

令和元年6月18日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05445

研究課題名(和文) 光リング共振器を用いたローレンツ不変性の破れ探査

研究課題名(英文) Search for Lorentz Violation using an Optical Ring Cavity

研究代表者

道村 唯太 (Michimura, Yuta)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：80747006

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,700,000円

研究成果の概要(和文)：光速の行き帰りの差をこれまででない精度で測定することができる装置の開発に成功した。我々の装置はシリコンを入れることで光路の一部の屈折率を変えた非対称光リング共振器の両回りの共振周波数差を測定する。本研究ではモノリシック光学系の開発による振動雑音の低減と、無線信号取得による回転台の連続回転の実現を行った。1週間の試験観測を行った結果、光速の行き帰りの相対的な差に対して $5 \times 10$

研究成果の学術的意義や社会的意義

光速の等方性は光子のローレンツ不変性と結びついており、光速の異方性探査はローレンツ不変性の破れを探査していることになる。特殊相対性理論の発表から100年以上の間、様々な方法による実験的検証が世界中で行われてきたことで、ローレンツ不変性は全て物理学の基礎原理となっている。しかし、統一理論に向けた理論研究などにより、あるエネルギースケールではローレンツ不変性が破れている可能性が示唆されており、ローレンツ不変性の破れ探査実験はこれまでになく重要となっている。我々が開発に成功した実験装置はこのローレンツ不変性の破れを世界最高精度で探査することができる装置の一つである。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded in developing an experimental setup which can measure the difference between the speed of light propagating in opposite directions with unprecedented sensitivity. This is done by measuring the resonant frequency difference between two counterpropagating directions of an optical ring cavity. Our cavity contains a silicon piece to make the cavity asymmetric. We have developed a monolithic optical bench to reduce vibration noise and realized a continuous rotation by wireless data acquisition system. The upper limit of  $5 \times 10$

研究分野：重力・相対論実験

キーワード：ローレンツ不変性 異方性 光共振器 レーザー 干渉計 相対性理論 拡張標準理論 対称性

1. 研究開始当初の背景

特殊相対性理論は、物理法則は全ての慣性系で不変であるというローレンツ不変性を基礎としている。発表から 100 年以上が経ち、様々な方法による実験的検証が世界中で行われてきたが、その破れは未だ見つかっていない。その結果、ローレンツ不変性は素粒子の標準模型や一般相対性理論といった、基本相互作用に関する全ての理論の基礎原理となっている。

では、ローレンツ不変性はどこまで正しいのであろうか？ 基本相互作用の統一に向けた超弦理論などの研究により、あるエネルギースケールではローレンツ不変性が破れている可能性が示唆されている。また、宇宙マイクロ波背景輻射揺らぎのスペクトルや、ダークマターやダークエネルギーといった存在を説明するために、ローレンツ不変性の破れが盛んに議論されている。このような大きな謎に包まれた状況で、より高精度なローレンツ不変性の破れの探査実験はこれまでになく重要となっている。

ローレンツ不変性の破れの探査実験の中で、古くから行われているのは光速不変の原理の破れ、特に光の速さの方向依存性を測定する実験である。光速の異方性は、光速の方向依存性  $c(\theta, \phi)$  を球面調和関数  $Y_{\ell m}(\theta, \phi)$  によって展開することで、各成分に分解することができる。これらのどの成分を測定することができるかによって、光速の異方性探査実験は 2 種類に分けられる。双極子成分( $\ell=1$ )や六重極成分( $\ell=3$ )のような、 $\ell$  が奇数の成分を探査する奇パリティ実験と、四重極成分( $\ell=2$ )や八重極成分( $\ell=4$ )のような、 $\ell$  が偶数の成分を探査する偶パリティ実験である。

偶パリティ実験は、マイケルソン・モーレーの実験に始まり、近年では直交させた 2 つの光共振器やマイクロ波共振器を用いて、光速の相対的なずれ  $\delta c/c$  で  $10^{-17}$  という高い精度で行われてきた(なお、研究期間中に  $10^{-18}$  の精度の実験結果が発表された[1])。一方で奇パリティ実験は、通常の光干渉計や光共振器では行うことができないため、あまり行われてこなかった。しかし近年、光リング共振器の中に媒質を入れることで非対称性を与え、光速の行き帰りの差に感度を持たせる実験が提案され、 $\delta c/c$  で  $10^{-13}$  レベルの上限値がつけられた[3]。

我々はこれまで、光リング共振器を用いた奇パリティ実験をさらに高度化させることで、先行研究より 1 桁高い世界最高精度での異方性探査を行った[5]。これまでに得られた上限値は  $\delta c/c$  で  $10^{-15}$  レベルである。また、拡張標準理論[6]と呼ばれる検証理論の枠組みの中で解析を行い、光子の高次のローレンツ不変性の破れの奇パリティ成分に対し、初の上限値をつけた。

拡張標準理論では、光子のラグランジアン密度にローレンツ不変性を破る項を追加する。破れ項を光子の運動量依存性によって展開したときに、運動量依存性のある項を高次のローレンツ不変性の破れと呼んでおり、依存性の次数が高いほど、大きな  $\ell$  の異方性を生むことがわかっている。高次のローレンツ不変性の破れは  $\ell$  が 3 以上の異方性を生み、くりこみ不可能な破れとなっている。

$\ell =$	1 (双極子)	2 (四重極)	3 (六重極)	4 (八重極)
直交マイクロ波共振器 [1]	測定不可	$9 \times 10^{-19}$	測定不可	解析なし
直交マイクロ波共振器 [2]	測定不可	$\sim 10^{-16}$	測定不可	$\sim 10^{-16}$
非対称光リング共振器 [3]	$2 \times 10^{-13}$	測定不可	解析なし	測定不可
コンプトン散乱 [4]	$2 \times 10^{-14}$ (*)	測定不可	解析なし	測定不可
非対称光リング共振器(これまで) [5]	$\sim 6 \times 10^{-15}$	測定不可	$\sim 2 \times 10^{-15}$	測定不可

表 1 各異方性成分への上限値の現状(コンプトン散乱による上限値は 95% C. L. で双極子 3 成分のうち 2 成分のみの上限値。他は  $1\sigma$  の上限値。 $\ell \geq 3$  が高次の破れから来る異方性。)

[1] M. Nagel *et al*, Nature Communications **6**, 8174 (2015)

[2] S. R. Parker *et al*, Phys. Rev. Lett. **106**, 180401 (2011)

[3] F. N. Baynes *et al*, Phys. Rev. Lett. **108**, 260801 (2012)

[4] J.-P. Bocquet *et al*, Phys. Rev. Lett. **104**, 241601 (2010)

[5] Y. Michimura *et al*, Phys. Rev. Lett. **110**, 200401 (2013);

Y. Michimura *et al*, Phys. Rev. D **88**, 111101(R) (2013)

## 2. 研究の目的

本研究では、これまでに我々が開発してきた装置を改良することにより、かつてない精度でのローレンツ不変性の破れ探査を行うことを目指した。特に我々はこれまで実験があまり行われてこなかった光速の行き帰りの差の探査に着目し、シリコンを入れた非対称光リング共振器を用いてこれを測定することで奇パリティ成分の破れを探査する。有意な破れが見つからなかった場合は破れが生じるエネルギースケールや非可換幾何学の長さスケールに制限をつける。破れが見つかった場合は、空間は対称であるという我々の基本的宇宙観を覆す極めて重大な発見となる。

これまでの我々の実験では  $\delta c/c$  で  $10^{-15}$  レベルの上限値をつけてきたが、 $10^{-17}$  のレベルで異方向性があってもおかしくないという試算があり、精度向上によりローレンツ不変性の破れが世界で初めて発見される可能性を秘めている。また、非可換幾何学によれば、 $10^{-15}$  m が特徴的な非可換長さスケールだとすれば、 $10^{-20}$  のレベルで異方向性が存在する。ローレンツ不変性を破る統一理論の可能性に対し、実験的な知見を与えることが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

我々は、シリコンを入れた非対称光リング共振器の反時計回りの共振周波数と時計回りの共振周波数を比較することで、ローレンツ不変性の破れ探査を行う。光学系の構成は図1のようになっており、これまでの研究で我々が用いてきた構成と同様である。3枚の鏡で構成された光リング共振器の中にシリコンを入れることで、光路の一部の屈折率を変え、光速の異方向性の奇パリティ成分に感度を持たせる。この光リング共振器の反時計回りの共振周波数と時計回りの共振周波数の差はダブルパス構成で測定する。

レーザー光源(波長 1550 nm、10 mW)からの光は光ファイバを用いて光学系に供給する。レーザー光はまず、光リング共振器に反時計回りに入射する。この時の反射光を用いて、レーザー光の周波数を反時計回りの共振周波数に安定化する。光リング共振器の透過光は全反射鏡によって打ち返され、今度は時計回りに入射させる。この時の反射光から、反時計回りの共振周波数と時計回りの共振周波数の差に比例した信号を取り出すことができる。従って、この信号を用いてローレンツ不変性の破れ探査を行うことができる。

光リング共振器は、この破れ信号を変調させるために回転させる。地球自転による変調のみを利用する場合に比べて、破れ信号を高い周波数に変調させると、雑音を下げることができる。また、地球自転のみでは自転軸に対称な異方向性成分を探査することはできないが、能動的に回転させることにより、異方向性の全ての奇パリティ成分を探査することができる。回転台の回転周波数は 0.1 Hz 程度である。

目標となる相対周波数雑音レベルが達成されたら、観測運転を行う。取得したデータは長期安定度がよい時間スケールに区切り、まずは回転台の回転周波数の整数倍の周波数  $m_{rot} \omega_{rot}$  で復調する。次に、復調により得られた直交位相振幅のデータを 1 日分ずつのデータに区切り、地球自転周波数の整数倍の周波数  $m_E \omega_E$  で復調する。異方向性の双極子成分と六重極成分を探査するため、 $m_{rot}=1,3$ 、 $m_E=0,1,2,3$  とする。

こうして得られた観測日数分の復調振幅の平均をそれぞれ取ることにより、28 個の復調振幅を得る。この復調振幅は異方向性の 3 つの双極子成分と 7 つの六重極成分の大きさと結びついており、その関係から各大きさを導く。統計的不確かさや系統的な不確かさより有意にゼロからずれていた場合、ローレンツ不変性の破れの発見となる。ずれていなかった場合は上限値となる。

また、復調振幅は拡張標準理論のカモフラージュ係数とも結びついているため、質量次元  $d=6,8$  の係数を導く。カモフラージュ係数とは光子のラグランジアン密度に追加したローレン

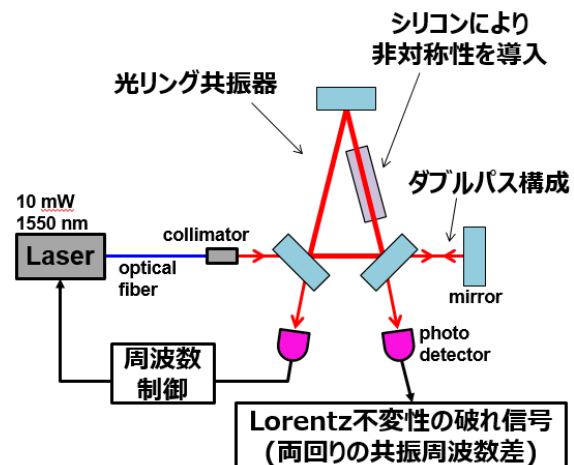


図1 光学系の構成。シリコンを入れた非対称光リング共振器の両回りの共振周波数差をダブルパス構成で測定することでローレンツ不変性の破れの探査を行う。



ツ不変性の破れ項の係数であり、 $d-4$  が運動量依存性の次数と一致する。この係数から、ローレンツ不変性の破れが生じるエネルギースケールを導くか、それへ下限値をつけることができる。

#### 4. 研究成果

これまでの実験では、装置の回転に伴う雑音によって感度が制限されていた。そこで本研究では、ローレンツ不変性の破れ探査の精度向上のために光学系のモノリシック化、回転装置の連続回転の実現、回転に同期する雑音の除去に重点を置き、装置の改良を進めた。これらの改良により、1 週間の試験的な観測運転で光速の行き帰りの差に対して、 $5 \times 10^{-15}$  の上限値を得た。これまでの実験と同じ 1 年間の観測を行えば、これまでの上限値を 5 倍更新できる性能であり、感度向上に成功した。

##### (1) モノリシック光学系の開発

モノリシック光学系とはすべての光学素子を同一の板の上に接着することで、同相雑音除去により振動感度を低減させる手法である。通常ミラーホルダーなどを使う光学系に比べるとアラインメント調整ができなくなってしまうが、ホルダーを使わないことによって光軸を低くすることができ、またホルダー固有の共振モードなどの影響を低減することができる。そのため、宇宙重力波望遠鏡 LISA 計画や量子光学実験での光共振器などで用いられている。しかし、これまでのモノリシック光学系はマイケルソン干渉計など比較的アラインメント調整が簡単なものや、光共振器のみがモノリシック光学系で光共振器への入射光軸は別途アラインメント可能なものであった。

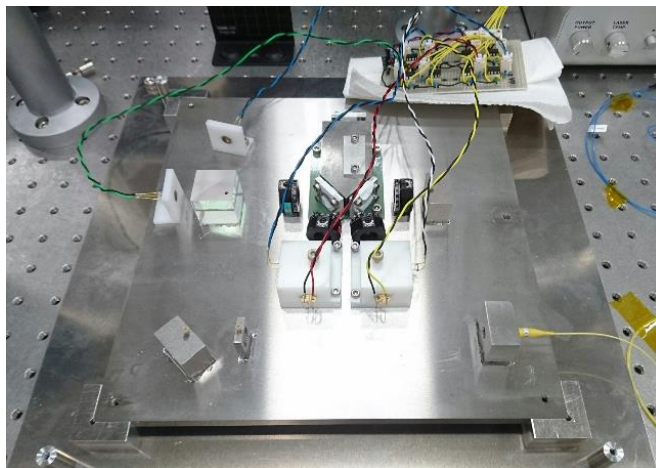


図 2 開発したモノリシック光学系。低熱膨張合金（スーパーインバー）製の板に紫外線硬化樹脂で光学素子が接着されている。

我々は光共振器と入射光学系を一体としたモノリシック光学系を製作することで、これまでになく安定な光学系の開発を目指した。そのためには光共振器の共振器軸と入射光軸を高精度に合わせるアラインメント手法が必要であり、その開発を行った。光学素子の位置決めのためのテンプレートを用意し、アラインメントステージを用いた微調整をした後に紫外線硬化樹脂で光学素子を接着するという手法でモノリシック光学系の製作を行った。その結果、モードマッチ率 60%程度のアラインメントに成功し、 $0.1 \text{deg}$  程度の精度で光学素子の接着ができた。

また、振動試験により振動感度の評価を行い、振動雑音が  $2 \times 10^{-13} / \sqrt{\text{Hz}}$  程度になる見積もりを得た。これは 1 年間の観測で  $\delta c/c$  で  $10^{-17}$  レベルの探査が可能なほど小さい振動雑音である。さらに、光共振器に温度変動を与えることで同相雑音除去比の測定を行った結果、 $0.1 \text{ Hz}$  で約  $1/100$  の同相雑音除去比が確認できた。

##### (2) 回転台の連続回転の実現と回転に同期する雑音の除去

これまでの実験装置では、ローレンツ不変性の破れ信号などの取得をケーブルで行っていたため、ケーブルのねじれを回避するために回転台の回転と逆回転を交互に繰り返す必要があった。そのため、データを 1 回転ずつに区切る必要があり、復調振幅を求める際に大きな不確かさが発生していた。また、回転反転時のデータを用いることができないため、測定時間のロスが生じていた。さらに、ケーブルから導入される振動が問題となった。

そこで我々は、信号を AD 変換し、無線伝送により取得することでこれらの問題を解決した。開発した回転台を図 3 に示す。レーザー光源や各種電気回路への電源供給のために、ロータリーコネクタを用いて AC 電源を供給する。各種信号はデータロガーに記録され、無線で信号伝送を行う。これらの工夫により、回転台の連続回転を実現した。また、AD 変換の際の雑音を評価し、適切なフィルタを入れることで十分に小さい ADC 雑音になっていることを確認した。

開発した光学系を回転台の上に載せ、試験運転を行ったところ、信号線が環境磁場中を回転することに起因すると考えられる磁場雑音の影響が観測された。これは回転に同期した雑音で

あり、異方性信号の疑似信号になってしまう。そこで磁場センサを導入し、磁場の影響を差し引く手法を開発した。また、回転に同期した雑音は異方性信号と異なり高調波を生むため、高調波を用いて雑音を除去する手法も確立した。

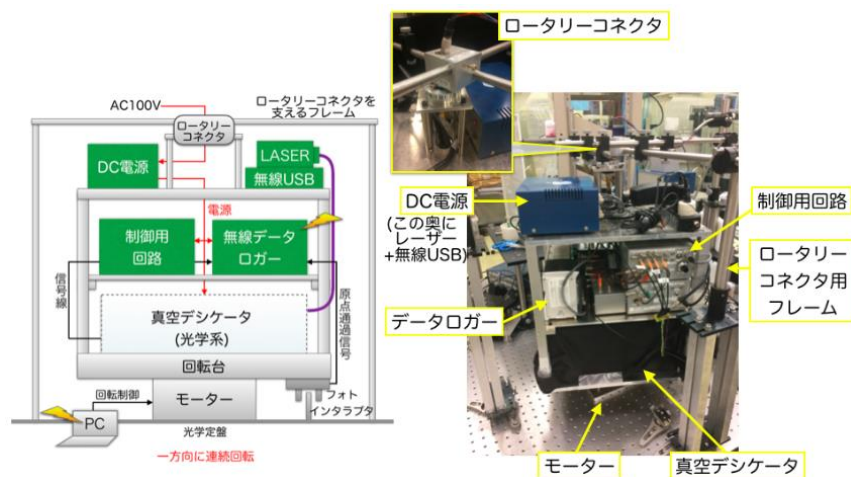


図 2 開発した連続回転機構。無線での信号伝送により回転台の連続回転を実現した。

以上の開発と性能評価により、 $\delta c/c$  で  $10^{-15}$  レベルのこれまでの上限値を更新する実験装置が完成したと言える。今後はこの実験装置を用いて 1 年間に渡る本格的な観測運転を行う。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- [1] Nobuyuki Matsumoto, Seth B. Catano-Lopez, Masakazu Sugawara, Seiya Suzuki, Naofumi Abe, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Keiichi Edamatsu, *Demonstration of Displacement Sensing of a mg-Scale Pendulum for mm- and mg-Scale Gravity Measurements*, Phys. Rev. Lett. 122, 071101 (2019)  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.071101>
- [2] Ipeei Obata, Tomohiro Fujita, Yuta Michimura, *Optical Ring Cavity Search for Axion Dark Matter*, Phys. Rev. Lett. 121, 161301 (2018)  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.161301>
- [3] Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, Kazuhiro Hayama, *Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences*, Phys. Rev. D 98, 022008 (2018)  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.022008>
- [4] Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, Masaki Ando, *Particle swarm optimization of the sensitivity of a cryogenic gravitational wave detector*, Phys. Rev. D 97, 122003 (2018)  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.122003>
- [4] Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer, *Direct approach for the fluctuation-dissipation theorem under nonequilibrium steady-state conditions*, Phys. Rev. D 97, 102001 (2018)  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.102001>
- [5] Yuta Michimura, Jake Guscott, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, *Higher order test of Lorentz invariance with an optical ring cavity*, Proceedings of the Fourteenth Marcel Grossmann Meeting, edited by Massimo Bianchi, Robert T. Jantzen, Remo Ruffini (World Scientific, Singapore, 2017)  
<https://arxiv.org/abs/1602.00391>

[学会発表] (計 16 件)

- [1] 武田紘樹, 道村唯太, 長野晃士, 五十里哲 「超小型衛星を用いた光速等方性検証ミッションの提案」 超小型衛星利用シンポジウム, 2019 年 3 月
- [2] 小幡一平, 長野晃士, 道村唯太, 藤田智弘 「宇宙重力波望遠鏡を用いたアクシオン暗黒物質の探索」 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月
- [3] 道村唯太, 小幡一平, 藤田智弘, 長野晃士, 川崎拓也, 安東正樹 「光共振器を用いたアクシオン暗黒物質の探索」 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月
- [4] 道村唯太, レーザー干渉計による精密距離計測, 第三回若手による重力・宇宙論研究会, 2019 年 2 月

- [5] 小幡一平, 藤田智弘, 道村唯太 「Optical Ring Cavity Search for Axion Dark Matter」 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月
- [6] 酒井譲, 武田紘樹, 道村唯太, 安東正樹 「光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証(3)」 日本物理学会 2 第 73 回年次大会, 2018 年 3 月
- [7] 武田紘樹, 酒井譲, 道村唯太, 安東正樹 「光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証(4)」 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月
- [8] Yuta Michimura, *Laser Interferometry for Gravitational Wave Astronomy*, International OSA Network of Students 2017, October 2017
- [9] 酒井譲, 武田紘樹, 道村唯太, 安東正樹 「光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証(1)」 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月
- [10] 武田紘樹, 酒井譲, 道村唯太, 安東正樹 「光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証(2)」 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月
- [11] Yuta Michimura, *Optical Cavity Tests of Lorentz Invariance*, Light driven Nuclear-Particle physics and Cosmology 2017, April 2017
- [12] 武田紘樹, 酒井譲, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹 「Lorentz 不変性検証のための光リング共振器制御系の開発」 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月
- [13] 酒井譲, 武田紘樹, 道村唯太, 安東正樹 「Lorentz 不変性検証のための連続回転機構の開発」 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月
- [14] 武田紘樹, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹 「光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証の信号取得無線化による感度向上」 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月
- [15] 道村唯太 「光リング共振器を用いたローレンツ不変性の検証」 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月
- [16] Yuta Michimura, Jake Guscott, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, *Higher Order Test of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity*, Fourteenth Marcel Grossmann Meeting, July 2015

〔図書〕 (計 1 件)

- [1] Yuta Michimura “Tests of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity” (Springer, 2017, 115 pages)

〔その他〕

- [1] 武田紘樹 「ローレンツ不変性検証のためのモノリシック光学系の開発」 東京大学修士論文, 2018 年 3 月
- [2] 酒井譲 「光リング共振器の連続回転による片道光速の異方性探査」 東京大学修士論文, 2018 年 3 月
- [3] 牛場崇文 「Laser Frequency Stabilization with a Cryogenic Optical Cavity」 東京大学博士論文, 2016 年 3 月
- [4] 道村唯太 「Tests of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity」 東京大学博士論文, 2015 年 6 月
- [5] 道村唯太, Springer Thesis Prize 受賞, 2016 年 5 月
- [6] 道村唯太, 第 10 回(2016 年)日本物理学会若手奨励賞(宇宙線・宇宙物理領域) 受賞, 2016 年 3 月

## 6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。