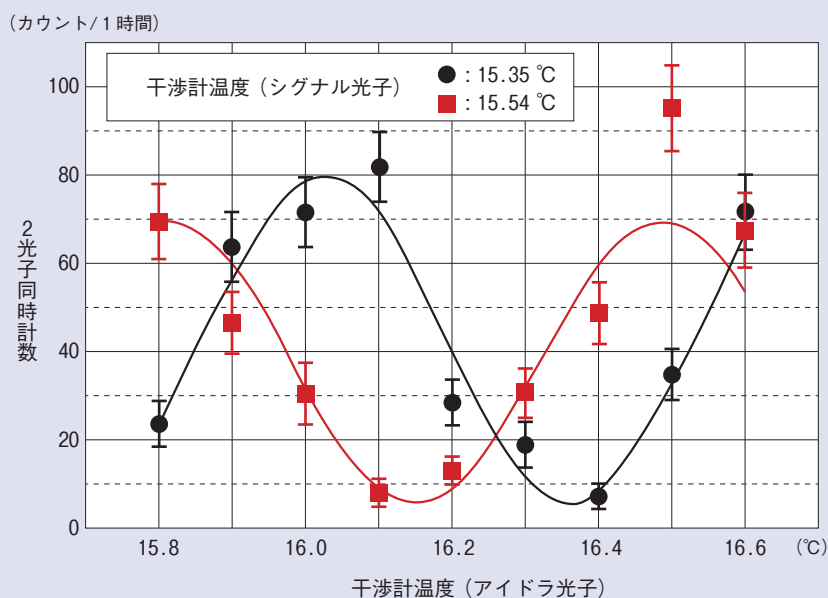


図3 300 km配送された量子もつれ光子対の2光子干渉

*2 ベルの不等式：量子もつれの判定に用いられる不等式で、2つの粒子間に現れる古典的な相関の上限を与えます。このベルの不等式を破ることで、量子力学的な相関が存在することを確認します。

ファイバの損失によって非常に低くなります。そのため、もつれ光子対源と単一光子検出器の低ノイズ化が、信号雑音比を維持するために重要となります。今回NTTで利用した、SPDCによる時間位置もつれ光子対発生では、ポンプ光と発生する光子対の波長が大きく離れているので、ノイズ源となるポンプ光を波長フィルタで除去することで、もつれ光子対源が低ノイズ化されました。また超伝導単一光子検出器では、素子を液体ヘリウムで冷却することで熱雑音を抑え、非常に低ノイズでの光検出が可能になりました。さらに今回の実験では、光子配送の時間当りの成功率を高めるために、量子もつれ光子対を周波数2 GHzで高速に繰り返し発生させ、検出効率がおおよそ20%に向上した高感度な超伝導単一光子検出器を導入しました。その結果、全長300 kmの長距離配送実験においても、光ファイバでの大きな損失にもかかわらず、1時間当たり約100回の2光子同時計数を得ることが可能となりました。

このように、もつれ光子対源や単一光子検出器の進歩によって、低ノイズかつ高効率な光検出が可能となり、量子もつれ配送の限界距離は伸びてきました。ここで、さらに広範囲な量子通信網を構築するために期待されるのが、量子中継です。量子中継では、通信距離をいくつかの短距離の中継区間に分けて、その区間内でそれぞれ量子もつれ配送を行います。そしてベル測

定と呼ばれる測定を中継地点で行い、すべての中継区間の量子もつれをつなぎ合わせることで、最終的に遠く離れた地点間で量子もつれ状態が共有できます⁽³⁾。この量子中継の鍵となるのが、量子状態を一時的に保持する量子メモリです。量子メモリは、配送された光子の量子状態を原子集団などの量子状態に転写し、任意の時間後に再度光子として出力できる機能を持ちます。この量子メモリの機能によって、それぞれの中継区間で配送された量子もつれ状態を、ほかの中継区間での量子もつれ配送が完了するまでの間保存することが可能となります。

今後の展開

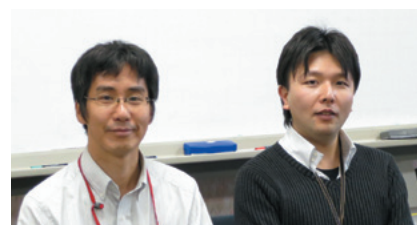
NTTではこの量子中継の実現に向けて、固体中の原子集団や超伝導磁束量子ビットを利用した量子メモリの研究を進めています。今後はこれらの量子メモリと、今回構築した量子もつれ光子対の長距離配送実験を組み合わせることで、量子通信のさらなる長距離化を目指していきます。

参考文献

- (1) A. K. Ekert: "Quantum cryptography based on Bell's theorem," Phys. Rev. Lett., Vol.67, No.6, pp.661-663, 1991.
- (2) 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.
- (3) 武居: "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," NTT技術ジャーナル, Vol.23, No.6, pp.62-65, 2011.
- (4) H. Takesue and B. Miquel: "Entanglement

swapping using telecom-band photons generated in fibers," Opt. Express, Vol.17, No.13, pp.10748-10756, 2009.

- (5) T. Inagaki, N. Matsuda, O. Tadanaga, M. Asobe, and H. Takesue: "Entanglement distribution over 300 km of fiber," Opt. Express, Vol.21, No.20, pp.23241-23249, 2013.
- (6) 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.



(左から) 武居 弘樹/ 稲垣 卓弘

量子もつれは、どこまでもよく伸びるお餅のようなものです。今回の実験では、その量子もつれの相関が300 km引き伸ばしてもちぎれないことが確認できました。光子対のもつ量子力学的な状態が、数100 kmというスケールで広がっていくことはとても不思議なことです。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
量子光物性研究部
量子光制御研究グループ
TEL 046-240-3274
FAX 046-240-4726
E-mail inagaki.takahiro@lab.ntt.co.jp