



光子の量子もつれ状態検証の、著しい効率化に成功

—量子センシング、量子通信装置の長距離化に貢献—

概要

電子や光子などの量子は、通常の物体とは異なった振る舞いをします。その量子の個々の振る舞いや相関(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ーや、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。

今回、京都大学大学院工学研究科 竹内繁樹 教授、岡本亮 同准教授、清原孝行 同博士課程学生(研究当時)、山城直毅 同修士課程学生(研究当時)、荒木裕貴 同学部学生(研究当時)らの研究グループは、広島大学 Holger F. Hofmann 教授らの研究グループと共同で、光子の量子もつれ状態を、従来に比べて著しく高い効率で検証する方法の実証に、構築した6つの光子間量子ゲートを含む光量子回路を用いて成功しました。今回実現した方法は、光子の量子もつれ状態が大規模化しても高い効率を保てることから、光量子コンピューターや、量子暗号の長距離化、また光量子センシングなどにブレークスルーをもたらすものです。

本成果は、2020年10月29日に米国の国際学術誌「Optica」にオンライン掲載されました。

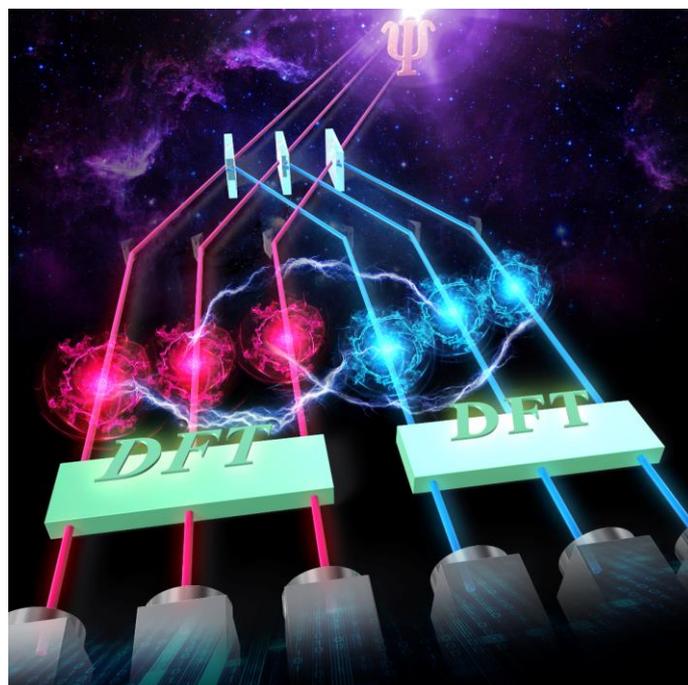


図1 実現した、光子の量子もつれ状態検証方法のイメージ図

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舞いをします。その量子の個々の振る舞いや相関(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ーや、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、さまざまな経路・周波数(モードと呼ばれます)に存在する量子もつれ状態は、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。

しかし、その状態が「量子もつれ状態」であるかどうかの検証には、光子やモード数の増大とともに、そのための測定回数が指数関数的に増大してしまう、という問題がありました。

2. 研究手法・成果

本研究では、上記のような量子もつれ状態の検証に必要な測定回数を著しく減少させた、より直接的な検証方法を実験的に実証しました。

量子もつれ状態の検証方法としては、従来は「量子状態を完全に同定する方法」(量子トモグラフィ)が行われていました。これに替わり、本研究グループは、一般に2つの光子間のもつれ合いの検証に用いられている「ベルの測定方法」を一般化した光量子回路(量子フーリエ変換回路)を用いる手法を提案し、実現しました(図2)。

また、実証実験にあたっては、量子フーリエ変換回路の動作を実現するために、多数の入り組んだ光干渉計を、光の波長の100分の1程度で安定化する必要がありましたが、特殊な干渉計を利用する事で、極めて安定な光量子回路としての動作を実現しました(図3)。

3. 波及効果、今後の予定

今回の成果により、多数の光子の量子もつれ状態を、極めて効率的に(指数関数的に少ない回数の測定で)評価でき得ることが実証されました。このような量子もつれ状態を利用した、量子暗号通信の長距離化や光量子シミュレーションなどが提唱されており、将来的には、高度なセキュリティを備えた安全・安心な暮らしや、新規化学物質の開発などへの応用も期待されます。

今後は、今回実現した方法を、より大規模な光子の量子もつれ状態への適用を目指すとともに、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、主に科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業CREST「大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用」(研究代表者:竹内繁樹)による支援の他、一部 科学研究費などの支援を受け、広島大学と共同で実施しました。

<用語解説>

量子もつれ:量子もつれ(Quantum Entanglement)とは、2つの異なるシステム間で相関した状態が2つ以上あり、それらが(量子において複数の状態が同時に成立する)量子重ね合わせ状態にあることを言います。

ベルの測定方法:2つの光子が偏光に関する量子もつれ状態にあるかを検証する場合、「偏光が、垂直・水平

方向のいずれであるか」という測定の他に、それら2つの状態の重ね合わせ状態（この例では、斜め45度方向の直線偏光）についても測定を行い、そのいずれにおいても、2つの光子の測定結果に顕著な相関があるかどうかの確認を行います。量子もつれに関する先駆的な研究を行った、John. S. Bell 博士を記念して、ベルの測定（Bell measurement）と呼ばれています。

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>

量子もつれ状態は、シュレーディンガーの提唱からまもなく100年を迎えます。今後も、量子もつれをはじめとする量子の不思議な性質を利用した、従来の限界を超える技術の研究を、学生、スタッフと共に推進します。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Direct and efficient verification of entanglement between two multimode–multiphoton systems
(2つの多モード多光子システム間の量子もつれの直接的かつ効率的な検証)

著者：清原孝行（京大）、山城直毅（京大）、岡本亮（京大）、荒木裕貴（京大）、Jun-Yi Wu（広大）、
Holger F. Hofmann（広大）、竹内繁樹（京大）

掲載誌：Optica DOI：10.1364/OPTICA.397943

<お問い合わせ先>

竹内繁樹（たけうちしげき）
京都大学大学院工学研究科・教授
TEL：075-383-2286
E-mail：takeuchi[at]kuee.kyoto-u.ac.jp

<JST 事業に関すること>

嶋林ゆう子（しまばやしゆうこ）
科学技術振興機構戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ
TEL：03-3512-3531 FAX：03-3222-2066
E-mail：crest[at]jst.go.jp

<報道担当>

京都大学総務部広報課 国際広報室
TEL：075-753-5729 FAX：075-753-2094
E-mail：comms[at]mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課
TEL：03-5214-8404 FAX：03-5214-8432
E-mail：jstkoho[at]jst.go.jp

< 参考図表 >

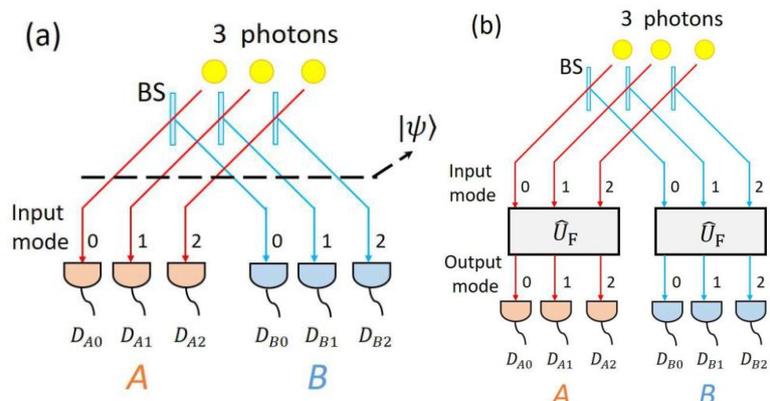


図2 量子もつれ状態の検証に必要な測定回数を著しく減少させた、より直接的な検証方法。3つの光子が半透鏡(BS)により、システムAとシステムBの2つのシステムに分離され、結果としてシステムAの3つの経路(モード)、システムBの3つの経路(モード)に複数の光子が存在する量子もつれ状態となる。本方法では、(a)それぞれの経路でどのような組み合わせで光子が存在するかどうかの光子検出確率分布、(b)システムA、およびシステムBのそれぞれで、離散フーリエ変換を実行する光量子回路を通過させた後の、同様の確率分布、の2つの確率分布のみから、システムA、システムB間での量子もつれの検証が可能である。

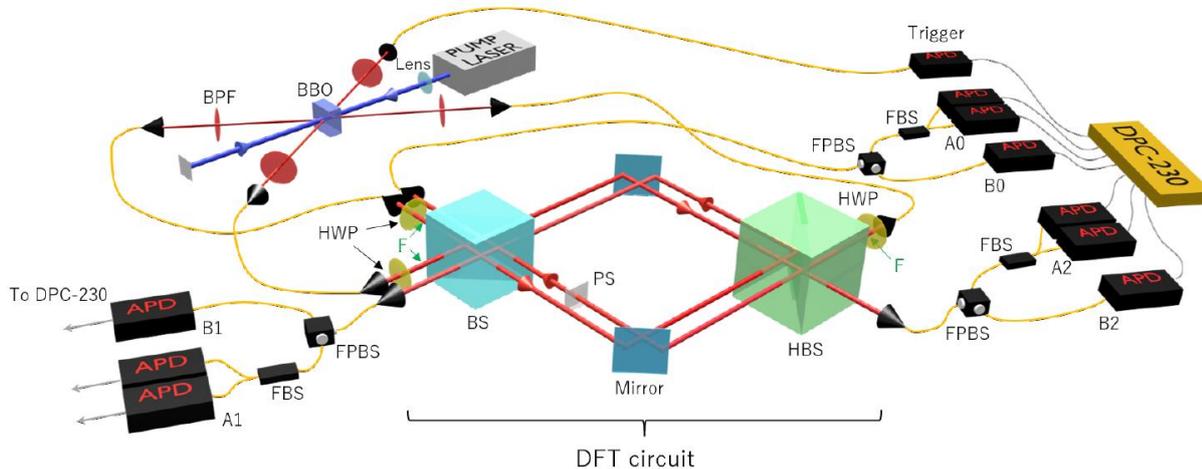


図3 実験装置の模式図。左上方にある、光子源から、4つの光子が同時に4本の光ファイバに出力される。それらが、偏光ビームスプリッターによって、垂直偏光および水平偏光の成分へと分離され、3光子6モードの量子もつれ状態となる。中央部にあるのが、今回開発したフーリエ変換光量子回路で、6つの量子ゲート(2光子量子干渉)を含んでいる。10台の光子検出器における光子検出結果を解析することで、図4の光子検出確率分布を求めた。

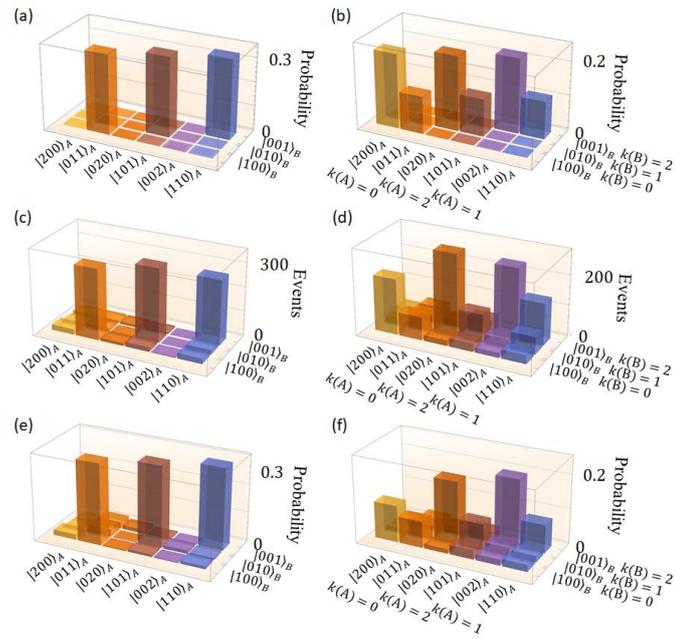


図4 本方法による評価結果。量子フーリエ変換回路を(a)通過前と(b)通過後の、理想的な光子検出確率分布。実験で得られたそれぞれの分布(c)および(d)によって計算された忠実度の和が、1.56 と、量子もつれに必要な値 1.33 を超えていることが確認された。(e),(f)は、実験の不完全さを考慮したシミュレーションで、実験結果を再現している。