

多数の光子の“もつれ”を一括で測定する新技術を開発 — 量子コンピュータやネットワークの効率化に期待 —

概要

電子や光子などの個々の量子状態を制御することで、飛躍的な計算能力を実現する量子コンピュータや、盗聴不可能な暗号を実現する量子暗号、さらに、従来の計測技術の限界を超える量子センシングなど、「量子技術」の研究が精力的に進められています。その中でも、光子は、長距離伝送が可能で、また室温でも量子状態が保存されるため、有力な担体です。特に、多数の光子が複雑に重ね合わさった「量子もつれ」状態は重要ですが、状態推定に一般的に用いられる方法では、光子の数に対して指数関数的に多くの回数の測定が必要となり、問題となっていました。

今回、京都大学大学院工学研究科 朴 渠培（パク コベ）博士課程学生（研究当時）、岡本亮 同准教授、竹内繁樹 同教授らの研究グループは、広島大学大学院先進理工系科学研究科 Holger F. Hofmann 教授と共に、多数の光子からなる「W 状態」と呼ばれる量子もつれ状態を、一括で一度に識別する「もつれ測定（entangled measurement）」の方法を新たに開発、さらにその実証実験に世界で初めて成功しました。実験では、独自に開発した安定性の高い光量子回路を用いることで、 0.871 ± 0.039 という高い「測定識別忠実度」を達成しました。今回確立された方法は、多数の光子間の複雑な量子もつれ状態を効率的に識別するだけでなく、多数の光子に対する量子テレポーテーションなどの実現に新たな道を開くものであり、将来の量子コンピュータの高度化や、より複雑な量子ネットワークの構築にブレークスルーをもたらすものです。

本成果は、2025年9月12日に米国の国際学術誌「*Science Advances*」にオンライン掲載される予定です。

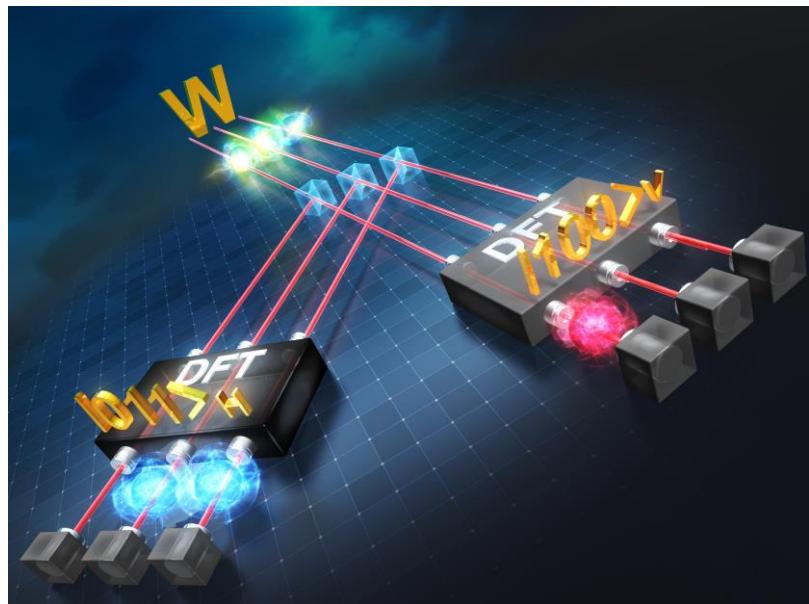


図1 実現した、W 状態のもつれ測定のイメージ図

1. 背景

電子や光子などの量子は、通常の物体とは異なった振るまいをします。その量子の個々の振るまいや相関（量子もつれ）を制御することで、飛躍的な計算能力を実現する量子コンピュータや、盗聴不可能な暗号を実現する量子暗号、さらに、従来の計測技術の限界を超える量子センシングなど、「量子技術」の研究が精力的に進められています。その中でも、光子は、長距離伝送が可能で、また室温でも量子状態が保存されるため、有力な担体です。特に、さまざまな経路（モード）に存在する多数の光子が量子力学的な相関をもつ「多光子量子もつれ状態」は、光量子暗号の長距離化や、光量子センシング、また光量子コンピューティングのリソースとして注目されています。

これらの技術を実現するためには、多光子量子もつれ状態を自在に生成するだけでなく、与えられた状態がどのような多光子量子もつれ状態であるかを効率的に「識別」する計測技術が不可欠です。しかし、状態推定に一般的に用いられる、個々の光子を個別に測定する方法（量子トモグラフィー）では、光子の数に対して指数関数的に多くの回数の測定が必要となり、問題となっていました。

それに対して、入力された多数の光子を、特定の「多光子もつれ状態」にあるかどうかを一括して測定するのが「量子もつれ測定(entangled measurement)」です。2つの光子（量子ビット）のもつれ状態（ベル状態）に対するもつれ測定である「ベル測定」は、量子テレポーテーションなどで中心的な役割を果たしています。光子数が3以上の場合の、「多光子量子もつれ状態」に対するもつれ測定は、「グリーンバーガー＝ホーン＝ツァイリンガー(Greenberger-Horne-Zeilinger, GHZ)状態」に対するものが1998年に提案され、その後実現していましたが、より応用の幅が広いとされる、任意の光子数の「W状態」のもつれ測定は提案されておらず、また実験的にも実現されていませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究の主な成果は次の3点です。

1. 任意の光子数の「W状態」に対するもつれ測定を発案

W状態が持つ「巡回シフト対称性」という性質に着目し、任意の光子数のW状態に対して、「量子フーリエ変換」を行う光回路を用いることで「量子もつれ測定」を実現する方法を理論的に提案しました。この方法は、入力された光子がどのようなW状態に存在するかを、1回の測定で、原理的には100%の効率で識別することができます。

2. 高安定な光量子回路による計測装置の実現

提案方式を3つの光子に対して実証するための装置を、変形サニヤック干渉計に独自に開発した特殊な光学素子を埋め込んだ、極めて安定な量子フーリエ変換光回路を用いて実現しました。これにより、ナノメートルオーダーの極めて高い精度が要求される光回路を、外部からの制御なしに長時間安定して動作させることに成功しました。

3. もつれ測定の実証と性能評価

3つの光子を適切な偏光状態で装置に入力することで、構築した装置が3光子W状態を識別可能かどうかの評価実験を行いました。その結果、さまざまなW状態に対する光子検出信号のパターンは、理論予測と良い一致を示しました。さらにそれらの結果から、「測定識別忠実度(measurement discrimination fidelity, MDF)」を求めたところ、 0.871 ± 0.039 という高い値を達成しました。この値は、入力された3つの光子に対する測定を2つの部分に分けられる場合の測定(bi-separable measurement)により達成できる理論限界($2/3 \approx 0.667$)を明確に上回っていることも確認しました。

3. 波及効果、今後の予定

W状態に対するもつれ測定の実現は、多数の光子が複雑に重ね合わさった「量子もつれ」状態の識別を飛躍的に効率化するだけでなく、多数の光子に対する量子テレポーテーションなどの実現に路を拓く成果です。これにより、多数の利用者間での新しい量子通信プロトコル（多数当事者間の測定器に依存しない量子鍵配達など）の実現や、多光子量子もつれ状態の転送、さらには測定型の量子コンピューティングの新たな手法につながることも期待されます。

今後は、今回実証した手法を、さらに多くの光子を含む大規模で、より一般的な多光子量子もつれ状態の「量子もつれ測定」へと拡張を目指します。さらに、今回実現した光量子回路のオンチップ化にも取り組む予定です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構（JST） 戰略的創造研究推進事業 ERATO 竹内超量子もつれプロジェクト（JPMJER2402）、同 CREST（JPMJCR1674）、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）（JPMXS0118067634）、日本学術振興会（JSPS） 科学研究費補助金（24H00195, 21H04444）等の支援を受けて実施しました。

＜用語解説＞

光子：光を構成する素粒子のこと。

モード：光（光子）の伝搬経路のこと。

多光子量子もつれ：一般に量子もつれ（Quantum Entanglement）とは、2つの異なるシステム間において、それぞれに別々の量子状態を割り当てることができないほど強い相関が存在する状態を指します。多光子量子もつれ状態は、多くの光子が互いに相関を持ち重ね合わさった状態で、それらをどのような2つの組みに分けても量子もつれ状態にある、という特徴を持ちます。

グリーンバーガー＝ホーン＝ツァイリンガー(Greenberger-Horne-Zeilinger, GHZ)状態：多光子量子もつれ状態の代表的な例。N量子ビットの場合、「全ての量子ビットが1」という状態と「全ての量子ビットが0」という状態の重ね合わせである。いずれか1つの量子ビットを観測するだけで、すべての量子ビットが分離可能な状態になるため、非常に壊れやすい。

W状態：多光子量子もつれ状態の代表的な例。N量子ビットのW状態の例として、「何れか1つの量子ビットが1で、残りは0」というN個の状態が重なった状態がある。GHZ状態とはことなり、いずれか1つの量子ビットを観測しても、残りの状態は多光子量子もつれ状態として存続する。

量子フーリエ変換回路：フーリエ変換とは、 x に関する関数 $f(x)$ が入力された際に、 x に比例する位相項 $\exp(ixa)$ を掛け合わせながら、足し合わせる（積分する）ことで、 a に関する関数 $F(a)$ へと変換する操作のこととで、関数の周期性を解析する手法などとして、広く利用されており、この分野を開拓したフランスの数学者 J. B. J. Fourier にちなんで名付けられています。本研究における量子フーリエ変換回路は、入力された量子状態（量子重ね合わせ状態）に対して、同様の操作を行う回路です。

<研究者のコメント>

現在、光子を含めた量子技術の研究開発が進められています。その研究開発を加速するには、基礎的な概念の理解の深化と革新的なアイデアの創出が非常に重要です。量子の本質的な性質の解明を通じて、量子の不思議な性質を利用した科学・技術の芽を育み育てる取り組みを、推進いたします。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Entangled Measurement for W states

(W 状態のもつれ測定)

著 者：朴 渠培（京大）、Holger F. Hofmann（広大）、岡本亮（京大）、竹内繁樹（京大）

掲 載 誌：*Science Advances* DOI：未定

<参考図表>

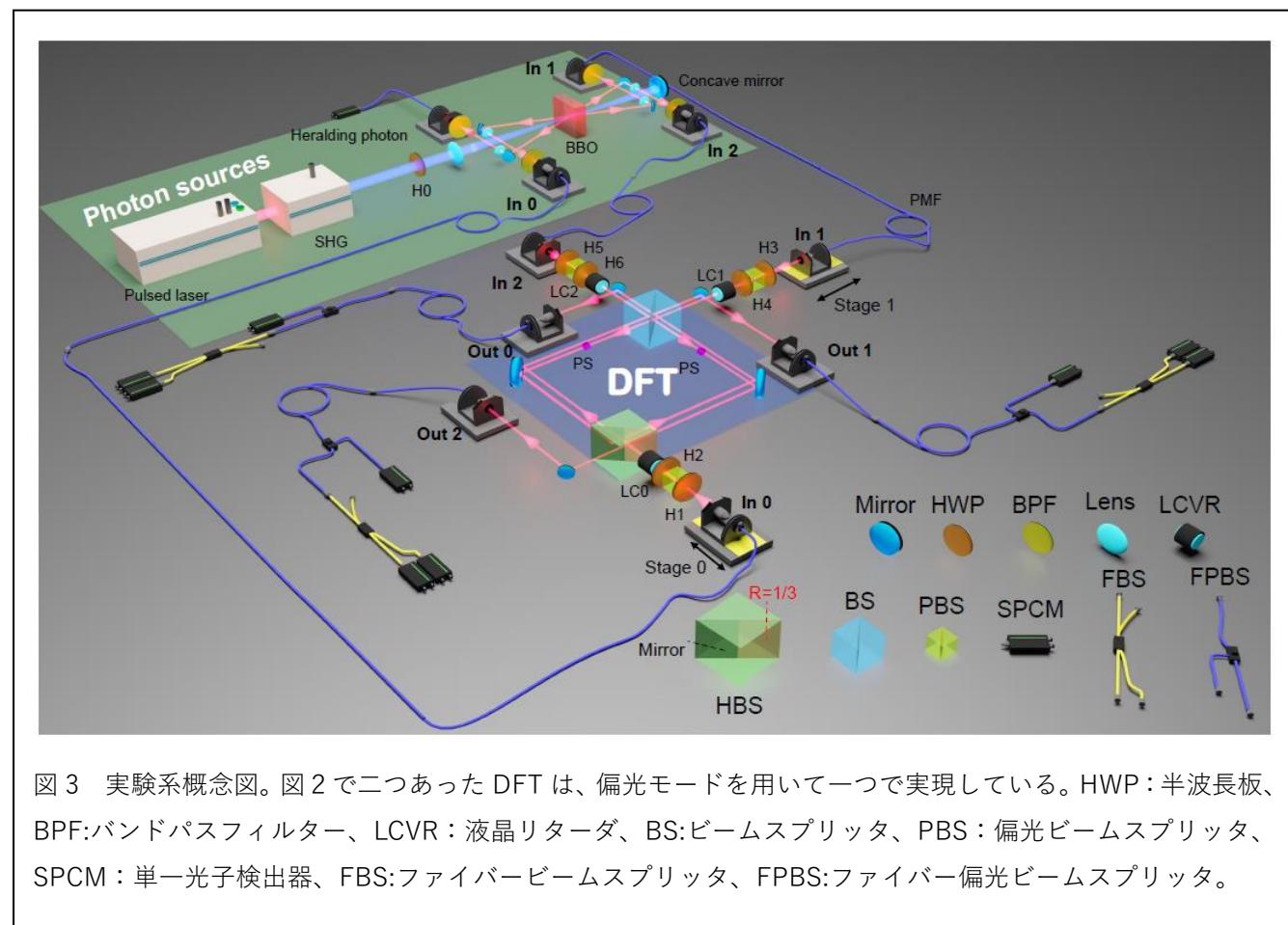
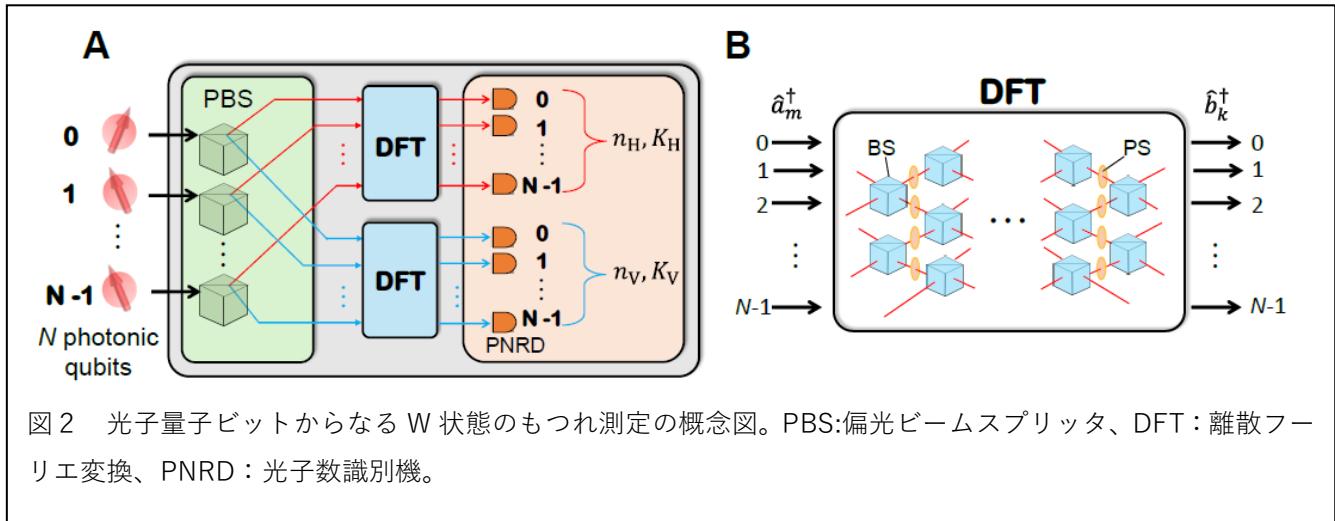


図3 実験系概念図。図2で二つあったDFTは、偏光モードを用いて一つで実現している。HWP:半波長板、BPF:バンドパスフィルター、LCVR:液晶リターダ、BS:ビームスプリッタ、PBS:偏光ビームスプリッタ、SPCM:単一光子検出器、FBS:ファイバービームスプリッタ、FPBS:ファイバー偏光ビームスプリッタ。

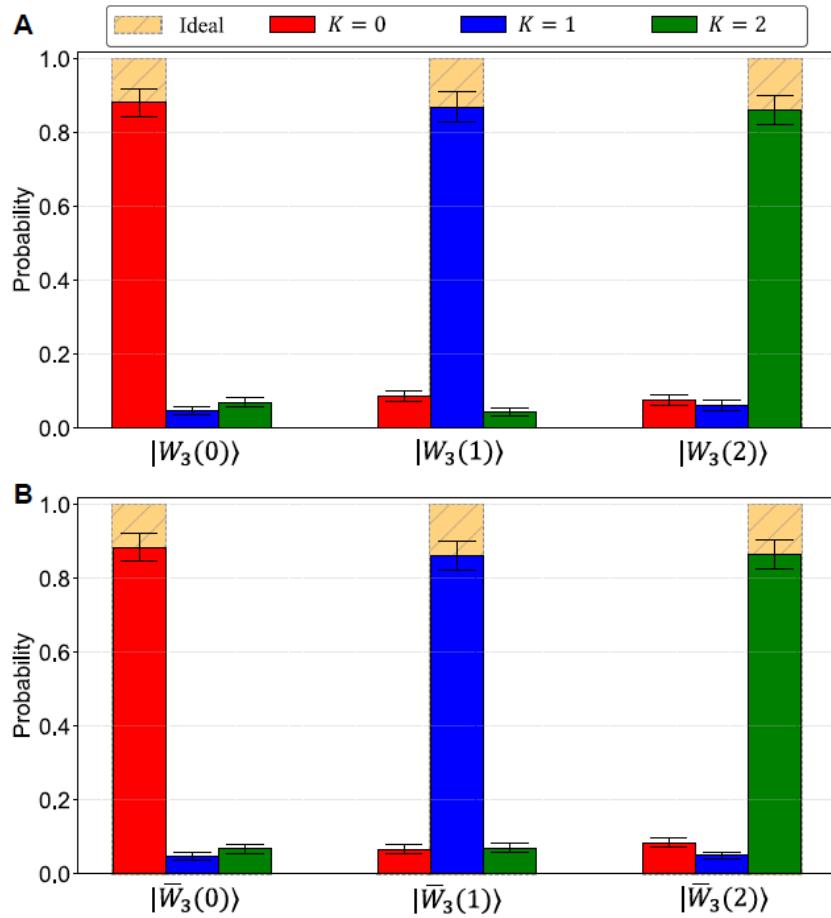


図4 本方法による評価結果をまとめたもの。W状態が適切に識別できていることが分かる。