

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05072

研究課題名(和文) ホモダイン検出器を用いた光子干渉に関する研究

研究課題名(英文) Observation of photon interference with homodyne detection

研究代表者

張 贇 (Zhang, Yun)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：00508830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果は以下三つである：一つ目は、従来単一光子検出器を利用して観測した二光子干渉現象をホモダイン検出器で観測することができた。二つ目はホモダイン検出器で測定した二次強度関数値を利用し、推定理論の最小二乗法で二光子の波動関数を構築した。これは、世界初で連続変数量子光学領域における二光子の波動関数を測定になる。三つ目は、異なる量子状態の干渉にはについて、光子数状態の確率振動分布は多光子状態の量子干渉という新しい概念を用いて説明することができた。この成果には未来の量子情報通信および量子計測の発展を支える基盤技術として応用面も期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光のスクイズド状態とコヒーレントを干渉させて、ホモダイン検出器を用いることにより、これまでに単一光子検出器で行われてきた光子干渉を観測するという独創的なものである。これは、量子力学の原理にある重ね合わせの状態とも干渉するという光科学における新たな理解と深く関わっているからである。また、3光子干渉に関する研究は光の干渉に関する長年の概念を斬新に拡張するものである。これらの成果には量子情報通信および量子計測の発展を支える基盤技術として期待される。

研究成果の概要(英文)： We experimentally observed a two-photon interference between a squeezed vacuum state from an optical parametric amplifier and a weak coherent state on a beam splitter with continuous variables. We developed an method to measuring of wave function for a biphoton state with continuous variables by homodyne detection. We experimentally demonstrated a three-photon interference on a beam splitter between a weak coherent state and a two-photon state produced by a spontaneous parametric down conversion. It indicates that a combined three-photon probability amplitude, which is formed by the two-photon state and one-photon from the coherent state, can be used to interfere with another three-photon probability amplitude from the coherent state.

研究分野：量子光学

キーワード：光のスクイズド状態 ホモダイン検出器 単一光子検出器

1. 研究開始当初の背景

量子光学および光を用いた量子情報処理は、物理観測量によって 2 つの領域に分かれている。一つは、光を波として、電磁波の直交位相振幅(複素振幅)観測量をする。測定値には連続固有値なので連続変数領域と呼ぶ。もう一つは、光の粒子性に着目した単一光子検出器を利用して光子に基づき、光子の偏光や位置などの自由度を使うアプローチで離散変数領域と呼ばれる。本世紀の初頭から、両領域ともに量子光科学および量子情報処理において大きな貢献を果たしてきた。しかしながら、どちらに光量子情報処理への応用上の制約がある。例えば、離散変数の手法には、転送効率が低い、光子を合わせた射影測定が確率的にしか実現できないなどの制約がある。他方、連続変数領域については、損失に対する敏感、情報伝送しにくいなどのデメリットがある。近年、連続変数量子光学と離散変数量子光学の技術の長所を利用したハイブリッド系における研究が注目を浴びている。この研究は、両量子光学領域をリンクする上で最良のテーマであり、特に局所実在性の否定の実証に用いられたシュレーディンガーの猫状態も実現された。ハイブリッド系に関する研究は、量子力学における基本的な解釈に本質的な疑問と矛盾を投げ掛け、結果的に量子力学の正しい解釈へと繋げることができた。実際に、ハイブリッド系の研究により生み出された技術には、新たな量子光学の発展および 20 世紀最後に出てきた量子情報科学の新しい研究分野で革新的展開を引き起こすと期待されている。そして、21 世紀における量子の時代へ向けて、量子光学領域におけるさらなる現象の発見と解明は、革新的な科学技術の展開に先導的な役割を果たすことも期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、単一光子検出器を用いて行われてきた光子干渉の観測をホモダイン検出器によって実現することにより、連続量と離散変数の各分野の長所を生かしたハイブリッド量子光学分野での新たな評価方法の探求をめざす。また、光パラメトリック増幅器から生成した 2 光子とコヒーレント状態の異なる状態間の多光子干渉実験を行う。本研究の目的は、光波の連続量である直交振幅の測定によって光子干渉を観測すると共に、量子情報処理を実現する基盤技術の確立を狙う。

3. 研究の方法

本研究では連続変数量子光学領域と離散変数量子光学領域で行った。連続変数には、ホモダイン検出器を用いた光子干渉に関する実験の構成概略を図 1 に示す。連続スクイズド状態は、図に示すように光パラメトリック増幅器 (OPA) を用いて生成させる。EOM で連続スクイズド状態と干渉できる側帯波周波数のコヒーレント成分をさせる。ビームスプリッターでスクイズド状態と側帯波周波数のコヒーレント成分を干渉させ、側帯波周波数の単一光子と多光子数状態を発生させる。ホモダイン検出器を用いて量子状態の測定および評価をする。

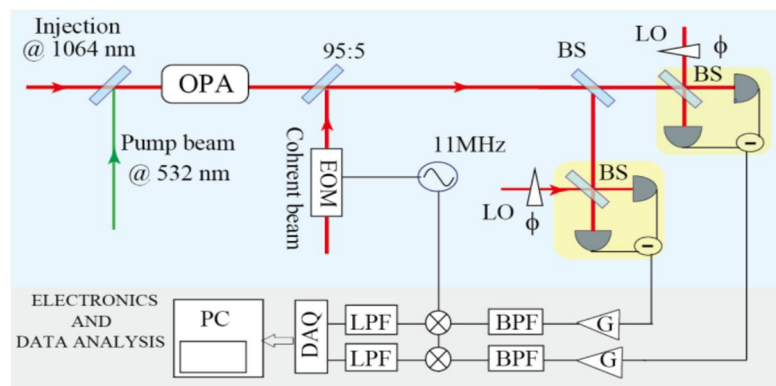


図 1 ホモダイン検出器を用いた光子干渉

離散領域 **3** 光子の干渉実験を図2に示す。ブライトスクイズド状態は、図に示すようにパラメトリックダウンコンバージョンまたは光パラメトリック発振器を用いて生成したスクイズド状態をインジェクションあるいはビームスプリッターによって変位させて発生させる。我々の実験では、光源としてモード同期チタンサファイアレーザを用いる。3光子あるいは4光子の同時計数確率の測定は2光子の場合と同様の実験で行うことができる。この3光子と4光子の同時計数確率がブライトスクイズド状態の変位振幅(コヒーレント状態の振幅)とスクイーンングパラメータ(励起光パワー)によってどのように変化するかを観測し評価する。我々の理論結果では、3光子と4光子の同時計数確率はその変位振幅と励起光パワーに対して振動的に変化することが予測されている。

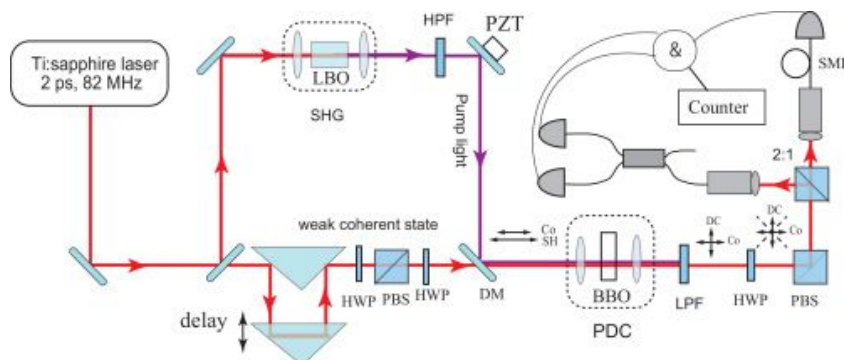


図2 3光子干渉の実験概略

4. 研究成果

本研究には、主に以下の三つ研究成果ができた。

- 1 従来単一光子検出器を利用して観測する二光子干渉現象をホモダイン検出器により観測する。
- 2 コヒーレント状態と2光子状態の干渉実験世界初めて実証した
- 3 連続変数2光子状態の波動関数を測定方法の開発ができた。

2017年度の成果(参考発表論文4)

従来単一光子検出器を利用して観測する二光子干渉現象をホモダイン検出器により観測する。本年度には、以下二つの成果を得た一つ目は、スクイズド状態の生成。二光子干渉は真空スクイズド状態とコヒーレント状態を干渉させるために、真空スクイズド状態の生成実験を行った。連続波のNd:YAGレーザを用いた、第二高調波を発生し、PPKTP結晶を用いた光パラメトリック増幅器(OPA)によって1.5dBのスクイージング、2.8dBのアンチスクイージングの真空スクイズド状態を生成した。コヒーレント状態については、EOMで光の帯波に純粋な状態を生成した。続いて、いろいろな量子状態の生成し、ホモダイン検出器によるWigner関数の構築によって生成した状態を確認した。二つ目はホモダイン検出器を用いて干渉した光の二次強度関数の測定し、二光子干渉の実験観測を行った。二組のホモダイン検出器を用いて二つしたディスプレイスクイズド状態およびコヒーレント状態の二次強度関数を測定した。従来単一光子検出器を利用して観測する二光子干渉現象を測定した二次強度関数を判定した。コヒーレント状態では、ディスプレイメントに関わらず $g(2)(0)=1$ となった。振幅スクイズド状態とコヒーレント状態を干渉により生成したブライトスクイズド状態では $g(2)(0)<1$ となるアンチバンチング状態をはじめてホモダイン検出器を用いて観測された。これは、破壊的二光子干渉させていると判断できた。一方、位相スクイズド状態とコヒーレント状態を干渉により生成したブライトスクイズド状態では常に $g(2)(0)>1$ となるバンチング状態となり建設的二光子

干渉と判断できた。また、この成果には未来の量子情報通信および量子計測の発展を支える基盤技術として応用面からも期待される。

2018年度の成果、(参考発表論文3)

異なる量子状態の干渉には、ビームスプリッタを用いて光のスクイズド状態とコヒーレント状態間の多光子干渉に関して新たな知見を得る研究を行う。そのために、コヒーレント状態の振幅とスクイズド状態のスクイズドパラメータに依存した n 個の光子数状態を見つける確率を調べる必要がある。実験には3光子状態について、行いました。この光子数状態の確率振動分布は多光子状態の量子干渉という新しい概念を用いて説明することができた。3光子状態は別の光の3光子状態と干渉するだけでなく、重ね合わせられた3光子状態とも干渉するのである。この重ね合わせられた3光子状態は、ある光の単一光子状態と別の光の2光子状態を用いて生成することでできた。この多光子干渉に関する研究は光の干渉に関する長年の概念を斬新に拡張するものである。本研究は量子情報通信および量子測量の発展を支える基盤技術として期待される。また、2光子とコヒーレント状態の干渉より多光子(3,4)ド・プロイ波の測定、2光子とコヒーレント状態の干渉より世界初めって3光子のド・プロイ波の測定ができました。これまで、ド・プロイ波の測定には主に量子状態と量子状態の干渉によって観測してきました。我々は、初めて量子状態と古典状態の干渉によって3光子のド・プロイ波長の測定実験を行った。

2019年度の成果、(参考発表論文1)

ホモダイ検出器を用いて光状態の波動関数の測定波動関数は、現在では量子状態を表す複素数値関数のことを指すことである。近年特殊な量子状態の波動関数の測定には、量子光学の研究分野における再び注目を浴びた。新たな波動関数の測定方法の開発に関する研究には、量子光学研究の最先端になっている。特に、近年量子状態の重ね合わせ原理を利用しても特有の量子状態の波動関数の測定可能となった。例えば、二光子の干渉による二光子状態の波動関数の測定がある。我々には、昨年まで、ホモダイ検出器を用いて二光子干渉の測定の方法を開発し、今年度には統計の観点から、サンプルサイズが多いほど信頼性が高くなるので、補助状態の位相と振幅が連続変換させ、最尤推定および最小二乗法などの方法で新たな波動関数を測定方法ができた。論文にはJ.of Opt.に掲載されました。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tingyu Li, Saburo Sakurai Katuyuki Kasai, Lirong Wang, Masayoshi Watanabe,	4. 巻 26
2. 論文標題 Experimental observation of three-photon interference between a two-photon state and a weak coherent state on a beam splitter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 20442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1364/OE.26.020442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Daohua Wu, Kota Kawamoto, Xiaomin Guo, Katsuyuki Kasai, Masayoshi Watanabe, and Yun Zhang	4. 巻 71
2. 論文標題 Observation of two-photon interference with continuous variables by homodyne detection	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1140/epjd/e2017-80379-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yashuai Han, Daohua Wu, Katsuyuki Kasai, Lirong Wang, Masayoshi Watanabe, and Yun Zhang	4. 巻 22
2. 論文標題 Measurement of the wavefunction for a biphoton state with homodyne detection using least squares estimation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. of Opt.	6. 最初と最後の頁 25202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/2040-8986/ab6422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 6. Yun Zhang, Masaharu Hyodo, Yoshiko Okada-Shudo, Yun Zhu, Xiaoyang Wang, Yong Zhu, Guiling Wang, Chuangtian Chen, Shuntaro Watanabe, and Masayoshi Watanabe	4. 巻 387
2. 論文標題 Characteristics of pulse width for an enhanced second harmonic generation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Opt. Commun.	6. 最初と最後の頁 241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.11.058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Yashuai Han, Daohua Wu, Katsuyuki Kasai, Masayoshi Watanabe, Yun Zhang
2. 発表標題 Interferometric measurement of a biphoton state with continuous-variables by homodyne detection
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yun Zhang, Lirong Wang, and Masayoshi Watanabe
2. 発表標題 Multi-photon interference between a two-photon state and a weak coherent
3. 学会等名 The International Photonics and Optoelectronics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daohua Wu, Kota Kawamoto, Katsuyuki Kasai, Masayoshi Watanabe and Yun Zhang
2. 発表標題 Observation of Two-Photon Interference for Continuous Wave Light with Homodyne Detection
3. 学会等名 The 24th congress of the international commission for Optics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yun Zhang, Katsuyuki Kasai, and Masayoshi Watanabe
2. 発表標題 Experimental demonstration of control quantum interference with amplitude
3. 学会等名 The 24th congress of the international commission for Optics (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

無し

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----