

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04919

研究課題名（和文）量子干渉と推定法を用いた光の波動関数を測定する方法に関する研究

研究課題名（英文）Measurement of wave function with quantum interference and estimation

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・教授

研究者番号：00508830

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：理論上は、相対論的スピン-1/2系における2つのユニタリーシフトパラメータを推定するため、自明でないトレードオフ関係の存在を議論した。この古典モデルから量子モデルへの移行を量子フィッシャー情報行列の1パラメータ族を用いて解析的に調べた。また、静止枠でスピンドアウンしたガウス波動関数で記述したモデルを用いて任意の移動観測者の推定精度の限界をCramer-Rao境界を得た。実験について、位相ランダム化された弱いコヒーレント状態と伝令付き手法で発生した単一光子状態と干渉させ、単一光子状態の波動関数（スペクトル特性）の測定方法を提案し、実験的に実証した。また、異なる状態間の二光子干渉も観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子力学の原理である重ね合わせおよび干渉するという光科学における新たな理解と知見を得たことができた。量子力学の基本概念、特に光の波動性と粒子性に関する深く関わっているからである。現代量子科学技術には量子力学の基本概念をもとつくるので、実際にこの研究に生み出された技術には、量子通信の実現するための必要な基盤技術を確立するし、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の革新的展開を引き起こすと期待されている。

研究成果の概要（英文）：We experimentally investigate two-photon interference between a weak coherent state and a heralded single-photon state (thermal state), producing from a spontaneous parametric down conversion. Based the results of interference, we present and experimentally demonstrate a method for determining the spectral characterization of a single-photon state. This technique is based on the Hong-Ou-Mandel interference between a well-defined weak coherent state and a measured single-photon state. We estimate the spectrum of the single-photon state by fitting the measured interference dip with proposed model and least square method. Our method is particularly useful for characterizing spectral property the single-photon state. Furthermore, the purity of the single photon can also be estimated from the width of HOM dip. It opens a way for robust and efficient on-line monitoring the single-photon emitters.

研究分野：光工学・光量子科学

キーワード：二光子干渉 波動関数 量子推定 単一光子状態

1. 研究開始当初の背景

波動関数の測定には、2011年にカナダの国立計量標準研究所のチームが弱測定で波動関数の直接観測を可能になってこの研究分野を再び注目を浴びた。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特有の量子状態の波動関数の測定可能となった。量子光学の研究において、物理観測量によって二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。特に単一光子の位置の波動関数についてよく調べられた。そこで本研究では量子干渉を利用して実験と理論の両面から単一光子状態の波動関数の測定を検討し、量子光学領域に関す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も期待できる。また、相対論的スピン-1/2系について、量子推定理論の基本モデルとして、推定方法の解明および発展の研究も近年この研究分野に盛り上げる。

2. 研究の目的

本研究では、実験と理論の両面から光状態の波動関数の測定における新たな測定方法の開発をめざす。今まで、単一光子の周波数領域における波動関数の測定を目指し、新たな波動関数の測定の方法を探究する。量子干渉の測定結果には、光状態の波動関数に依存するのが分かっている。理論においては、推定方法(例えば最尤推定と最小二乗法など方法)を利用してさまざまな光状態の波動関数と干渉結果のモデルを構築し、新たな任意状態の波動関数測定手法の確立をめざす。本研究の一つ目の特徴は、離散領域における行っている波動関数の測定を連続領域に拡張することである。そして、光の本質である波動性と粒子性の観点から両領域をリンクさせる。また、相対論的スピン-1/2系を使って、量子推定精度の限界および量子推定原理の解析的解明を目指す。

3. 研究の方法

波動関数は、対応する物理量がない複素数であるので、数学上に言えば、波動関数の測定には、複素数の絶対値と偏角を求めることである。本研究アイデアには、測定する光状態と複数の補助する光を干渉させ、生成させた状態の相関関数を測定し、その情報から光状態の波動関数を推定する。具体的には、補助光である弱いコヒーレント状態のスペクトルを精密に測定し、この弱いコヒーレント状態と伝令付き手法で発生した単一光子状態と干渉させ、HOMのdipの幅およびビジビリティを使って単一光子状態の波動関数(スペクトル特性)を推定法で求める。

4 . 研究成果

理論上には、相対論的なスピン 1/2 粒子を、静止枠でスピンドウンしたガウス波動関数で記述した特定のモデルを用いる。粒子のスピンと運動量を絡めたウィグナー回転を使用してこの移動フレームの波動関数に基づき、任意の移動観測者の推定精度の限界を設定する対称対数微分 (SLD) Cramer-Rao 境界を得ることができた。また、2 つのユニタリーシフトパラメータを推定するための、自明でないトレードオフ関係の存在について議論した。この古典モデルから真の量子モデルへの移行を、量子フィッシャー情報行列の 1 パラメータ族を用いて解析的に調べた。提案する指標に基づき、トレードオフ関係の性質を詳細に調べる。

実験について、単一光子検出器による実現した量子相関関数を測定し、結果から統計学の推定法を用いて単一光子のスペクトル波動関数を求める新たな方法を実現した。位相ランダム化された弱いコヒーレント状態の二光子干渉を利用し、弱いコヒーレント状態のスペクトル特徴を得られた。HOM ビジビリティよくするため、弱いコヒーレント状態の 2 光子状態による同時計数率を差し引く。これを利用して、ビームスプリッターで二つ偏光直交弱いコヒーレント状態を組み合わせることによって Bell-CHSH 不等式違反も実証した。また、自発パラメトリック下方変換生成された光子対から、伝令付き手法でさまざまな単一光子状態 (heralded photon) を発生し、弱いコヒーレント状態の間との 2 光子干渉させ、単一光子状態の波動関数 (スペクトル特性) の測定方法を実験的に実証した。異なる状態間の二光子干渉も観測した。本方法で、HOM の dip の幅により、伝令付き発生した単一光子状態の純度の評価も可能になった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Shin Funada and Jun Suzuki | 4. 巻 106 |
| 2. 論文標題 Effect of Wigner rotation on estimating the unitary-shift parameter of a relativistic spin-1/2 particle | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 physical review A | 6. 最初と最後の頁 062404-1 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physreva.106.062404 | 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 - |
| 1. 著者名 Aojie Xu, Lifeng Duan, Lirong Wang, and Yun Zhang | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Characterization of two-photon interference between a weak coherent state and a heralded single photon state | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Optics Express | 6. 最初と最後の頁 5662-5669 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.479535 | 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 Masaharu Hyodo, Yun Zhang, Masayoshi Watanabe, Shingo Saito | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 Parallel-to-orthogonal polarisation-state converter for dual-mode Nd:YVO4 microchip laser. | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Electron. Lett | 6. 最初と最後の頁 802 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/e112.12266 | 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 - |
| 1. 著者名 Duan Lifeng, Xu Aojie, Wang Lirong, Zhang Yun | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 Accessing the spectrum of a single-photon by the Hong-Ou-Mandel interference | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Optics Express | 6. 最初と最後の頁 5418 ~ 5418 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.510983 | 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 - |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Funada Shin, Suzuki Jun | 4. 巻 109 |
| 2. 論文標題 Error tradeoff relation for estimating the unitary-shift parameter of a relativistic spin-1/2 particle | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review A | 6. 最初と最後の頁 012425-1 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.109.012425 | 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 - |

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 平島 耕介, 兵頭 政春, 張 贊, 齋藤 伸吾 |
| 2. 発表標題 Nd:YVO4マイクロチップレーザーのための偏光状態変換器の試作と実験 |
| 3. 学会等名 OPJ2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Lifeng Duan, Aojie Xu, Yun zhang |
| 2. 発表標題 Experimental observation of three-photon interference by introducing unbalanced path-length difference |
| 3. 学会等名 OPJ2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Aojie Xu, Lifeng Duan, Yun zhang |
| 2. 発表標題 Interference between a weak coherent photon and a heralding photon |
| 3. 学会等名 OPJ2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

特になし

| |
|------|
| 特になし |
|------|

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 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 鈴木 淳 (Suzuki Jun) (70565332) | 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授 (12612) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|