

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：32653

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740275

研究課題名(和文)連続波光源を用いた量子計量学の検証実験

研究課題名(英文)Experimental Demonstration of Quantum Metrology using Continuous-Wave Laser

研究代表者

辻野 賢治 (TSUJINO, Kenji)

東京女子医科大学・医学部・助教

研究者番号：40415849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：光子の量子もつれ合い状態であるNOON状態と、光子数識別器を用いることで、光干渉計における位相推定精度は、理想的には標準量子限界を超えられる。連続波(CW)光源で生成されたNOON状態を用いて検証実験を行う場合、NOON状態のコヒーレンス時間は、用いる光子数識別器の応答時間よりも十分長くなる。本研究では、光干渉計の出力量子状態のコヒーレンス度を計算することで、光子計数イベントの振る舞いを解析した。結果として、光子計数イベントはアンチバンチングしていることが明らかとなった。つまり、光子数識別器を用いるよりも、高速な単一光子検出器の開発し、狭線幅なNOON状態を生成することが今後重要となる。

研究成果の概要(英文)：Using the NOON state and a photon-number-resolving detector, the accuracy of phase measurement with a Mach-Zehnder interferometer reached the Heisenberg limit. In an experimental demonstration using the continuous-wave NOON state, the coherence time was much longer than the response time of a photon-number-resolving detector. Therefore, we investigated the time correlation of photon detection events in the light field from the Mach-Zehnder interferometer. As a result, it was found that the photon detection events were anti-bunching. This result suggests that we need a photon-number-resolving detector with a fast response time and a NOON state with a much longer coherence time in order to use a large-photon-number NOON state.

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子情報 量子計量学 量子光学

1. 研究開始当初の背景

計量・計測は科学において最も基本的なテーマの一つであり、特にその精度が重要視される。ある物理量を測定した平均値を A とした場合、その測定誤差 δA は、測定回数 N の平方根に反比例することが明らかとなっている。これは測定精度の標準量子限界として知られている。

しかし、最近の量子計量学 (Quantum Metrology) の発展により、標準量子限界を超えた測定精度が実現できることが明らかとなってきた。量子計量学では、測定するプローブとして、非古典的な状態を用いる。特に、量子もつれ合いと呼ばれる量子相関をもつ状態をプローブとして利用することで、標準量子限界を超える測定精度を達成できることが明らかとなってきた。この限界は Heisenberg 限界と呼ばれている。

一方で、光干渉計は計量・計測の分野で最も広く用いられている装置の一つである。したがって、光干渉計に量子計量学を適用することを念頭に置いた研究をすることにより、将来的に幅広い応用が期待される。

2. 研究の目的

量子計量学 (Quantum Metrology) における光位相の超分解能測定に対して、光子計数を行う時間幅 T が及ぼす影響について解明する。

量子計量学を光計測に応用した場合、従来の限界を超えた測定が可能になり、幅広い分野にその影響は波及すると考えられる。重力波検出の様な精密測定を行う場合、プローブ光としては狭線幅 CW 光源が用いられる。CW 光源の単一モードの時間幅は、通常、その測定に用いられる光子検出器または光子数識別器の時間分解能よりも十分長い。本提案によって、最適な光子計数時間幅を明らかにする。

プローブとして CW 光源で生成された NOON 状態を用いた時に、光子数識別器による光子計数時間幅が、マッハツェンダー干渉計から出力される干渉縞にどのような影響を及ぼすかを検証する。

干渉計に入射する NOON 状態の光子数を N とすると、干渉計の位相を変化させたときに出力で観測される干渉縞は、以下のように表される。

$$(1 - \cos N\phi) / 2$$

つまり、量子計量学においては光子数 N に依存した干渉縞が観測される。CW レーザ光源で NOON 状態を生成した場合、単一モードの時間幅は使用する光共振器の周波数帯域 B の逆数程度となる。出力側では、アレイ化 Si APD を用いて、2 つの出力の光子数差を測定するが、測定時間 T を様々に変化させて干渉縞の測定を試みる。これにより共振器の周波数帯域 B と測定時間 T の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究の方法は以下のような構成になっている。

(1) 実験的方法

実際にマッハツェンダー干渉計内に NOON 状態を生成させ、その出力を光子数識別器で検出することで、光子検出の時間幅が、出力の干渉縞にどのような影響を与えているかを検証する。

NOON 状態は、連続波 (CW) 光源を用いて生成する。設計した光共振器内に、非線形光学結晶を置き、波長 266nm の CW 光源を用いて、波長 532nm の真空スクイーズド光を生成する。生成したスクイーズド光と、別の波長 532nm のレーザー光をマッハツェンダー干渉計へと入射する。こうすることで、干渉計内に NOON 状態が生成できることが明らかとなっている。設計では、光共振器から生成されるスクイーズド光のコヒーレンス時間は約 100ns 程度である。

この NOON 状態を検出するための光子数識別器にはアレイ化 Si APD を用いる。アレイ化 Si APD は浜松ホトニクス社製 MP-PC を用いる。

(2) 解析的手法

実験で生成が想定される NOON 状態がマッハツェンダー干渉計から出力された場合の強度相関関数などの量子コヒーレンス度を計算することで、出力状態の光子計数イベントの振る舞いを調べる。

4. 研究成果

解析的手法についての成果を報告する。NOON 状態の検出技術は、アレイ化 Si APD で実現される光子数識別器により行う予定であるが、その光子数識別能力は理想的な性能とはいえ、識別の誤り率は光子数が多くなるほど高くなる。また、光子数識別能力を犠牲にすることで、高速な光子計数が可能となるなど、測定する状況に応じて、光子数識別器の性能を調整する必要がある。

今回想定している実験では、光子数識別器の時間分解能 (約 1ns 程度) と比較して、生成する NOON 状態のコヒーレンス時間 (約 100ns) は十分長い。光子計数イベントが、バンチングしている場合は、光子数識別器の応答時間内に複数個の光子計数イベントが発生する可能性があるため、光子数識別能力の高い光子数識別器を使用しなくてはならない。一方で、光子計数のイベントがアンチバンチングしている場合は、光子数識別器の時間応答内で 2 光子以上の光子を検出するイベントは少ないため、光子数識別能力よりも、高速応答、光子検出効率や暗計数率を改善することにリソースを集中できる。

解析では、マッハツェンダー干渉計内に NOON 状態が生成された場合を想定し、マッハツェンダー干渉計からの出力における光子計数イベントの強度相関関数 (量子 2 次コ

ヒーレンス度)を計算した。NOON状態の光子数は最大で10とした。その結果、マッハツェンダー干渉計の光路差が0の時、強度相関関数 g^2 は1を下回った。つまり、アンチバンチングしていることが明らかとなった。

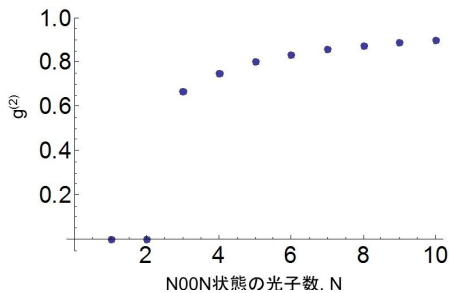


図1 . 計算した強度相関関数 g^2 とNOON状態の光子数Nの関係. 光子数が1から10の間で、強度相関関数は1を下回っており、アンチバンチングしていることが分かる。

上述の解析では、光子数が3光子以上の場合においても全て量子2次コヒーレンス度を計算しているため、3光子以上の光子計数イベントがどのような振る舞いをするのかを調べる必要がある。そこで、光子数4までのNOON状態において、光子数に応じた次数のコヒーレンス度を計算した。また、このとき、マッハツェンダー干渉計の位相を変化させた時のコヒーレンス度についても計算した。

図2に光子数3のNOON状態について計算した3次コヒーレンス度について、位相に対する変化の様子を示す。

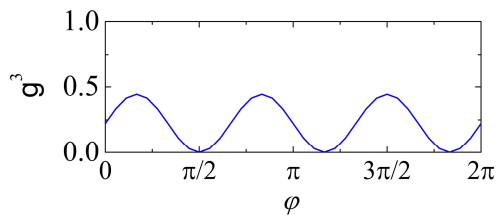


図2 . マッハツェンダー干渉計からの出力状態の3次コヒーレンス度の計算結果. NOON状態の光子数は3である。また、マッハツェンダー干渉計の位相を0から2まで変化させている。

3次コヒーレンス度は位相によらず1を下回っているため、アンチバンチングしていることが分かる。さらに、そのコヒーレンス度は、位相により変化し、ある位相によっては、0になる。つまり、マッハツェンダー干渉計の位相により、出力の光子計数イベントの時間相関を制御できることを意味す

る。

この成果により、将来的にどのような性能の光子数識別器を開発すればよいのか、といった指針が明確になる。例えば、コヒーレンス度が0であれば、同じタイミングで同時に複数個の光子を検出することはないため、光子数識別器は必要なく、高性能な単一光子検出器を開発すればよいことになる。現段階でも、単一光子検出器の方が、技術的にシンプルであり、市販化もされている。光干渉計への量子計量学の応用を考えた場合、単一光子検出器を使ったシステムが可能であれば、実用化へのハードルも下がることとなる。

今後は、上述の解析結果を実験により実証する。当初の計画では、CW光源から生成したNOON状態のコヒーレンス時間と比較して、光子計数イベントの時間スケールをどのように設定すべきかを明らかにする予定だった。しかしながら、今回の解析結果により、

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Shingo Suzuki, Naoto Namekata, Kenji Tsujino, Shuichiro Inoue, "Highly enhanced avalanche probability using sinusoidally-gated silicon avalanche photodiode," Applied Physics Letters, 査読有, 104, (2014), pp.041105. DOI:10.1063/1.4861645

[学会発表](計3件)

Kenji Tsujino, Toshio Yamaguchi, Midori Matsumoto, Junji Kinoshita, "Degree of Quantum Coherence of the Light Field from an Optical Mach-Zehnder Interferometer with NOON state," 13th Asian Quantum Information Science Conference, 2013/08/26, Chennai (India).

辻野賢治, 山口俊夫, 松本みどり, 木下順二, "マッハツェンダー干渉計から出力されたNOON状態の光子統計におけるアンチバンチング," 第28回量子情報技術研究会(QIT28), 2013/05/28, 北海道札幌市.

辻野賢治, 山口俊夫, 松本みどり, 木下順二, "マッハツェンダー干渉計出力時におけるNOON状態の強度相関関数," 第60回応用物理学学会春季学術講演会, 2013/03/30, 神奈川県厚木市.

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

名称:
発明者:

権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

[http://gyoseki.twmu.ac.jp/twmhp/KgApp?k
yoinId=ymdkgbysggk](http://gyoseki.twmu.ac.jp/twmhp/KgApp?k
yoinId=ymdkgbysggk)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻野 賢治 (TSUJINO, Kenji)
東京女子医科大学・医学部・助教
研究者番号：40415849