

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610052

研究課題名(和文) 光量子干渉計を用いたCS重力理論の検証実験に向けて

研究課題名(英文) Toward the experimental verification of CS modified gravity using photonic interferometers

研究代表者

竹内 繁樹 (TAKEUCHI, Shigeki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80321959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：一般相対性理論に補正を加える、Chern-Simons(CS)重力理論は、渦巻き銀河の回転速度問題を解決する方法の一つとして注目されている。最近、連携研究者の浅田らは、中性子干渉計を用いたCS重力理論の検証を提案したが、大型で高精度の中性子干渉計を必要とした。本研究では、サニャック型ファイバ光干渉計を用いた検証実験に向けた検討を行った。その結果、帯域370nmにおよぶ広帯域低コヒーレンス光源の実現や、液晶リターダを用いた高精度位相制御などに成功した。また信号雑音比の観点からは、サニャック型ファイバ光干渉計と比較し、リングレーザー gyroscope が有利との検討結果を得た。

研究成果の概要(英文)：Chern-Simons (CS) modified gravity is attracting attention, by which it may be possible to solve the galaxy rotation problem. Recently, Professor Asada, who is one of the cooperative investigator of this project, proposed the possible test of CS modified gravity using a neutron interferometer, however, large area and high precision are required for the interferometer. In this project, we investigated the possibilities of the test of CS modified gravity using a Sagnac fiber interferometer. As a result, we developed a ultra-broad low-coherence light source with the bandwidth over 370 nm, and precise control of the optical phase using liquid crystal device. It is also found that ring laser gyroscope is advantageous to Sagnac fiber interferometer in view of signal to noise ratio.

研究分野：量子光学、量子情報、ナノフォトニクス

キーワード：相対論 CS重力理論 光干渉計

### 1. 研究開始当初の背景

近年の物理学上の重大問題の一つに、渦巻銀河の回転運動の問題がある。観測結果からほとんどの銀河において、その中心からの半径  $r$  の距離にある星の回転速度  $v$  が、 $r$  によらず一定であることが分かったが、これは通常の重力理論による予想 ( $v$  が  $1/\sqrt{r}$  に比例) と大きく異なっている。一般相対性理論の枠内でこの不整合を説明するために導入されたのが、ダークマターである。しかし、ダークマターはまだ確認されておらず、その存在に懐疑的な見方もある。

この問題を解決するもう一つのアプローチとして、Chern-Simons(CS)重力理論[参考文献 1]が、2003 年の発表以来、最近非常に注目を集めている。CS 理論は、単なる「後づけ」の修正ではなく、超弦理論などの量子重力理論の低エネルギー極限での有効理論として導くことができることなどが理由である。最近、この CS 理論の中性子干渉計による検証実験が、本研究の連携研究者である浅田らによって提案された[参考文献 2]。この提案では、10 のマイナス 4 乗の位相測定精度を持つ 5m 程度の大きさの中性子干渉計により、人工衛星搭載ジャイロスコープによる CS 理論補正項の上限 を超える精度での検証が、地上で可能になると予測された。しかし、現在の中性子干渉計の大きさは 20cm 四方程度であり、近い将来の中性子干渉計による高精度検証実験は非常に困難と考えられた。

### 2. 研究の目的

我々(竹内・浅田)は、中性子干渉計に変わり、長さ 50km の光ファイバを 10m×10m 程度のループ状にした光サニャック干渉計を用い、5m×5m の中性子干渉計と同等以上の精度で、CS 理論の検証実験が、原理的には可能であることを見出した。光サニャック干渉計は、航空機や、現在も GPS の利用が困難な環境下でジャイロとして用いられる安定な装置である。しかし実現にあたっては、この大型光サニャック干渉計の雑音要因やその対策について、事前に十分な検討を行う必要がある。

本研究では、文献[参考文献 2]で提案されている、中性子干渉計における干渉状態の日周および年周変化の観測を、光ファイバを長さ 50km の光ファイバを、10m 四方にループ状に 1250 回巻いたサニャック型干渉計を用いておこなうことを念頭とし、その実現可能性について、雑音要因や、対策について基礎的検討を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の 3 つの項目について、研究ならびに検討を進めた。

#### (1) 光ファイバ干渉計用の広帯域光源の検討と開発

光ファイバ干渉計用の光源として用いるのに、広帯域光源の妥当性について検討するとともに、低コヒーレンス広帯域光源について開発を進めた。

#### (2) 偏光ならびに位相ドリフト補正用の光学素子の選定と評価

光ファイバ干渉計には長時間安定性が必要となり、温度変化などに由来する光ファイバ中での偏光回転などを補正する必要がある。そのための光学素子の選定ならびに評価を行った。

#### (3) 光ファイバ干渉計を用いた実験の問題点や妥当性の検討

連携研究者を中心に実施された、中性子干渉計の利用を念頭にした理論提案[参考文献 2]を基礎とした、光学干渉計の利用についての理論検討[参考文献 3]などについて検討するとともに、光サニャック干渉計と、他の光干渉計との比較検討を行った。

### 4. 研究成果

本研究では、研究の方法で述べたそれぞれの項目において、下記のような成果を得た。

#### (1) 光ファイバ干渉計用の広帯域光源の検討と開発

まず、従来の光ファイバ干渉計の研究状況の調査を実施した結果、光ファイバ干渉計に必要な光源として、広帯域低コヒーレント光源が適していることを確認した。

広帯域低コヒーレント光源としては、現在スーパーluminescentダイオード光源が利用可能だが、その帯域はせいぜい 100nm 程度に限られている。そこで我々は、非線形光学結晶中でのパラメトリック下方変換を用いた広帯域低コヒーレンス光源の検討を行った。

発生には、物質・材料研究機構(NIMS)で作成された、定比リチウム酸タンタルチャープ擬位相整合素子を利用した。分極反転周期が、3.12  $\mu\text{m}$  から 3.34  $\mu\text{m}$  まで変化している。ポンプ光として波長 401nm、パワー 100mW のレーザー光を入射して得られた、パラメトリ

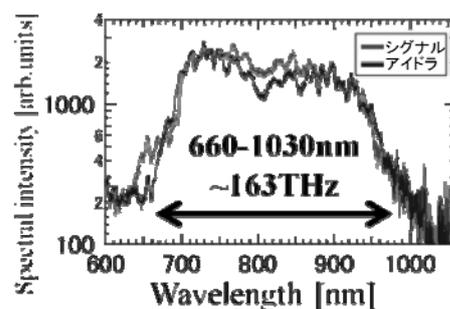


図1 広帯域低コヒーレンス光のスペクトル

ック蛍光対のスペクトルを図1に示す。波長660nmから1030nmと、370nm、周波数にして163THzの非常に広い帯域を持つ光源であることを確認した。また、干渉計を構築し、低コヒーレンス干渉実験を実施した結果、半値全幅 $1.5\mu\text{m}$ という極めて小さい領域に局在した干渉縞を観測することができた(雑誌論文1)。

### (2) 偏光ならびに位相ドリフト補正用の光学素子の選定と評価

光ファイバ温度変化などにより、光ファイバ中での偏光回転などを補正する必要があると考えられる。そのためには、偏光子を回転ステージなどで制御する方法が従来用いられていたが、高い精度が得られる反面、応答速度に最大数秒を要するという問題があった。一方、液晶リターダは、応答速度が5~20ミリ秒と、偏光子の回転ステージによる制御と比較し、50~200倍高速な制御が可能である。しかし、高い精度を得ることが困難と考えられてきた。そこで、我々はグラソレーザプリズムとグラントムソンプリズムを利用した、低い偏光解消度を持つ精密な偏光干渉計を構築し、どの程度の精度が得られるかを実測により検証した。

図2に、測定された液晶リターダの位相シフト量の印加電圧特性を示す。12回平均の実測値を黒丸で示す。曲線は、実際の制御で用いる近似曲線である。また、繰り返し位置決め精度について検討した結果、液晶リターダは0.03度と、半波長板と回転ステージを用いて得られる精度(0.08度)を上回る高い精度が得られた。

### (3) 光ファイバ干渉計を用いた実験の問題点や妥当性の検討

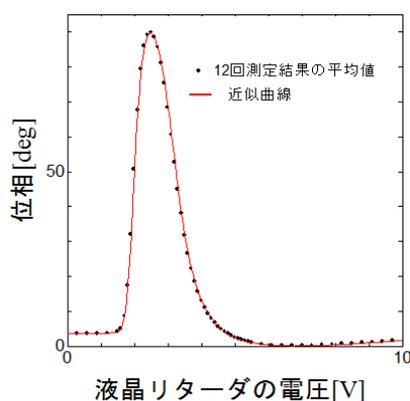


図2 液晶リターダの位相シフト量の印加電圧特性

研究申請時は、中性子干渉計の利用を想定した理論提案[2]を、光学干渉計により実現するというアイデアに基づいていた。その後、連携研究者らは、光学干渉計を想定したより詳細な理論的検討を行った[3]。その結果、

位相シフトの日周変化および年周変化に関して、CS理論によって予言される変化の他に、相対論的効果であるLense-Thirring(LT)効果による変化が存在する。数値計算による解析の結果、CS理論の検証に用いる干渉計の方向を最適化することで、LT効果を抑制できること、また双方の効果の大きさは地球中心からの異なる距離異存性をもつベッセル関数になっており、異なる高度での測定も、CS理論による変化をLT効果による変化から分離することに有用であることが明らかにされた。

我々は、ファイバサニャック干渉計と他の干渉計の研究状況について比較を行った。その検討の結果、当初モデルとしたファイバサニャック干渉計の場合、各種散乱の影響により、位相ノイズが10のマイナス6乗 $[\text{rad/s}/\sqrt{\text{Hz}}]$ 程度にリミットされることが分かった。一方、リングレーザージャイロでは、帯域10のマイナス3乗ヘルツ以上の比較的広い帯域にわたり、10のマイナス8乗 $[\text{rad/s}/\sqrt{\text{Hz}}]$ 以下のノイズを達成できることが分かった。

以上の様に、光学干渉計を用いたCS重力理論の検証実験につき研究を行った。

本研究に対する、連携研究者である弘前大学浅田秀樹教授、京都大学岡本亮准教授をはじめ、物質・材料研究機構栗村直博士、Lim博士、名古屋大学西澤典彦教授のご協力に感謝いたします。また高島秀聡助教をはじめとする、研究室のスタッフ、学生各位の協力に感謝します。

#### [参考文献]

1. R. Jackiw and S. Y. Pi, Phys. Rev. D, vol. 68, 104012 (2003).
2. H. Okawa, K. Yamada, and H. Asada, Phys. Rev. Lett. vol. 109, 231101 (2012).
3. D. Kikuchi, N. Omoto, k. Yamada, and H. Asada, Phys. Rev. D vol. 90, 064036 (2014).

#### 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6件)

- ① M. Okano, H. H. Lim, R. Okamoto, N. Nishizawa, S. Kurimura and S. Takeuchi, “0.54 $\mu\text{m}$  resolution two-photon interference with dispersion cancellation for quantum optical coherence tomography”, Scientific Reports, vol.5 (2015) 18042/1-8. DOI:10.1038/srep18042, 査読有。

- ② S. Takeuchi, “Photonic quantum information : science and technology”, Proc. Jpn. Acad., Ser. B, vol. 92 (2016) 29-43. <http://www.japan-acad.go.jp/pjab> DOI:10.2183/pjab.92.29, 査読有。

[学会発表] (計 57 件)

- ①竹内繁樹、「量子光学、量子情報、量子非線形光学などの実験的研究」、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、東京都、2016 年 3 月 20 日
- ②竹内繁樹、「光子を用いた量子情報技術・量子計測の進展」、ナノ量子情報エレクトロニクス成果報告シンポジウム、東京大学、東京都、2016 年 2 月 29 日
- ③竹内繁樹、「光子を用いた量子計測」、応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「極限計測の科学と技術」東京大学山中寮内藤セミナーハウス、山梨県、2015 年 12 月 19 日
- ④S. Takeuchi, “Quantum entangled photon sources and their application to quantum metrology”, CLEO-PR 2015, BEXCO, Korea, 27. Aug., 2015
- ⑤ S. Takeuchi, “Quantum metrologies using entangled photons”, Workshop on Multi-Photon interferometry, University of Science and Technology of China, China, 9. May, 2015
- ⑥竹内繁樹、「光子を用いた量子計測」、2015 年度精密工学会春季退会シンポジウム「量子光工学の現状」、東洋大学、東京都、2015 年 3 月 17 日
- ⑦竹内繁樹、「光子を用いた量子計測」、応用物理学会シンポジウム S.4 フォトニクスと量子情報技術の融合へ向けて、東海大学、神奈川県、2015 年 3 月 11 日
- ⑧ S. Takeuchi, “Quantum metrologies using entangled photons”, 2015 IMCE International Symposium, Kyusyu University, Fukuoka, 28. Jan., 2015
- ⑨S. Takeuchi, “Quantum entangled photon sources and their application to quantum metrology”, 2014 International Topical Meeting on Microwave Photonics/The 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (MWP/APMP2014), Sapporo Convention Center, Hokkaido, 20. Oct., 2014
- ⑩岡本亮、竹内繁樹、「量子もつれ光を用いた標準量子限界を超える光位相計測技術」、2014 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会、徳島大学、徳島、2014 年 9 月 25 日
- ⑪ S. Takeuchi, “Photonic Quantum Information and Metrology”, Okinawa School in Physics : Coherent Quantum Dynamics, OIST Seaside House, Okinawa, 16. Sep., 2014
- ⑫ S. Takeuchi, “Photonic quantum circuits and their applications”, The 2ND Kyoto university & National taiwan university symposium, Kyoto University, Kyoto, 1. Sep., 2014
- ⑬ S. Takeuchi, “Quantum metrologies

using entangled photons”, Quantum 2014, I. N. Ri. M. Strada delle Cacce 91, Italy, 28. May, 2014

- ⑭竹内繁樹、「量子もつれ光子の計測への応用」、ナノ量子機構シンポジウム、東京大学、東京都、2014 年 5 月 19 日

[図書] (計 6 件)

- ①S. Takeuchi, Springer, Principles and Methods of Quantum Information Technologies, “Photonic Quantum Metrologies Using Photons: Phase Super-sensitivity and Entanglement-Enhanced Imaging”, 2016, 135-150
- ②竹内繁樹、朝倉書店、発光の事典、「量子的な光の発生」、「量子もつれ合い光子対と量子情報処理」、2015、56-67
- ③岡本亮、岡野真之、竹内繁樹、アドコム・メディア株式会社、OplusE、「量子もつれ光の光計測への応用」、2015、724-728
- ④竹内繁樹、日本物理学会、日本物理学会誌、「多様な量子もつれの実現と新たな応用」、2014、852-859

[その他]

(1) 報道関連 (計 9 件)

- ①竹内繁樹、岡野真之、栗村直、西澤典彦、「量子もつれ光を利用 超高分解能光断層撮影技術を開発」、科学新聞、4 面 2016 年 1 月 1 日
- ②竹内繁樹、「網膜画像診断 世界最高精度の技術」、京都新聞、23 面 2015 年 12 月 16 日
- ③竹内繁樹、「大阪科学賞：京大 2 教授に」、毎日新聞、28 面、2015 年 9 月 15 日

(2) ホームページ

<http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 繁樹 (TAKEUCHI Shigeki)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号： 80321959

(2) 連携研究者

浅田 秀樹 (ASADA Hideki)  
弘前大学・理工学研究科・教授  
研究者番号： 50301023

岡本 亮 (OKAMOTO Ryo)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号： 10435951