

# 光量子回路における量子プローブの開発

## Development of a quantum probe for optical quantum circuits

北海道大学	岡本 亮
派遣期間	2013年4月9日～2013年10月2日
研究機関	Department of Physics, University of Toronto, 60 St. George St. Toronto, ONT M5S 1A7 CANADA
研究指導者	Prof. Aephraim M. Steinberg

Novel quantum devices are attainable by constructing optical quantum circuits combining quantum gates between photons. For recent large-scale optical quantum circuits, however, it is very difficult to identify where and how errors occur in these circuits. In order to solve this problem, it is required to develop a probing technology which can nondestructively measure quantum states in circuits. However, we cannot use conventional methods for measuring quantum state because these conventional methods destroy quantum states irreversibly. For this purpose, we need a “quantum probe” combining recent quantum measurement techniques. I have acquired the quantum measurement techniques, such as a photon detection technique using a fiber array and a phase locking scheme for quantum states, through a quantum optical centroid measurement experiment. We created spatial super-resolution fringes with two-, three-, and four-photon entangled states, and demonstrated a scalable implementation of the optical centroid measurement. Then we investigated a scheme for quantum probe using weak measurement which is one of the recent quantum measurement techniques.

### 研究目的

近年、光子制御技術の発展に伴い、新しい機能を持った光量子デバイスが実現可能になってきた。そのような光量子デバイスは、光子-光子間の量子干渉効果を用いるため、量子干渉部分をノードとする入り組んだネットワーク状の「光量子回路」として実現される。従って、より複雑な機能を実現するためには、光量子回路の大規模化が避けられない。しかし一方で、近年、光量子回路の大規模化に伴い、回路内でエラーがどこでどのように発生しているかを突き止めることが非常に難しくなってきた。通常の電気/電子系の回路では、プローブ測定を行うことで、回路の動作テストを行うことができる。この場合、十分に注意を払うことで、回路に対するプローブの影響はほとんどゼロにすることが可能である。しかし、量子力学では、通常の射影測定を行うと、測定対象の量子状態は非可逆的に変化してしまう。そのため、光量子回路のプローブ測定を行うためには、

新たな測定手法を確立する必要がある。

### 研究経過

2013年4月より、約6ヶ月間、山田科学振興財団の長期派遣研究助成のご支援を受け、カナダのトロント大学の Aephraim M. Steinberg 教授の研究グループに滞在した。この研究室は、近年の量子測定技術の急速な進歩を牽引してきたグループである。そこで、この滞在期間で、最新の量子測定技術を修得し、量子プローブの設計・開発を目指した。まず、最新の量子測定技術習得のため、量子 Centroid 測定の研究に参画、実際に実験を行った。量子 Centroid 測定とは、古典的な限界を超える精密な測定を可能にする新しい測定技術である。精密な位置測定や高解像度イメージング、ナノリソグラフィといった現代の科学・技術に欠かせない基盤技術にとって、いかに細かな光の干渉縞を生成し、検出できるかは本質的に重要である。古典的な光（レーザー光等）を用

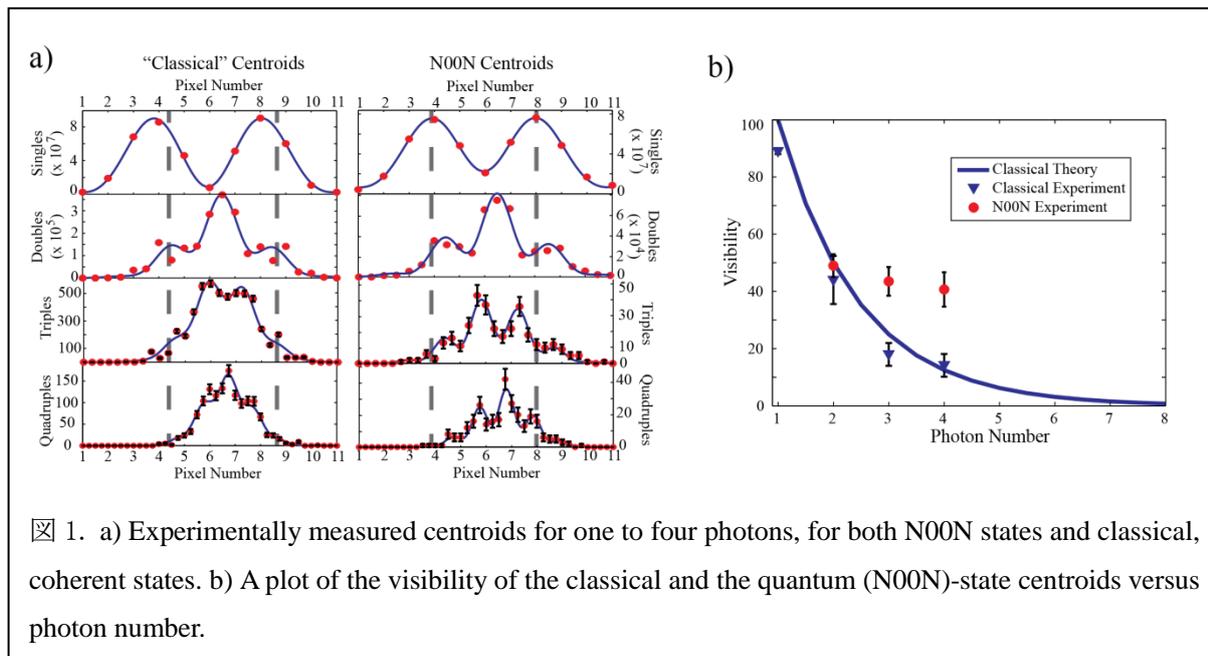


図 1. a) Experimentally measured centroids for one to four photons, for both NOON states and classical, coherent states. b) A plot of the visibility of the classical and the quantum (NOON)-state centroids versus photon number.

いた場合、そのような測定は全て、「回折限界」と呼ばれる光の波長によって決まる限界で制約される。しかし、量子的な光を用いることで、古典的な回折限界を打ち破り、より細かな干渉縞を作ることが可能なが知られている。しかしながら、これまでの干渉縞検出方法では、生成した量子的な光のごく一部しか用いることができないという大きな問題点があった。量子 Centroid 測定は、この問題を解決し、量子光の全てを検出することを可能にする新しい量子測定手法である。

実験では、NOON 状態と呼ばれる量子状態によって作られる空間干渉縞を、量子 Centroid 測定を用いて観測した。NOON 状態は、コヒーレント光とパラメトリック下方変換光をビームスプリッタで干渉させることで実現した。また、干渉縞の検出は、ファイバアレイに結合させた光子を測定することで行った。図 1 (a)がその実験結果である。左の列が、光源として、古典光を用いた場合、右が量子状態を用いた場合である。一番上から、1 光子測定、2 光子 Centroid 測定、3 光子 Centroid 測定、4 光子 Centroid 測定の結果となっている。図から、下に行くほど、細かい干渉縞が得られているのが分かる。さらに、量子光を用いた場合、干渉縞の明瞭度が保たれているのに対して、古典光を用いた場合、明瞭度が著しく悪化していくことが分かった。図 1 (b)はそれぞれの明瞭度の値を横軸光子数としてプロットしたものである。図から、古典光を用いた場合、明瞭度が指数的に悪くなっていくのに対し、量子光を用いた場

合では、一定に保たれている事がよく分かる。また、測定結果を解析することで、これまでの干渉縞検出方法（各点における  $n$  光子数測定）と比べて、検出効率が飛躍的に向上していることが確認できた。

量子 Centroid 測定の研究に参画することで、ファイバアレイを用いた光子検出技術や、量子状態の位相ロック方法といった、量子プローブとして応用が可能な基礎技術を身につけることができた。そこで、方解石とファイバアレイを組み合わせることで、量子状態を非破壊的にプローブする系を考案した。弱測定による量子状態の測定（量子状態トモグラフィ）は、最近、理論的な提案がなされており、弱測定結果から、量子状態の密度行列を得ることが可能であることが分かっている。ファイバアレイを用いることで、プローブ状態の変化を測定する。測定部位でいくつかの種類弱測定を組み合わせることで、その測定結果から、その部位における光子の量子状態を推定することができる。これにより、特定のエラーが生じた時の光量子回路内部の各部位の量子状態をプローブすることが可能になる。しかし残念ながら、渡航期間が終了してしまったため、実際に系を構築して動作を確認するには至らなかった。現在、提案した量子プローブの構築のために共同研究を継続中である。

計画にはなかったが、渡航期間の後期に、トロント大学の原子を用いた研究と私が培ってきた光量子回路技術を融合することで、全く新しい原理に基づく光量子回路が実現できる可能性が見えてきた。現

在は、理論的な検討を継続的している。

また、渡航期間中、2つの国際会議へ出席することもできた。多くの研究者と交流することができ、様々な知見を得ることができた。

誌上発表

1. L. Rozema, J. D. Bateman, D. H. Mahler, R. Okamoto, A. Feizpour, A. Hayat, & A. M. Steinberg, Scalable Spatial Superresolution Using Entangled Photons. *Physical Review Letters*, **112**, 223602 (2014).