

Redefining Measurement

Use Case: Quantum Optics

量子インターネットの実現に向けて



お客様：ICFO 光科学研究所

研究分野：量子光学

国：スペイン

Customer Need



ヘラルド・エンタングルメントの実験では、ICFOはできるだけバックグラウンド・ノイズが少なく、効率的に光子を集める必要がある。

Solution



1450nmで80%以上の量子効率と14Hz以下のダークカウント・レートを実現したID281 SNSPD

Results



遠隔地の量子メモリの量子もつれに成功し、通信波長の光子とオンデマンドのマルチモード量子メモリとの量子もつれを実現

コンテキスト

量子インターネットを実現するためには、量子ネットワーク上にもつれを分散させることが非常に重要です。量子通信チャンネルを構築する際には、量子リピータ技術によってチャンネルの範囲を広げることができます。さらに、遠隔地のノード間で任意の量子状態を共有する分散型量子コンピューティングが可能になり、量子コンピューティングプロトコルの豊富なレパートリーにアクセスできるようになります。

このような遠隔量子もつれ配信には、3つの重要な機能が必要です。

1. 量子もつれ状態の生成
2. 量子状態を制御可能な長さの時間、高い精度で保存
3. 飛行している量子ビット（典型的には通信波長の光子）と静止している量子ビット（典型的には質量のある粒子）の間で量子状態の相互変換

バルセロナのICFOのHugues de Riedmattenのグループに所属するSamuele Grandi、Dario Lago-Rivera、Jelena V. Rakonjac、Alessandro Seriは、この3つの能力を融合させることを自らに課し、最近、それを実証しました。‘[Telecom-heralded entanglement between multimode solid-state quantum memories](#)’ (Nature 2021) [1] , ‘[Entanglement between a telecom photon and an on-demand multimode solid-state quantum memory](#)’ (arXiv 2021) [2].

お客様のニーズ

ICFOでは、自発的パラメトリックダウンコンバージョン (SPDC) によって生成された光子ペアの量子もつれを中心に、もつれ状態の光子を原子周波数コム (AFC) やスピン波 (SW) を用いた量子メモリに保存する研究を行っています。

ICFOグループの量子もつれ光源では、SPDCなどの周波数混合プロセスで強相関の光子のペアを生成します。このペアの各光子を実験の異なるアームに送り、ある検出器に「アイドラー」光子が到着すると、「シグナル」光子がいつどこで見つかるかがわかるようになっています。このように、ヘラルドフォトンを観測するには、2つのフォトンの同時計数を測定する必要があります。

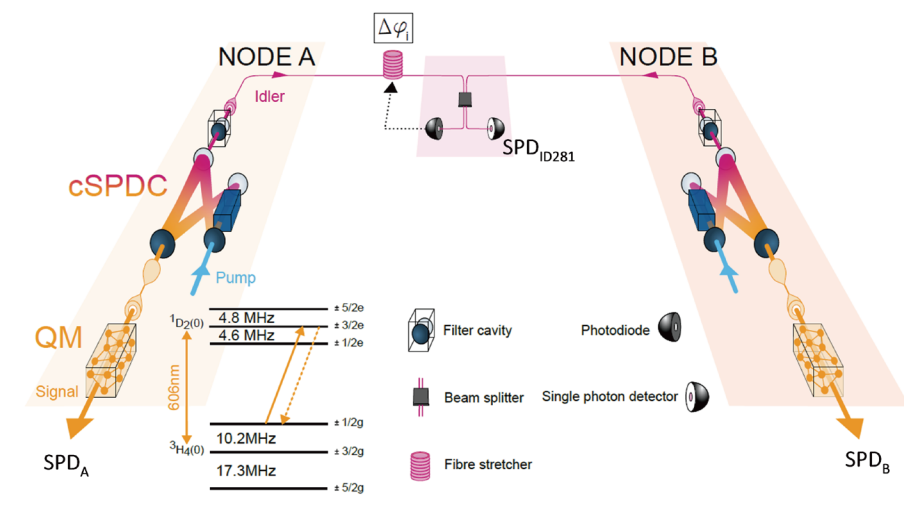


図1：実験に使用する2つのノードの構成 (D. Lago-Rivera, S. Grandi et al. (2021) [1]より引用)。各ノードは独自のSPDC源と量子メモリを持っています。中央のID281 SNSPDで1436nmのアイドラー光子が検出されると、2つのノードに1つの606nmのシグナル光子が存在することになり、それに続いて2つの量子メモリーが量子もつれを引き起こすこととなります。

ICFOグループの実験はこれを発展させたもので、2つの光子ペア源を用いて、遠隔地にある2つの量子ノード間(または1つのノードと1つの信号光子間)の量子もつれを予告します。彼らの配置(図1参照)では、一度に1つの信号光子しかシステム内にありません。しかし、不要な2光子イベントが発生していないことを確認するために、実験では検出器SPD-ID281、SPD-A、SPD-Bの間で3重共役が発生する割合を測定する必要がありました。今回の実験を量子もつれの交換に発展させれば、将来的には4重光子の同時計数を測定したいと考えています。

ソリューション

このような同時計数測定を行うには、時間相関単一光子計数法 (TCSPC) が必要です。TCSPCの光子検出統計はポアソン分布に従うため、検出器の効率と検出器のダークカウントレートが重要なポイントとなります。検出器の効率が上がれば、同等の統計量を得るために必要な時間も2～3の累乗で短縮されます。また、ダークカウントレートが低下すると、測定される統計の質も同様に向上します。

そこでID Quantique社は、ICFOにID281超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SNSPD) を提供しました。これらの検出器は、目的の波長 (アイドラー・フォトン検出には1450nm) で80%以上の効率を持ち、14Hz以下のダークカウントレートを実現しています。

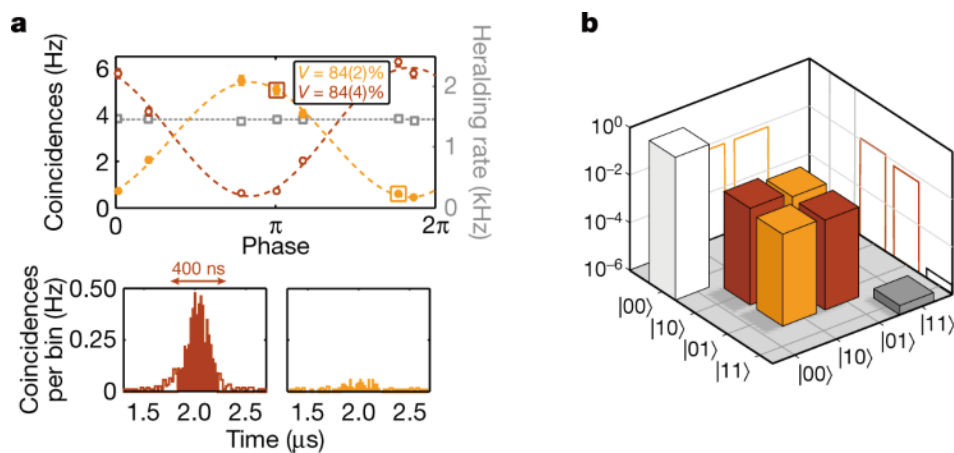


図2: 2 μs の保存時間後の、再結合されたノードAとノードBの信号光子の測定結果 (D. Lago-Rivera, S. Grandi et al. (2021) [1]より引用)。ノードAとBの信号が組み合わされた後のID281 SNSPDと2つの検出器のうちの1つでの検出イベントの間のコインシデンスを測定。

成果

ICFOは、遠隔地にある量子メモリの絡み合いに成功し[1]、また、通信波長の光子とオンデマンドのマルチモード固体量子メモリとの間のエンタングルメント[2]を、実用的な時間内に実現し、将来の量子中継器の基礎を築きました。

“

新しいID281検出器の高効率と低ダークカウントレートは、S/N比の向上と実験時間の大幅な短縮に直結し、短時間で安定した測定を可能にし、長期にわたる安定化の必要性を排除しています。

サムエレ・グランディ
ICFO 光科学研究所

今回の研究では、2つの量子メモリ間で物質と物質の絡み合いを実現し、1.43kHzの絡み合いレートで2 μ sの記憶時間を実現しました。これは、現在の量子メモリー間の記録の40倍に相当するものです。さらに、保存時間が25 μ sと長くなっても、ゼロから5標準偏差以上の一致が見られ、これは量子もつれが継続していることを示しており、5kmの光ファイバに量子もつれを分散させることができます。

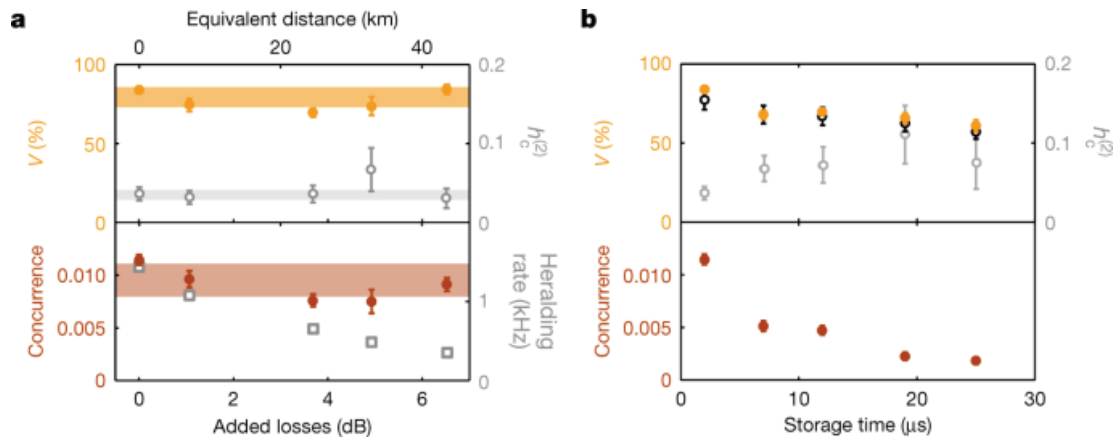


図3：(a) 人為的にチャネル損失を追加して長距離をシミュレートした場合と、(b) QMの保存時間を25 μ sまで増加させた場合の、全体の量子状態の可視性と同時性の測定 (D. Lago-Rivera, S. Grandi et al. (2021) [1]より引用)。

本研究は、スケーラブルな量子中継器を構築するために必要な主要構成要素の一部を示しています。この研究は、数十キロメートル離れた異種の量子状態間で通信するために必要なインフラが大きく進歩したことを意味し、そこから大都市規模の分散型量子コンピュータであらゆる種類の操作を行うことができます。今回の成果は、量子インターネットの実現に向けた重要な一歩です。



[1] 'Telecom-heralded entanglement between multimode solid-state quantum memories', D. Lago-Rivera, S. Grandi et al., 2021, [Nature 594, 37-40 \(2021\)](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03400-0)

[2] 'Entanglement between a telecom photon and an on-demand multimode solid-state quantum memory', J. V. Rakonjac, D. Lago-Rivera et al., 2021, [arXiv:2106.05079](https://arxiv.org/abs/2106.05079)