

博士論文(要約)

タイミング制御可能な単一光子源の開発と
それを用いたHong-Ou-Mandel状態生成の研究

牧野 兼三

研究背景

量子情報処理は、量子力学の重ね合わせやエンタングルメントといったユニークな物理法則を用いて、従来の古典技術を超える情報処理性能の実現を目指す研究分野である。特に、現在用いられている暗号技術を脅かすほどの計算能力を持つ量子計算機や、量子力学的な相関を利用した超高精度計測など、この分野に多くの関心と期待が寄せられている。量子情報処理を行う物理系には、半導体や原子準位、核磁気スピン、超伝導回路、光などさまざまな候補がある。その中でも、光は環境からの外乱を受けにくいという扱い易さの点から、光を用いた量子情報処理の研究が盛んに行われている[1]。とりわけ、量子計算の中でも光子と線形光学素子を用いた量子計算スキーム(線形光学量子計算)[2]が提案されて以降、光子を用いた量子計算の研究が急速に発展した[1]。それに必要な技術は、複数の単一光子をビームスプリッターで干渉させた後に、光子検出するという単純な形で実現できる[2]。そのためには単一光子源として、ある特定のタイミングに光子を放出するようなオンデマンドな単一光子源が必要である。さらには、放出された光子同士を干渉させるために、複数台の単一光子源の放出タイミングを同期する必要がある。

単一光子源には大きく2つのタイプがあり、1つはオンデマンド型、もう1つは伝令型である。オンデマンド型は、例えば単一原子などを励起して発光させる方法であり、励起のタイミングによって光子を生成するタイミングを制御できる。しかし、光の収集効率の低さが問題となっている。一方伝令型は、確率的に光子ペアを生成し、そのうち片方を検出することで、検出があったときに相方の光子の存在を知らせることを利用する。この伝令型は高い確率で単一光子を生成できるが、伝令のタイミングが完全にランダムであるため、光子干渉を必要とする量子計算[2]などに用いるには、干渉計に偶然光子が同時に入射するレアイベントを待つしかなく、その応用には制限があった。

伝令のタイミングはランダムであっても、単一光子を保存しオンデマンドに取り出すことができればこの問題が克服できる。そこで本研究では、このアイディアを元に、1光子の確率(単一光子純度)が高い伝令付き単一光子を光メモリー(光共振器)に保存し、オンデマンドに取り出すことでタイミング制御可能な単一光子源を開発した。これまでの研究報告例では、一度放出された光子をメモリーに取り込むことが困難であった点に注目し、メモリーの中に伝令付き単一光子が生成できればこの問題が回避できることに着目した。そこで、光子ペアを生成するメモリー共振器の出口に別のシャッター共振器を連結することで、光子ペアの一方を選択的に保存したり、取り出したりする機能を付けた。ここでシャッター共振器に動的なスイッチ機能をつけることで、保存した単一光子を好きなタイミングに放出することができる。

本研究では以下の3ステップの実験を行った。

1. 連結共振器型単一光子源の放出タイミングコントロールの実証実験[3]
2. 共振器結合条件を変え、放出波束の形状制御と単一光子純度の最適化
3. 2台の単一光子源を同期した HOM 状態の生成と光ホモダイン測定による検証。

また、本研究で開発した広帯域ホモダインディテクターについては、今後の量子情報処理の実験の高速化技術の要となるため独立した章として説明する。

タイミング制御可能な単一光子源の開発

本研究では前述の実証実験を行い、光ホモダイントモグラフィ法により、非古典性の評価に用いられるWigner関数が負の値を持つほど強い非古典的な性質が保たれていることを確認した[3,4]。この新たなスキームのメカニズムを解明するため、2つの共振器の結合モデルを提案し[4]、いくつかの実験条件にて測定を行い実験と理論との一致を確認した。連結共振器は、結合係数と緩和係数の大小関係によって、強結合条件・臨界結合条件・弱結合条件となり、それに応じて単一光子の放出形状が減衰振動、臨界制動、過減衰と移り変わることを実験的に確かめた。またいずれの条件においても、波束形状を保ったまま光子を保存する時間を変えられることを確認した。この制御性は光子干渉への応用において、干渉度を高く維持したまま干渉頻度をエンハンスするために極めて重要な特徴である。またこの結果から2光子干渉実験には、高い単一光子純度を示した臨界結合条件付近が最適であることが分かった。

タイミング制御可能な単一光子源を用いた2光子干渉実験

前述の結果を踏まえ本研究ではこれをさらに発展させ、2光子干渉実験、特に最も基本的な 50:50 ビームスプリッターを用いた Hong-Ou-Mandel (HOM)実験に取り組んだ。2つの単一光子 $|1,1\rangle$ が 50:50 ビームスプリッターの反対方向からそれぞれ入力すると、光子のボゾンの性質を反映して出力ポートには $|\text{HOM}(\theta)\rangle = (|2,0\rangle - e^{2i\theta}|0,2\rangle)/\sqrt{2}$ といふどちらか一方に光子がバンチングした $|2,0\rangle$ 状態と $|0,2\rangle$ 状態の重ね合わせ状態 (HOM 状態)が生成される。ここで、 θ は出力ビームの相対位相である。

本研究では光ホモダイントモグラフィ法を用いて、この2光子干渉後の量子状態を検証した。光ホモダイントモグラフィ法を用いて検証するためには、多数回干渉状態を生成し、測定する必要がある。従来手法のように独立な光子源を用いる場合、たまたま干渉計に光子が入射したレアイベントを集める必要があるため困難である。しかし本実験では、メモリーによるアクティブな同期を用いてそれを可能にした。まず単一光子源の小型化と機械的安定性の改善を行い、連結共振器型単一光子源を新たに2台用意し

た。干渉実験では、片側の光子源に伝令があった後、ある最大保存時間以内にもう片方の光子源で伝令があった時に、保存した 2 つの単一光子を同時に取り出し干渉させる。干渉計の入力状態 $|1,1\rangle$ と出力の HOM 状態 $|\text{HOM}(0)\rangle = (|2,0\rangle - |0,2\rangle)/\sqrt{2}$ について 2 モード光ホモダイン測定を行い、メモリーから取り出した後でもその直交位相振幅の同時分布において、特徴的な四葉形状の分布を実験的に観測した。そして量子状態推定から、 $1.8 \mu\text{s}$ の最大保存時間まで単一光子純度が 0.5 を超え Wigner 関数が負の値を示していることが分かり、HOM 状態の生成に成功した。

100 MHz 帯域光ホモダイン検出器の開発

信号処理において取り扱う周波数帯域が広いほど、より密に情報の送受信が可能になり、時間あたりに処理できる情報量を多くすることができる。光を用いた量子情報処理の場合も同様に取り扱う光の帯域を広くできれば、量子情報をエンコードする波束幅を時間的に短くすることができる。本研究室で行われている連続量を用いた量子情報処理実験では、これまで光ホモダインディテクターの帯域(10 MHz 程度)が実験系の帯域を律速しており、その広帯域化が課題であった。そこで本研究では今後の量子情報処理の広帯域化を狙い、これまで実験装置の帯域を制限していた光ホモダイン検出器の広帯域化を行った。そのためには、従来に比べ受光面の小さいフォトダイオードを使う必要があったが、飽和光強度の問題や高周波回路の開発の難しさから実現していなかった。

本研究では、カナダの研究グループが受光面の小さいフォトダイオードを使った光ホモダイン検出器を開発したこと[5]をもとに、これを発展させ、高い量子効率(98%)と 100 MHz まで線形応答するような広帯域な光ホモダイン検出器を開発した。

この光ホモダイン検出器を用いて、スクイーズド光の広帯域化、単一光子状態の検証、古典チャネルのフィードフォワードの広帯域化、また光学遅延の短縮など、量子情報処理を高速化する基本技術がすでに実現した。これらの実験技術をもとに広帯域な量子情報処理への応用が期待される。

結論と展望

本研究では、連結共振器によりタイミング制御可能な単一光子源を開発し、その実証実験に成功した。単一光子源を最適化するために、連結共振器の結合条件を強結合、臨界結合、弱結合と変えて調べ、光ホモダイン測定を用いていずれの場合でも単一光子純度 0.5 を超えるほど高純度で、Wigner 関数が負の値を持つほど強い非古典性をもつ状態を共振器に保存し、取り出せることを確認した。この光子源から放出された光子の波束は、タイミングと波束形状を独立に変えることができ、線形光学量子計算のような光

子干渉を必要とする用途に応用が可能である。

それを実証するため、連結共振器型単一光子源を 2 台用意し、光子干渉の基本要素である Hong-Ou-Mandel (HOM) 干渉実験を行った。高い単一光子純度を保ち、光子を保存することで干渉頻度のエンハンスメントが得られた。その結果、光ホモダイン測定を用いて HOM 状態に特徴的な四葉の分布を観測し、その量子状態を完全に明らかにした。

この実験により非古典的な性質を保ったまま量子状態の保存と取り出しを行い、そしてそのタイミングを同期することが可能になった。本研究で得られた技術の応用として 2 つの方向性が考えられる。1 つは、この単一光子源をさらに多数台用意して、例えば線形光学量子計算の基本要素である非線形シフトゲートの検証のように、より高度な干渉計ネットワークに発展させることである。そしてもう 1 つは、光共振器に位相敏感な量子状態を保存することで、量子ネットワークや量子計算のバッファ(メモリ)として発展させることである。2 つとも、線形光学量子計算に必要不可欠な要素であり、本研究をベースとした量子情報処理の研究が発展することが期待される。

参考文献

- [1] P. Kok *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **79**, 135 (2007).
- [2] E. Knill, R. Laflamme, and G. J. Milburn, *Nature (London)* **409**, 46 (2001).
- [3] J. Yoshikawa, K. Makino, S. Kurata, P. van Loock, and A. Furusawa, *Phys. Rev. X* **3**, 041028 (2013).
- [4] J. Yoshikawa, K. Makino, and A. Furusawa, *On-Demand Release of a Heralded Quantum State from Concatenated Optical Cavities*, in *Engineering the Atom-Photon Interaction*. A. Predojević, M. Mitchell, Eds. (Springer, Cham, 2015), chap. 8.
- [5] R. Kumar, *et al.*, *Opt. Commun.* **285**, 5259 (2012).