

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13542

研究課題名（和文）光学浮上鏡を用いた巨視的エンタングルメントの実現

研究課題名（英文）Realization of Macroscopic Entanglement with Optically Levitated Mirrors

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） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：鉛直方向の2つの光共振器によって鏡を支持する、新たな光学浮上の構成を発見した。この構成によりミリグラム級の質量を持つ鏡の安定な光学浮上が可能となるだけでなく、標準量子限界への到達が現在の技術で実現可能であることを示した。また、ねじれ振り子を用いて、我々が新提案した光学浮上手法の安定性の検証実験を進めることができた。光学浮上が実現できれば、プランク質量を大幅に上回る巨視的な鏡の位置の間の量子エンタングルメント状態を実現することができる。巨視的な世界で量子力学は成立するか、という根源的な問いに実験的に迫る新たな道を切り拓いたと言える。

研究成果の概要（英文）：We proposed a new method to optically levitate a mirror with two vertical Fabry-Perot cavities linearly aligned. With this configuration, we showed that both stable levitation and reaching the standard quantum limit of a milligram scale mirror are experimentally feasible with current technology. We also worked on the proof of principle experiment with a torsion pendulum to demonstrate the stability of our new configuration. If we can realize the optical levitation with the proposed setup, we can realize a quantum entanglement between the positions of two macroscopic mirrors much heavier than the Planck mass. Our research paves the way to experimentally answer the fundamental question of the validity of quantum mechanics in macroscopic scales.

研究分野：重力・相対論実験

キーワード：光学浮上 レーザー 光輻射圧 光共振器 量子力学 巨視的量子力学 エンタングルメント 量子非破壊計測

1. 研究開始当初の背景

微視的な世界を記述する理論として大きな成功を収めてきた量子力学は、巨視的な世界でも状態の重ね合わせが存在することを予言している。では、物体の位置の重ね合わせ状態はその周りにできる重力場の重ね合わせ状態を意味するのであろうか。一般相対論を考慮に入れると、それは自明ではないことが知られている。量子力学と一般相対論を統一する量子重力理論の完成は物理学における最も重要な課題の一つである。

近年、巨視的な世界での量子力学の検証を目指した実験が活発に行われている。特に、光と機械振動子の結合系を用いて、物体の位置の重ね合わせを実現しようとするオプトメカニクス実験が世界中で行われている(図1)。量子力学の検証をするためには物体の位置測定の精度を、ハイゼンベルグの不確定性関係から決まる標準量子限界(standard quantum limit; SQL)まで到達させる必要がある。これまで、ng スケール以下では標準量子限界到達が実現されており、物体の重心振動モードの基底状態実現に成功している。一方で、プランク質量(約 22 μg)を越える真に巨視的な領域では、物体の機械的支持に伴う熱的な揺らぎの影響が大きく、標準量子限界の到達が達成されていない。

量子力学は質量スケールによらないはずであるが、巨視的な世界で重ね合わせ状態が観測されていないことから、非線形シュレディンガー方程式や重力デコヒーレンスといった様々な非標準的な量子力学が提案されている。古典・量子限界を探るためには幅広い質量スケールで実験的検証を行う必要がある。我々はその中でも、これまであまり実験が行われてこなかった mg スケールに着目し、研究を進めてきた。

これまで mg スケール以上の領域では、鏡を細線で懸架することで振り子を作り、その位置をレーザー光で測定する手法が主流であった。特にアメリカの Advanced LIGO やイタリアの Advanced Virgo といった地上重力波検出器では、40 kg もの鏡を機械的損失が極めて少ない合成石英製のファイバーで懸架することにより、懸架に伴う熱雑音を抑えている。この工夫により、デザイン感度が達成されれば標準量子限界にほぼ到達する。日本の KAGRA ではさらに、量子非破壊計測技術を用いることにより、標準量子限界を超えた感度を実現することが計画されている。こうした高感度な重力波検出器が実現されれば、重力波天文学に寄与するだけでなく、量子力学に大きな知見を与えることが期待される。

mg や g といったスケールでも、重力波検出器と同様な技術を用いて実験が行われてきた。しかし、鏡の質量にあわせて懸架線を細くすることが困難であり、様々な工夫が必要となっている。例えば、標準量子限界の到

達には一般に光共振器を用いて鏡に当たるレーザー光の強度を高める必要があるが、光の輻射圧が鏡を回転させてしまうと光共振器を安定に構成することができなくなってしまう。一方で、この光輻射圧トルクに強くするためにワイヤを太くするか複数のワイヤで懸架すると、鏡の回転方向の共振周波数を上げることができるが、熱雑音が大きくなってしまう。

そこで我々は、鏡を機械的に支持するのではなく、光のみによって支持する光学浮上に着目した。図2に示すように、これまで光学浮上は、光ピンセットの技術を用いて微小球をレーザー光でトラップする手法が主流であり、実現に何例も成功している。しかし、光ピンセットによる物体の支持では、機械的支持をなくすことには成功しているものの、光と物体を十分に結合させることはできない。また、現実的にトラップできる質量もプランク質量に比べると小さいものとなっている。

このような背景のもと、我々はレーザー光を全反射する鏡を、上下2つの光共振器からの光輻射圧のみによって支持する新しい光学浮上方法を提案した。この方法では、支持に用いる光輻射圧の全てを鏡と結合させることができる。レーザー光を全反射する鏡を光学浮上させる方法としては、光ピンセットと光共振器を組み合わせる方法や、三脚型に配置した光共振器からの光の輻射圧で鏡を支えることにより光学浮上を実現する方法が提案されている[G. Guccione *et al.*, Phys. Rev. Lett. 111, 183001 (2013)]が、いずれも実証には至っていない。我々の構成は理論的に可能な中で光共振器の数が最小のシンプルな構成であり、実現可能性が高いと考えている。

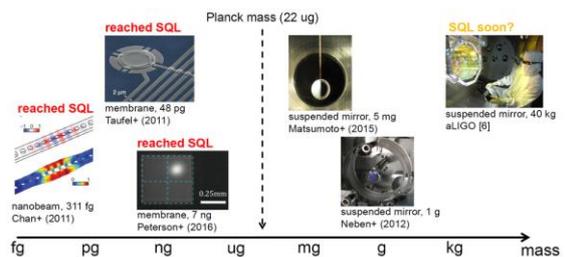


図1: 様々な質量スケールで光-機械結合系実験が行われており、ng スケール以下では標準量子限界の到達が実現されている。

	Arita+	Kiesel+	Li+	Singh+	Guccione+	本研究
浮上物	微小球	微小球	微小球	鏡	鏡	鏡
質量	0.1 ng	10 fg	1 pg	40 ng	0.3 mg	1 mg
手法	光ピンセット	光ピンセット	光ピンセット	光ピンセット +光共振器	3つの 光共振器	2つの 光共振器
実証	○	○	○	x	x	初実証目指す

図2: 光学浮上を実証または提案した先行研究と本研究の比較。

2. 研究の目的

本研究では、巨視的な世界でも量子力学は成立するのかという問いに実験的に答えることを目的として、質量 1 mg の鏡の光学浮上の実現を目指した。光学浮上鏡を2つ用意し、マイケルソン干渉計を構成することで2つの鏡の位置変動に量子力学的な相関を持たせる。位置変動測定における古典雑音が標準量子限界を下回っていれば、2つの鏡の位置がエンタングルメント状態にあることを確認することができる。量子力学が正しいければ持続時間は浮上鏡内部の熱揺らぎに伴うデコヒーレンスで決まる。しかし、もし予想値よりも短い場合は非標準的な量子力学モデルと比較することで、量子力学の検証を行うことができる。

mg スケールでの量子力学の検証は先行研究と比べて突出しており、人間が直接接触することができるスケールでの検証となるため、社会的なインパクトは大きい。これまで検証が困難とされてきた量子測定理論や量子重力理論につながるブレイクスルーとなる。また、光学浮上技術だけをとっても、ジャイロスコープといった高感度センサや長寿命の量子メモリーなど応用面への利用も期待できる。重力波検出器の高感度化のために提案されている量子輻射圧雑音の様々な低減手法や量子非破壊計測の手法を実証する実験的プラットフォームともなる。

以上のように、量子力学の検証と、光学浮上の技術を用いた応用研究の双方を目的として、鏡の光学浮上の世界初実現を目指した。

3. 研究の方法

我々が新提案した光学浮上の構成は、図3に示すように、上下2つの光共振器で浮上鏡をはさむサンドイッチ型の構成である。安定な光学浮上の実現には浮上鏡の全6自由度の安定化が必要となるが、上下2つの光共振器がそれぞれ異なる自由度の安定化に寄与する。下共振器は鏡に働く重力を光輻射圧で支えらるとともに、光ばね効果によって鉛直方向の位置変動をトラップする。光ばねとは、光共振器の共振器長の変化に伴って共振器内の光強度が変化することで生じる復元力である。一方、上共振器は鏡の水平並進運動に対して復元力が働くように鏡の曲率中心の相対位置が調整されており、水平方向の安定化に寄与する。

このようなサンドイッチ構成で浮上させた鏡を図4のように2つ用意し、マイケルソン干渉計を構成する。マイケルソン干渉計の反射光と透過光から、それぞれ2つの鏡の同相変位と差動変位を測定することができる。2つの出力光を時間依存ホモダイン測定し、相関を取ることで浮上鏡の同相変位と差動変位が縁談グルメンと状態にあることを確

認する。この測定を断続的に行うことで、エンタングルメントの持続時間を測定することができる。

位置測定における種々の古典雑音は重力波検出器の精密光計測技術を生かして標準量子限界以下までに低減する。光共振器は真空槽に導入し、残留ガスからの熱雑音を低減する。また、装置全体をゴム足の2段スタック上に組むことで地面振動を防振する。さらに、ULE 共振器を用いた周波数安定化システムと、多段光検出器を用いた強度安定化システムを導入することでレーザー光源由来の雑音を低減する。

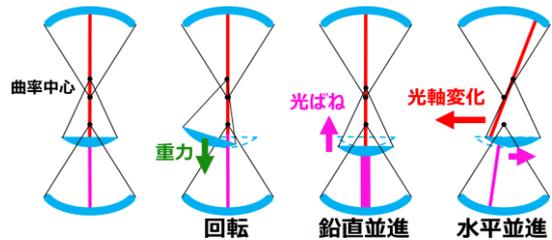


図3: サンドイッチ型光学浮上の安定性。曲率中心周りの回転は重力、鉛直並進は下共振器の光ばね効果、水平並進は上共振器の光軸変化がそれぞれ復元力として働くことで安定な浮上が可能となる。

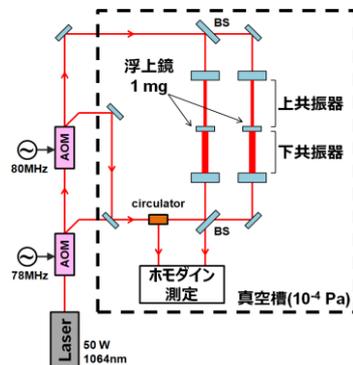


図4: 実験装置の概念図。2つの 1 mg の浮上鏡の位置の間に量子エンタングルメントを実現する。

4. 研究成果

1 mg の鏡の光学浮上を初実現することにより、巨視的エンタングルメントを初実現し、量子力学を検証するという本研究は極めて挑戦的な内容となっている。本研究課題の採用期間中では光学浮上の安定性の力学的な計算と標準量子限界に到達するための詳細なパラメータ設計を行った。これにより、安定な浮上のための条件と標準量子限界到達のための条件の双方を満たすパラメータが存在することを示した。また、安定な光学浮上の実現に必要な復元力の精密測定のためにねじれ振子を開発した。

安定性の力学的な計算に関しては、本研究

課題開始前は図3にあるように全6自由度の復元力を考慮しただけだったが、光軸の回転に伴うダンピングも考慮に入れる必要があることがわかった。図3のように、浮上鏡の水平方向の並進運動があると、上下の光共振器の光軸が変化。このとき、共振器内光強度は下共振器の方が大きく、光軸変化が復元力として働くが、上共振器の方の光軸変化が大きくなるようにすることで、この半復元力を打ち消している。一方で、復元力には反ダンピングが伴い、復元力にはダンピングが伴うため、上共振器で生じる反ダンピングは下共振器のダンピングが打ち消さなければならない。本研究では、適切に上下の共振器内光強度と曲率中心間距離を調節することでこれが可能であることを示した。

また、標準量子限界に到達するための感度設計では、特に鏡の基材や高反射率コーティングのブラウン運動からくる熱雑音を詳細に計算した。これらの熱雑音を小さくするためには、重力波検出器と同様に、鏡の直径に対して厚さを薄くしすぎないこと(アスペクト比3程度以下)やチタンドープをすることで機械損失を下げたタンタラ/シリカコーティングをする必要があることがわかった。

さらに、光共振器への入射光強度を一定にした状態で質量の大きい鏡を浮上させるためには光共振器のフィネスを上げる必要があるが、フィネスを上げすぎると光共振器の線幅が標準量子限界到達周波数を下回ってしまうため、標準量子限界到達が困難になることも判明した。図5は以上を考慮に入れて、入射光強度が上下合わせて17 W、フィネス100という比較的实现性の高いパラメータで感度設計を行ったものである。一方で、浮上鏡の質量は0.2 mgと、鏡の製作面では困難性が高い設計となっている。

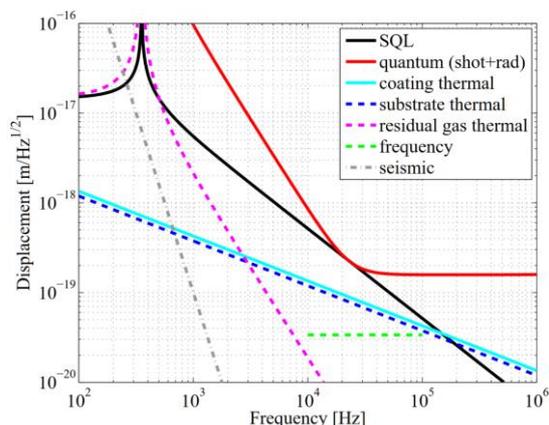


図5: 0.2 mg 鏡の鉛直方向変位換算雑音スペクトル。23 kHz で標準量子限界(SQL)に到達する。[Y. Michimura, Y. Kuwahara *et al.*, Optics Express **25**, 13799 (2017)より]

実験面では、浮上鏡を模擬させた0.5 inch鏡を一端に取り付けたねじれ振り子によって、浮上鏡に働く復元力を測定する装置を開発した(図6)。ねじれ振り子の鉛直軸周りの

共振周波数は約20 mHzと低くなっており、サンドイッチ型の光学浮上に特有な水平方向の復元力を共振周波数の変化として測定することができる。本研究課題の期間中はレーザーアンプの故障などにより十分な光強度を光共振器に往復させることはできなかったものの、ねじれ振り子の共振周波数を±2 mHzという十分高い精度で測定できることを確認した。

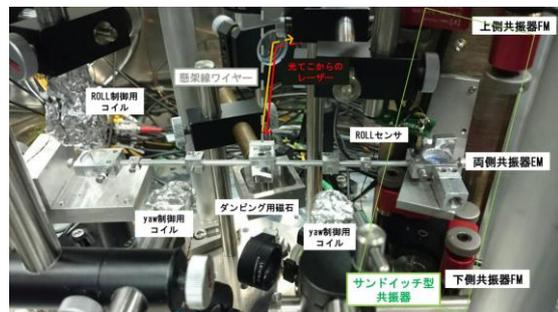


図6: ねじれ振り子を用いた光学浮上の安定性検証装置。ねじれ振り子の共振周波数変化により、水平方向の復元力を測定する。共振周波数測定は光てこを用いて行う。

以上のように、本研究では新提案したサンドイッチ型光学浮上の詳細設計と実際の安定性検証実験の双方を進めることができた。今後もまずは、ねじれ振り子を用いて復元力の精密測定と光学浮上に至る光強度調整手順の詳細な確認を進めていく予定である。その上で、mgスケールの浮上鏡を実際に光学浮上の実現を行い、巨視的量子力学の検証へと展開していく。

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) (全て査読有)
- [1] KAGRA Collaboration (including Yuta Michimura as 83rd of all 227 authors), Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2018, 013F01 (2018) <https://doi.org/10.1093/ptep/ptx180>
- [2] 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)
- [3] Yuta Michimura et al., Mirror actuation design for the interferometer control of the KAGRA gravitational wave telescope,

Classical and Quantum Gravity 34, 225001 (2017)

<https://doi.org/10.1088/1361-6382/aa90e3>

[4] Yuta Michimura, Yuya Kuwahara, Takafumi Ushiba, Nobuyuki Matsumoto, Masaki Ando, *Optical levitation of a mirror for reaching the standard quantum limit*, Optics Express 25, 13799 (2017) <https://doi.org/10.1364/OE.25.013799>

[5] Nobuyuki Matsumoto, Kentaro Komori, Sosuke Ito, Yuta Michimura, Yoichi Aso, *Direct measurement of the optical trap-induced decoherence*, Phys. Rev. A 94, 033822 (2016)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.033822>

[6] Nobuyuki Matsumoto, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Gen Hayase, Yoichi Aso, Kimio Tsubono, *5-mg suspended mirror driven by measurement-induced back-action*, Phys. Rev. A 92, 033825 (2015) <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.033825>

[5](#)

〔学会発表〕(計 27 件)

[1] 道村唯太, 小森健太郎, 榎本雄太郎, 長野晃士, 宗宮健太郎, 灰野禎一, 端山和大, 西澤篤志「第二世代重力波望遠鏡の高感度化」日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月

[2] 小森健太郎, 榎本雄太郎, Ooi Ching Pin, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹「量子輻射圧揺らぎ観測に向けたねじれ振り子光共振器のロック」日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月

[3] 和田祥太郎, 長野晃士, 川崎拓也, 道村唯太, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹「光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(4)」日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月

[4] 川崎拓也, 長野晃士, 和田祥太郎, 道村唯太, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹「光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(5)」日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月

[5] 長野晃士, 和田祥太郎, 川崎拓也, 道村唯太, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹「光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(6)」日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月

[6] Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Ching Pin Ooi, Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Masaki Ando “Towards observation of quantum radiation pressure fluctuation acting on a torsion pendulum” 18th KAGRA face-to-face meeting, December 2017

[7] Takuya Kawasaki, Koji Nagano, Shotaro Wada, Yuta Michimura, Masaki Ando “Research on Optical Levitation of a Mirror” 18th KAGRA face-to-face meeting, December 2017

[8] Yuta Michimura, “Laser Interferometry for Gravitational Wave Astronomy”

International OSA Network of Students Okinawa 2017, October 2017

[9] 長野晃士, 和田祥太郎, 川崎拓也, 道村唯太, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹「光学浮上技術を用いた超精密位置測定装置の開発」第 2 回宇宙素粒子若手の会秋の研究会, 2017 年 10 月

[10] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 苔山圭以子, 廣瀬榮一, 阿久津智忠, 榎本雄太郎, 長野晃士, 小森健太郎, 有富尚紀, 下田智文, 新井宏二, 山本博章「重力波望遠鏡 KAGRA の主干渉計高度化」日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月

[11] 和田祥太郎, 長野晃士, 川崎拓也, 道村唯太, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹「光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(1)」日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月

[12] 川崎拓也, 長野晃士, 和田祥太郎, 道村唯太, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹「光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(2)」日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月

[13] 長野晃士, 和田祥太郎, 川崎拓也, 道村唯太, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹「光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(3)」日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月

[14] 小森健太郎, Ooi Ching Pin, 榎本雄太郎, 松本伸之^{A, B}, 道村唯太, 安東正樹「量子輻射圧揺らぎ観測に向けたねじれ振り子光共振器の構築」日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月

[15] 榎本雄太郎, 長野晃士, 道村唯太, 安東正樹, 古澤明, 川村静児「干渉計型重力波検出器と光学機械相互作用」日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月

[16] 道村唯太, 長野晃士, 和田祥太郎, 川崎拓也, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹「鏡の光学浮上による標準量子限界の到達」日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月

[17] Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer “Suspension thermal noise calculations for KAGRA” 17th KAGRA face-to-face meeting, August 2017

[18] Yuta Michimura, Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Koji Nagano, Kentaro Somiya “Possible KAGRA Upgrades” Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2017, May 2017

[19] Yuta Michimura, Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Koji Nagano, Kentaro Somiya, Sadakazu Haino “Possibility of Upgrading KAGRA” The 3rd KAGRA International Workshop, May 2017

[20] 和田祥太郎, 道村唯太, 桑原祐也, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹「ねじれ振り子を用いた光学浮上の安定性検証(2)」日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月

[21] 小森健太郎, 松本伸之, Ooi Ching Pin, 道村唯太, 安東正樹「ねじれ振り子での量子

輻射圧揺らぎ観測に向けたレーザー光の周波数、強度安定化」日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月

[22]小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹「量子輻射圧揺らぎ観測に向けた低熱雑音ねじれ振り子の開発」日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月

[23]和田祥太郎, 道村唯太, 桑原祐也, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹「ねじれ振り子を用いた光学浮上の安定性検証」日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月

[24]小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹「光学トラップによる懸架鏡の遠隔冷却および熱的デコヒーレンスの低減」日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月

[25]桑原祐也, 道村唯太, 牛場崇文, 安東正樹「光輻射圧による鏡支持法の開発」日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月

[26]桑原祐也, 松本伸之, 牛場崇文, 小森健太郎, 道村唯太, 安東正樹「カーボンナノチューブ線を用いた低損失振り子の開発」日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月

[27]小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹「光バネを用いた懸架鏡の遠隔冷却」日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月

〔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]和田祥太郎「巨視的量子力学の検証に向けた光輻射圧による浮上手法の開発」東京大学修士論文, 2018 年 3 月

[2]桑原祐也「巨視的量子現象の観測に向けた光輻射圧による鏡の支持方法の開発」東京大学修士論文, 2016 年 3 月

[3]小森健太郎「巨視的振動子の遠隔光冷却」東京大学修士論文, 2016 年 3 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

道村 唯太 (MICHIMURA, Yuta)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号 : 80747006