

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：62616

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654133

研究課題名(和文)量子論的弱値増幅を応用した高精度位相測定法の開発

研究課題名(英文)Development of a precise phase measuring with weak-value amplifications

研究代表者

阿久津 智忠(Akutsu, Tomotada)

国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号：40564274

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、量子測定理論を応用した新方式の超精密測定方法の開発を目指すものである。これまでの量子非破壊測定は、不確定性原理の壁を打ち破るための測定系が複雑化し、原理検証実験のレベルにとどまる事が多く、実際の測定器への応用面での難しさがあった。これに対し、近年研究の進められている弱値(weak value)の増幅を応用すれば、比較的シンプルな測定系で高精度な測定ができる可能性がある。本研究では、この方法の基礎的な部分を実験面から確認することを主に目指し、パルス光源を用いたシンプルなマイケルソン光干渉計を構築した。また、理論面から、本実験を応用した位相検出器の性能面について検討を行った。

研究成果の概要(英文)：The final objective of this research is to develop a new method using quantum measurement theory. Although there have been a lot of experiments with the quantum non-demolition measurements, those experiments are often only for verifying principles of the theory due to their complicated setup, and it is difficult to apply the technologies to actual phase detectors. On the other hand, applying amplification of quantum weak values could bring us relatively simpler system even for precise measurements.

In this research, we aim to experimentally confirm the fundamental part of the method. For this purpose, we construct a simple Michelson interferometer with a pulse laser light source. In addition, we discuss theoretically the performance of actual phase detectors using the methods.

研究分野：重力波天文学

キーワード：量子光学 超精密測定

1. 研究開始当初の背景

1980年代の終わりごろ、Y. Aharonov らは、量子測定理論の1つの適用例として、次の3ステップからなる測定を行うことで、微小な被測定量(彼らの言葉で弱値、weak value)が大幅に増幅される可能性を示した(引用文献①)。この3ステップとはすなわち、

- ① 最適な測定用プローブの選択
(pre-selection)
- ② 被測定物の量子状態を非破壊に保つ測定系の構成
(weak measurement)
- ③ 最適な信号ポートの選択
(post-selection)

である。この発見当時では原理検証実験は困難であったが、近年の技術の発展により、光干渉計や超伝導体など様々な量子系で検証実験がなされている。

このような、いわゆる、「量子非破壊測定」は、近年注目を浴びている分野であり、これまでも様々な手法が提案されてきた。しかし、それらは上述のステップで言えば主に②にのみ注目したものであった。そのため、測定系やその制御系が複雑化し、実用的な超精密測定手法へとステップアップさせるのは容易ではなくなってきた。このため、これまでの量子非破壊測定は、原理検証実験に留まることが多かった。

2. 研究の目的

本研究が最終的に目指すのは、量子測定理論を応用した、全く新しい方式の超精密測定方法を構築することである。

これまでの量子非破壊測定は、背景で述べたとおり、不確定性原理の壁を打ち破るための測定系が複雑化し、原理検証実験に留まることが多かった。これに対し、近年研究の進められている弱値(weak value)の増幅を応用すれば、比較的シンプルな測定系で高精度な測定ができる可能性があった(例えば本研究の研究協力者・連携研究者らによる引用文献②)。

本研究では、この原理を応用した精密測定法の実用化を達成すべく、その基礎的手法を実験的に検証することを目指した。より具体的には、実用化にむけた基礎研究を行い、さらなる発展にむけた問題点などを洗い出すことを目標とした。実用化のためには、汎用性のあるシンプルな測定系構成が必要である。

また、実際の測定では、被測定量(信号)ではなく、信号対雑音比が増大するものでなくてはならない。そこで、あわせて、信号対雑音比を最適化する条件について、様々な観点から理論面での整理を行うことも目指した。

3. 研究の方法

今回主に実験装置として想定した光干渉計プロトタイプを図1に示す。これは、光源にパルス光を用いた(pre-selectionに対応)マイケルソン干渉計である(さしあたり、キャリアシフト型光干渉計と名付けた)。この構成で、両腕の位相差の弱値増幅による効果を検出することを試みる。

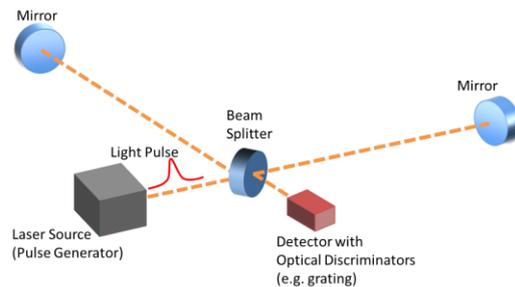


図1 キャリアシフト型光干渉計(プロトタイプ)

原理としては、配置した光検出器に対し、両アーム長のマクロな位相差を最適に保つことで(post-selection)、2つのアーム間の微小な差動位相の変位(弱値に相当)に対する応答として、光パルスに含まれるキャリア光の周波数成分全体(つまり光子の運動量)がシフトする。これを検出するために、光検出器は、周波数弁別機能を持っている必要がある。パルス幅が狭いほど、または同じことだが周波数成分がブロードであるほど、周波数成分のシフト量が増大する(引用文献②)。

周波数成分のシフト量の測定については、グレーティングで空間的に周波数分解して移動量を検出する方法や、パルスを光コムで構成して、単一周波数に安定化されたマーカ一用のレーザー光に対し、光コムがどれだけ周波数シフトしたかを検出する方法、あるいはこれらの複合方式など、原理的にもいくつか候補が考えられた。必要な機能は、

- ①パルスの周波数分布の監視
- ②パルスの周波数成分のシフト量の測定

である。パルスの周波数分布を監視するためには、個々の周波数成分について例えば強度を測定すればよい。これにはグレーティングなどを用いて出射光を空間的に周波数分解することで可能であろう。また、パルスの周波数成分シフト量を測定するには、たとえば干渉計への入力光を規則的なパルス列にし、光コムを形成することが考えられる。もともと、光コムの応用例の1つは、レーザー光源の絶対周波数の測定である。したがって、本研究で用いる干渉計プロトタイプの出射光に対しても、マーカ一用のレーザー光源を別途用意してこれと比較することで、どれだけシフトしたかを測定することができる。いずれにせよ、最終的には信号対雑音比を最適化

するような方式とする必要があったが、今回はとくにファーストステップとして、簡単にするために分光器を用いることとした。

また、上記の話に加えて、光源自体のレーザー光場のモードを、最低次の基本ガウシアン・モードでなくて、高次のエルミート・ガウシアン・モードまたはラゲール・ガウシアン・モードとした場合に弱値増幅的には信号対雑音比が改善するのではないかと、ということも提案されていたので、これについても検討をすすめ、可能であれば取り入れていければと考えた。

4. 研究成果

(1) 光源部分の構築

今回の実験を行うにあたり、コスト的な制約からまずパルス光源の準備をどのようにするかが問題であった。前述のとおりパルス幅は狭い方がよいが、その場合、光源の入手は困難になる。そこで、今回は基礎実験ということなので、パルス光源は自作することとした(図 2)。

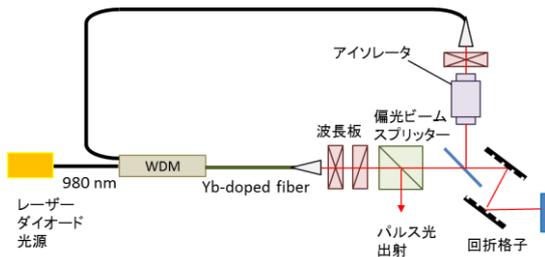


図 2 光ファイバーを用いたパルスレーザー光源の概念図

なお、この光源の構築には市販の Yb (イッテルビウム) ファイバーレーザーキット ((株) 光響) を一部参考にし、コストを抑えた。

実際に構築した、光ファイバーを用いたパルスレーザー光源を図 3 に示す。

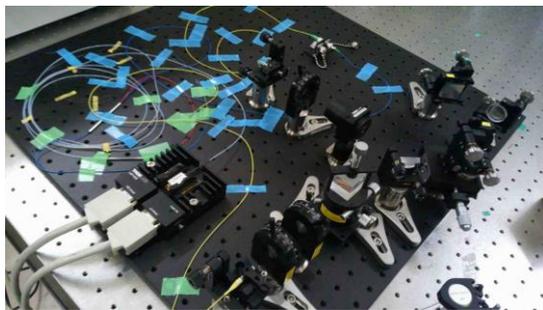


図 3 構築したパルスレーザー光源

この光源からでてくるパルス列をひとまず高速な応答を持つ光検出器に入力し、パルス

ス間隔を測定したところ、約 35 MHz 程度の繰り返し周波数であることが確認された(図 4)。ただ、パルス自体の形は、この光検出器の応答速度によって制限されている可能性があり、正しい読み出しができていないとは限らない(高速応答の光検出器でもパルスの形を検出できるほどの応答速度はない)。パルス幅を確認するには、光オートコリレーターなどを用意する必要があり、これは今後にアップデートする予定である。

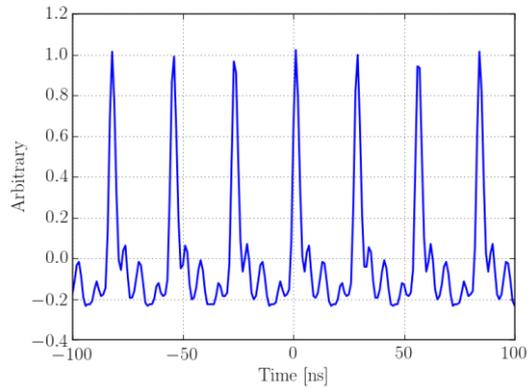


図 4 パルス出力を高速な光検出器で測定した姿。

(2) 光干渉計部分の構築

研究協力者・連携研究者らの引用文献②ではマッハ・ツェンダー干渉計を例にしているが、今回は単純なマイケルソン干渉計を構築することにした(研究協力者による引用文献③を参照)。これは、この原理を応用した位相検出器として、たとえば重力波検出器への応用を念頭におこうとしたためである。鏡の姿勢の調整(アラインメント)はマイケルソン干渉計のほうが若干難しいが、そのかわり構築に必要な光学素子の部品点数が少なくなるというコスト的なメリットもある。今回構築したマイケルソン光干渉計の概念図を図 5 に示す。

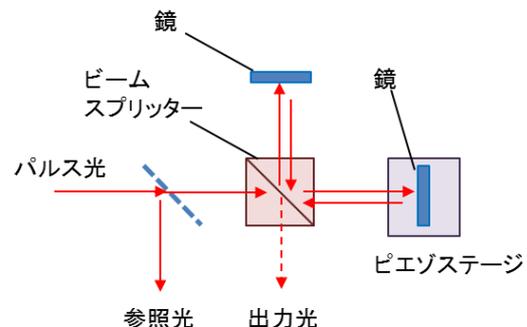


図 5 マイケルソン光干渉計の概念図

ここで、鏡の片方はピエゾステージに乗せられており、電圧を加えることでビームスプリッターとこの鏡の間を微小に変位させる

ことが可能になっている。信号は基本的に、出力光と書いてある側に出てくる光を用いる。参照光とあるのは、現在はパルス光をモニターするためのポートとして用意してあるが、今後の検出系のアップデートの際に使用する可能性がある。

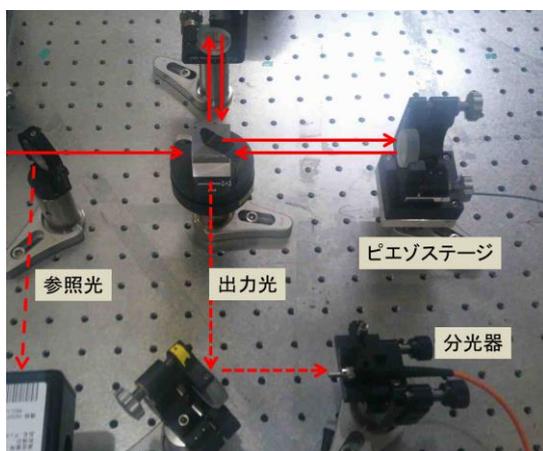


図 6 構築したマイケルソン光干渉計

実際に構築したマイケルソン光干渉計を図 6 に示す。場所の制約上、マイケルソン光干渉計の腕の長さは、それぞれ約 125 mm とコンパクトなものにしている。できればこれは 1 m 程度としたかったが、大気中でパルスレーザーを飛ばす関係上、今回はコンパクトなものとした。あまり長い距離、空气中を飛ばすと、パルスの形が崩れる恐れがある。より将来的には、2 m 直径程度の真空槽を用意して、その中に 1 m 程度の腕の長さものを組み込むことを考えるべきと思われる。

(3) 検出系の検討

検出系については、前述のようにいろいろな候補が考えられたが、今回はもっとも直接的で簡便な分光器を用いるものを用意した(図 6 参照)。

現状、マイケルソン光干渉計の片方の腕の鏡についているピエゾステージを振ることにより、通常の光干渉による光量の増減は確認できるが、分光器で読み出せるほどのキャリア光の周波数の中心シフトはまだ確認できてはいない。

検討すべき点としては、最初に述べた 3 ステップのうちの **post-selection** に対応するマクロな位相差の調整方法が挙げられる。また、まずは小さな周波数シフトでもよいかからとらえるためには、「分光器」をより精密測定できるものにアップデートすることが考えられる。これには、単純なグレーティングを用いるような分光器ではなく、光コムなどを用いた方法が考えられる。

(4) その他・理論面

一方で、光源の設計としては、高次の gaussian・モードを用いた場合の弱値増幅への

良い影響(信号対雑音比が向上する)があるのではないかという仮説があった。これについては、詳細な理論計算が行われた(雑誌論文①)が、現状では本実験に組み込んで信号対雑音比を向上できるような具体的な方法はまだ考案できていない。弱値増幅法については劇的な信号対雑音比の改善が見込まれるわけではないものの、既存のそれに匹敵する測定ができる可能性があることは理論的に示されている(引用文献③)。

今回、とくにマイケルソン光干渉計をテストベッドとしたのは、前述のように、弱値増幅現象を積極的に重力波検出器の感度向上へ応用しようという試みがあったためである。これは、国内外ではほぼ初めてのものではあった。実際の実用的な重力波検出のための光干渉計は、これよりはるかに規模が大きく(日本の KAGRA で腕の長さ 3 km)、また構成も単純なマイケルソン型干渉計ではなく、パワー・リサイクリングやシグナル・リサイクリングといった技術が使われる。このような複雑な構成の光干渉計での位相測定という現象を、いかにして光量子論的に(例えば今回の弱値増幅などの観点で)説明しうるか、という課題は未だに理論的に議論のあるところであり、今後の研究の発展が待たれる。

<引用文献>

- ① Y. Aharonov, D. Z. Albert, and L. Vaidman, "How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100," *Physical Review Letters* **60**, 1351 (1988)
 - ② A. Nishizawa, K. Nakamura, and M.-K. Fujimoto, "Weak-value amplification in a shot-noise-limited interferometer," *Physical Review A* **85**, 062108 (2012)
 - ③ A. Nishizawa, "Weak value amplification and beyond the standard quantum limit in position measurements," arXiv:1504.04777 (2015)
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 2 件)

- ① Y. Turek, H. Kobayashi, T. Akutsu, C. P. Sun, Y. Shikano, "Generalized von Neumann measurement with Hermite-Gaussian and Laguerre-Gaussian pointer states," posted to *New Journal of Physics*, arXiv:1410.3189 (2014) <http://arxiv.org/abs/1410.3189>
査読無(投稿・査読中)

西澤 篤志 (NISHIZAWA, Atsushi)
カリフォルニア工科大学

- ② K. Nakamura and M. Iinuma,
"Reinterpretations of an experiment on
the backaction in a weak
measurement,"
Physical Review A **88**, 042106 (2013)
DOI: 10.1103/PhysRevA.88.042106
査読有

[学会発表] (計 3 件)

- ① K. Nakamura and M. Iinuma,
" Reinterpretations of an experiment
on the backaction in a weak
measurement,"
量子論の諸問題と今後の発展
(QMKEK5)、
2014年3月10-11日、高エネルギー加速器
研究機構 (茨城県・つくば市)
- ② K. Nakamura and M. Iinuma,
"Re-interpretations for an experiment
on the back-action in a weak
measurement,"
第28回量子情報技術研究会 (QIT28)
2013年5月27日、北海道大学・札幌キ
ャンパス (北海道・札幌市)
- ③ K. Nakamura, A. Nishizawa, M.-K.
Fujimoto, "Evaluation of weak
measurements to all order and its
applications," The Principles and
Applications of Control in Quantum
Systems (PRACQSYS2012), 10-13
September 2012, Univ. of Tokyo, Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿久津 智忠 (AKUTSU, Tomotada)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号: 40564274

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

藤本 眞克 (FUJIMOTO, Masakatsu)
国立天文台・名誉教授
研究者番号: 90107475

宗宮 健太郎 (SOMIYA, Kentaro)
東京工業大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 10582603

中村 康二 (NAKAMURA, Kouji)
国立天文台・重力波プロジェクト推進室・
研究員
研究者番号: 10306871

(4) 研究協力者