

キーワード: 光周波数多重化、二光子干渉、光量子計算

世界初！異なる光周波数の二光子の干渉を実現 —情報処理能力の飛躍的拡大へ新しい道筋を拓く成果—

<記者発表：4月18日(月) 11時～@中之島センター9階会議室1>

【本研究成果のポイント】

- 「ビーム」ならぬ「周波数」のスプリッター(下図)を実現し、異なる光周波数の二光子の干渉に世界で初めて成功
- 周波数領域の光スプリッターによる基本量子回路が可能に
- 光量子計算の新たなスケールアップ手法が拓け、情報処理能力の飛躍的拡大に期待

❖ 概要

大阪大学大学院基礎工学研究科 井元信之教授、東京大学大学院工学系研究科 小芦雅斗教授および情報通信研究機構(NICT)未来 ICT 研究所 三木茂人主任研究員のグループは、広帯域光周波数多重化を利用した大規模量子情報処理の基礎技術である周波数領域のスプリッターを実現し、これを異なる光周波数(異波長)の二光子に適用した Hong-Ou-Mandel 干渉(HOM)を世界で初めて観測しました。これは、従来の空間光回路^{注1}の集積化に加え光周波数多重化も実現する新しい道筋となります。HOM 干渉は、従来のコンピューターをはるかにしのぐ性能が得られるとされる量子コンピューター^{注2}の基本要素で、幅広く利用されています。

本研究により、空間を光周波数に置き換えた新しい光周波数多重化量子演算の道が拓かれ、計算量や通信容量などの情報処理能力の飛躍的拡大が期待されます。

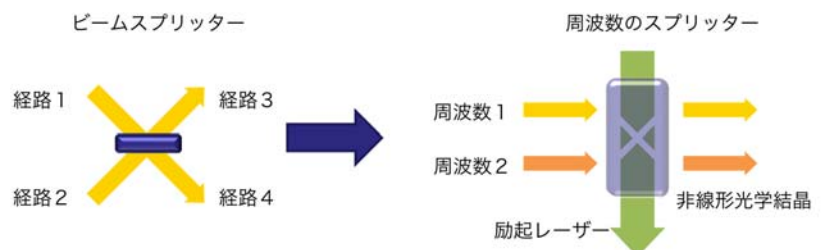
本研究成果は、「Nature Photonics」のオンライン版に4月19日(火)午前0時(日本時間)に掲載予定です。

❖ 研究の背景

Hong-Ou-Mandel(HOM)干渉は1987年にHong, Ou, Mandelの3氏によって提案され、観測された干渉効果です。光ではビームスプリッター(下図左、図1)と呼ばれるデバイスが使われますが、図のように2つの入力(経路1および経路2)に対して2つの出力(経路3および経路4)があります。ここで経路1および経路2に1つずつ、計2つの「同一周波数の」光子を同時に入力すると、不思議なことに、2つの光子は経路3または4のどちらか一方に2つ揃って出力され、経路3と4に1つずつ出力されることはありません(図2)。これが従来の HOM 干渉です。この干渉は光量子コンピューターの基本要素であり、ベル測定^{注3}や量子テレポーテーション^{注4}など幅広く利用されていました。

❖ 今回の研究

研究グループは、「ビーム」ならぬ「周波数」のスプリッターを非線形光学効果である和・差周波発生^{注5}を用いて実現し(図右)、経路は同一だが周波数が異なる光子を1つずつ同時に入射したとき出力がどちらかの周波数に同一化された2つの光子となる「周波数領域での HOM 干渉計」を作り、その観測に成功しました。実験では PPLN 導波路^{注6}による和・差周波発生(図3)および高性能な超伝導光子検出器(図4)を用いて、明確に量子力学的な領域の干渉性(図5、図6)を示すことができました。



❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

現在までに考えられている光量子演算は空間光回路を利用するものですが、本研究により、空間を光周波数に置き換えた新しい光周波数多重化量子演算(図7)の道が拓かれ、計算量や通信容量などの情報処理能力の飛躍的拡大が期待できます。

❖ 特記事項

本研究成果は Nature Publishing Group が発行している学術誌 Nature Photonics に掲載予定です。

論文名:Frequency-domain Hong-Ou-Mandel interference

誌名:Nature Photonics (日本時間 4 月 19 日午前 0 時解禁), DOI number: 10.1038/nphoton.2016.74

著者:Toshiki Kobayashi, Rikizo Ikuta, Shuto Yasui, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hiroataka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Nobuyuki Imoto

また、本研究は科学研究費補助金および大阪大学大学院基礎工学研究科附属未来研究推進センターの支援により行われました。

❖ 用語解説

注1)空間光回路

ミラーやビームスプリッターを組み合わせて作る光学系。例えば、ヤングの干渉計やマイケルソン干渉計など。広い意味で、空間的に光を分岐したり、それを合わせたりする光学系を含んでいます。

注2)量子コンピューター

現在の情報通信では「0」と「1」の2文字(ビットといいます)で計算や通信を行っていますが、量子情報は「0」と「1」の重ね合わせ状態も使います(量子ビットといいます)。量子もつれ^{注7}状態にある量子ビットを使うと、莫大な数の事象や処理を現実的な数の量子ビットで表すことができます。これを利用して複雑な計算を並列処理するのが量子コンピューターです。ある種の問題を解く際に、原理的に従来のコンピューターをはるかにしのぐ性能が得られます。

注3)ベル測定

2つの量子ビットが、ベル状態と呼ばれる量子もつれ状態にあるか否かを識別する測定のこと。光子の場合、基本的にはビームスプリッターとその出口に設けた2つの光子検出器によって実現されます。2光子をビームスプリッターに同時に入射したとき、2光子の検出パターンによって状態識別を行います。この測定器の原理は HOM 干渉計そのものです。

注4)量子テレポーテーション

量子ビットの状態を古典的通信で送る方法。リソースとして量子もつれを持つ量子ビット対を送信地点と受信地点に準備し、量子もつれ状態にある量子ビットの片割れを送りたい量子ビットの2量子ビットにベル測定を行います。古典通信によって測定結果を受信地点に知らせることで、受信地点の量子ビットを、送らなかった量子ビットの状態にすることができます。

注5)和・差周波発生

非線形光学効果を利用した周波数変換技術。非線形光学結晶に ω_p の周波数を持つ十分強い励起光が入力されているときに、励起光よりも高い周波数 ω_s を持つ信号光を入力すると、エネルギー保存則によって、信号光と励起光の周波数の差と等しい $\omega_c(=\omega_s-\omega_p)$ の周波数を持つ光が発生します(差周波発生)。逆に ω_c の周波数を持つ信号光を入力すると、信号光と励起光の周波数の和と等しい ω_s の周波数を持つ光が発生します(和周波発生)。

Press Release

注6)PPLN 導波路

非線形光学結晶の一つで、周期的に分極反転した LiNbO_3 結晶を加工し、光ファイバーに代表される導波路形状にしたものです。導波路中に光が閉じ込められて進行するため、光周波数変換が高效率に起こります。この研究では、変換効率が40%程度で利用し、周波数のスプリッターとして用いました。

注7)量子もつれ

複数量子ビット間の量子力学的な相関で、エンタングルメント(entanglement)の和訳。例えば、量子もつれ状態にある2つの光子の場合、片方の状態が決まると、もう一方の状態もそれに応じて決まり、その関係は光子間の距離に依存しないといった特異な性質があります。量子情報処理において、情報伝達、高速演算、セキュリティなど、ほぼすべての応用においてリソースとしての重要な役割を果たしています。

❖ 本件に関する問い合わせ先

大阪大学大学院基礎工学研究科 物質創成専攻 物性物理工学領域
教授 井元 信之 (いもと のぶゆき)

東京大学大学院工学系研究科 光量子科学研究センター
教授 小芦 雅斗 (こあし まさと)

情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 フロンティア創造総合研究室
主任研究員 三木 茂人 (みき しげひと)

❖ 参考図

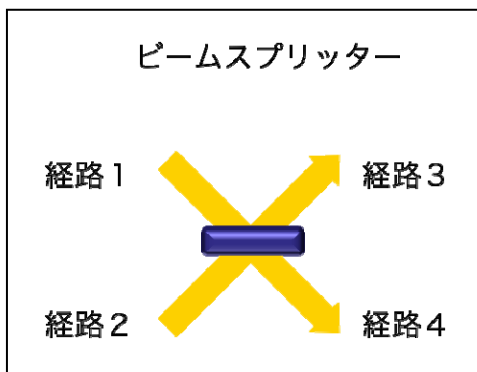


図1:ビームスプリッターの配置図。経路1だけの入力の場合は50:50で透過と反射。経路2だけの場合も同様。

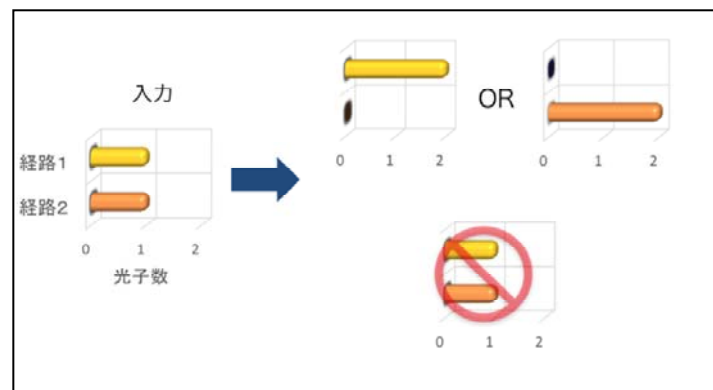


図2:HOM干渉での入出力光子数分布。ビームスプリッターへの入力が各経路に1光子ずつの場合は、どちらか一方の経路に2光子が必ず出力される。各経路に1光子ずつ出力されるイベントは量子力学的な干渉効果で消失する。

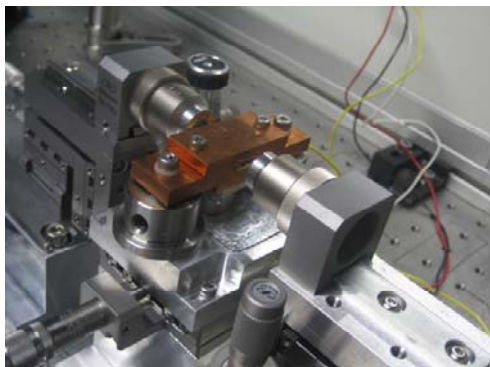


図3: 周波数のスプリッターとして利用したPPLN導波路



図4: NICT開発の超伝導光子検出器(SSPD)

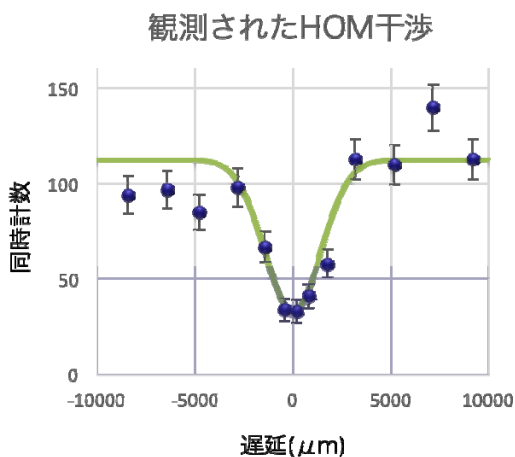


図5: HOM干渉信号。周波数のスプリッターでの2光子の遅延がゼロのところでは2光子同時検出率が0に近づく。

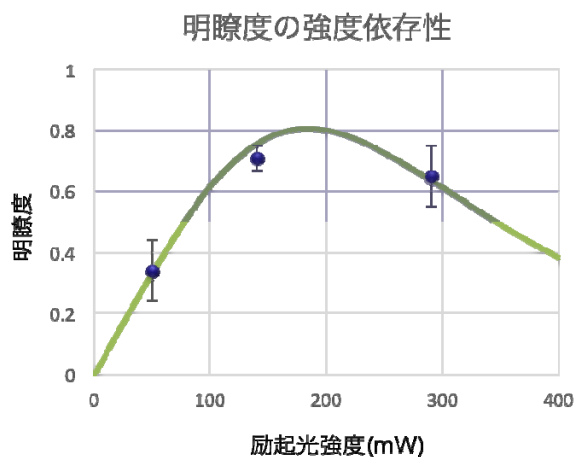


図6: HOM干渉明瞭度の励起光強度依存性。励起光強度に依って周波数のスプリッターの分岐比率が調整され、明瞭度が変化する。

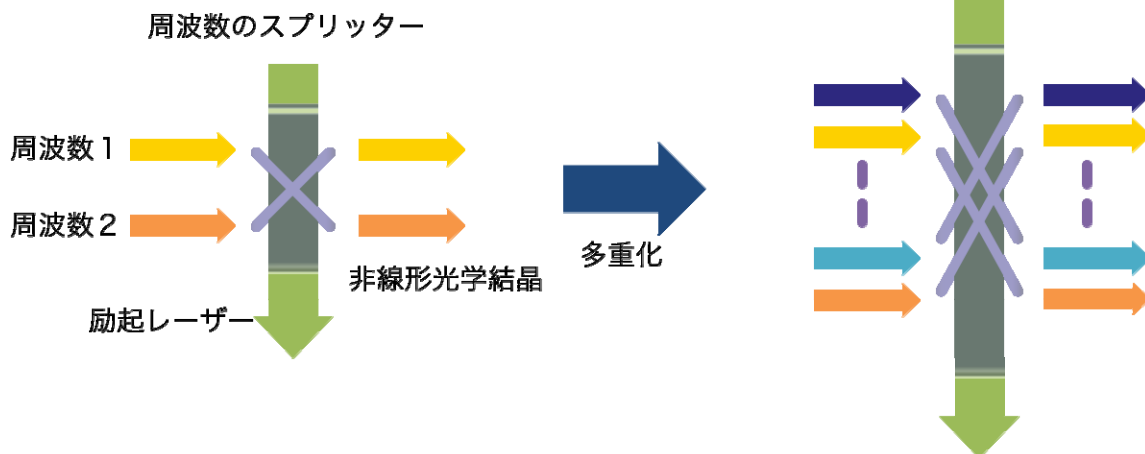


図7: 周波数のスプリッターの概念図。励起レーザーによって周波数間の遷移が誘起され、ビームスプリッターと同様の操作を実現する。入力を多重化することで、多重周波数スプリッターとして動作する。