

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18763

研究課題名（和文）光学浮上鏡を用いた巨視的量子力学の検証

研究課題名（英文）Test of Macroscopic Quantum Mechanics 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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：光による輻射圧のみを用いて鏡を支持する、鏡の光学浮上の世界初実現に向けた実験と開発を進めた。ねじれ振り子を用いた原理検証実験を行い、浮上鏡に働く光の復元力の実測に成功した [Takuya Kawasaki et al., Phys. Rev. A 102, 053520 (2021)]。これにより、我々が提案した、浮上鏡を上下2つの光共振器によって挟むというサンドイッチ型の構成によって鏡を安定に浮上させることが可能であることが実験的に示された。また、高反射コーティングの応力やフォトニック結晶技術を利用した新しいアプローチで浮上鏡の製作を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鏡の光学浮上を実現できれば、プランク質量を大幅に上回るミリグラムスケールの鏡を環境から孤立させることが可能となる。こうした鏡を2つ用意し、標準量子限界に到達する感度で位置測定ができれば、2つの鏡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。量子力学は微視的な世界で大きな成功を収めてきたが、重力が支配するような巨視的な領域での量子重ね合わせ状態は実現されていない。巨視的な世界でも量子力学は成立するのか、古典力学と量子力学の境界はあるのか、という素朴な問いに実験的に直接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 worked on experiments and developments for realizing optical levitation of mirrors for the first time in the world. An experiment using a torsion pendulum was conducted to demonstrate the stability of our "sandwich" configuration which supports a mirror with upper and lower cavities. We have successfully measured the optical trapping force and demonstrated that our sandwich configuration is realizable. We have also worked on the fabrication of tiny mirrors with new approaches using a stress in highly reflective coatings or photonic crystal technology.

研究分野：重力・相対論実験

キーワード：光学浮上 光輻射圧 光共振器 レーザー 干渉計 ねじれ振り子 エンタングルメント 巨視的量子現象

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

微視的な世界で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を予言する。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おり、例えば超伝導量子干渉計(SQUID)やボース=アインシュタイン凝縮を用いた実験、高分子の二重スリット実験などでは量子重ね合わせ状態が実現されている。

一方、より巨視的なスケールでは、物体の位置を光によって精密測定することで物体の位置の重ね合わせ状態を確認しようとする、光-機械結合系を用いた実験が世界中で行われている。これまで、ナノグラムスケール以下では位置測定における古典雑音を、不確定性関係で決まる標準量子限界以下まで抑えることに成功しており、物体の重心振動モードの基底状態を実現している。しかし、プランク質量(約 22 ug)を超えるようなさら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は達成されていない(図 1)。

そこで我々は、鏡を機械的に支持するのではなく、光輻射圧のみによって支える独自の手法を用いることで機械的散逸から来る熱的揺動力を排し、標準量子限界の到達を実現することを提案した[Y. Michimura *et al.*, *Optics Express* **25**, 13799 (2017)]。この手法を用いると、ミリグラムスケールの鏡を安定的に浮上させ、標準量子限界に到達することが可能であることを示した。ミリグラムスケールは重力が支配する領域と量子力学が支配する領域の中間に存在するため、近年高い注目を浴びている[Yuta Michimura, Kentaro Komori, *The European Physical Journal D* **74**, 126 (2020)]。

これまでの光学浮上手法は、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ず、質量スケールも 0.1 ng 程度以下と小さい。レーザー光を全反射する鏡を光輻射圧のみによって支持する本研究による光学浮上では光と鏡の結合を最大化することができる。

鏡の光学浮上については、光ピンセットと光共振器を組み合わせる方法[S. Singh *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 213602]や浮上鏡を一端とする 3 つの光共振器を三脚のように配置する方法[G. Guccione *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 183001 (2013)]も提案されているが、その複雑さや鏡の製作の困難さから実証には至っていない。我々が提案した手法は、浮上鏡を一端とする 2 つの光共振器を上下に構成し、浮上鏡を挟むことで光学浮上を実現する手法である。理論的に可能な中で光共振器の数が最小でありシンプルな構成であるため、実現可能性は最も大きいと考えられる。

なお、本研究の研究期間中に 50 ng の有効質量をもつカンチレバーを用いた実験で量子反作用の直接測定が実現され、40 kg 程度の質量を持つ懸架鏡で構成されたレーザー干渉計型重力波望遠鏡 Advanced LIGO と Advanced Virgo でも量子反作用の直接測定が実現された。また、本研究と同様のミリグラムスケールでも懸架鏡を用いた実験が進展し、高い感度が実現されている。一方で、2021 年 5 月現在、鏡の光学浮上の実現は未だに報告されていないことを付記しておく。

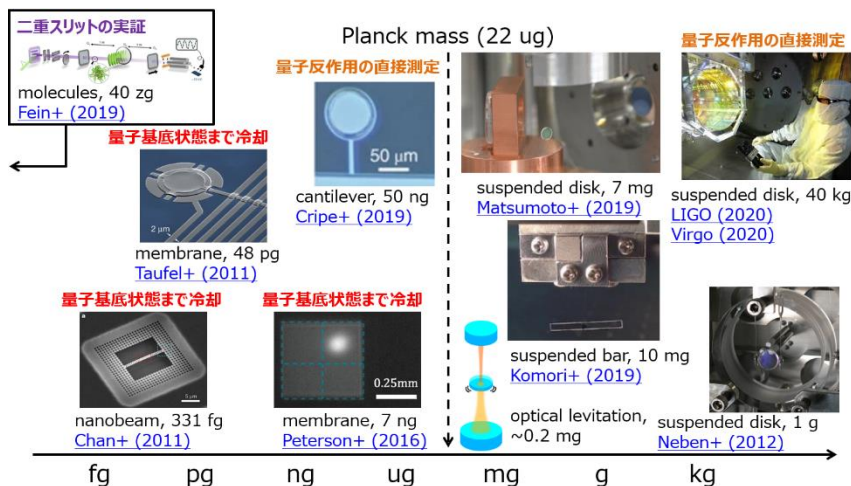


図 1: 様々な質量スケールで光-機械結合系実験が行われている。ng スケール以下では標準量子限界の到達と量子基底状態が実現されているものの、プランク質量を超えた領域では標準量子限界の到達は達成されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、巨視的な世界でも量子力学は成立するのか？ という素朴な問いに実験的に迫ることである。そのために、質量 1 mg の鏡の光学浮上を実現し、鏡を環境から孤立させることを目指す。こうした光学浮上鏡を 2 つ用意し、エンタングルメント状態を実現することで巨視的量子力学を検証する。

ミリグラム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、人間が直接触れ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、高周波重力波検出器や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、巨視的な質量領域での量子力学の検証と、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

我々が新提案した鏡の光学浮上の構成は、図 2 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。

このように、上下 2 つの光共振器で鏡をはさむという独自の構成より、光学浮上を実現する。この浮上鏡を 2 つ用意するが、このとき用いるレーザー光を同一光源から供給することで、2 つの浮上鏡の位置の間に量子力学的な相関を持たせる(図 3)。下共振器 2 つによるマイケルソン干渉計を構成し、その 2 つの出力光から浮上鏡の鉛直並進運動の差動変位と同相変位を測定する。位置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、差動変位と同相変位に相関が生

じる。2つの出力光を時間依存ホモサイン測定し、相関を取ることで浮上鏡の差動変位と同相変位がエンタングルメント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。量子力学が正しければ持続時間は浮上鏡内部の熱揺らぎによって決まるが、もし予想値より短い場合は質量起因の波動関数崩壊モデル(重力デコヒーレンスや CSL)の予言と比較することにより、量子力学と一般相対論を繋ぐモデルの検証を行う。

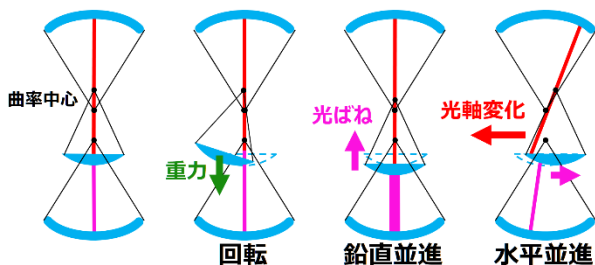


図2: サンドイッチ型光学浮上の安定性。曲率中心周りの回転は重力、鉛直並進は下共振器の光ばね効果、水平並進は上共振器の光軸変化がそれぞれ復元力として働くことで安定な浮上が可能となる。

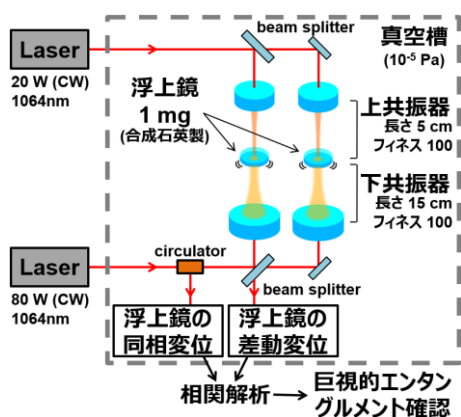


図3: 本研究が目指す実験装置の概念図。2つの浮上鏡を支えるそれぞれの下共振器でマイケルソン干渉計を構成し、その2つの出力光を用いて、浮上鏡の差動変位と同相変位がエンタングルメント状態にあることを確認する。

4. 研究成果

研究期間中には鏡の光学浮上の実現には至らなかったが、これに向けた重要な基礎開発を進めることができた。ねじれ振り子を用いた原理検証実験では、浮上鏡に働く光の復元力の実測に成功し、サンドイッチ型光学浮上の安定性検証に成功した[Takuya Kawasaki *et al.*, Phys. Rev. A **102**, 053520 (2020)]。また、高反射コーティングの応力やフォトニック結晶技術を利用した新しいアプローチで浮上鏡の製作を進めることができた。

原理検証実験では、浮上鏡を模擬した 1/4 インチ鏡を一端に取り付けたねじれ振り子を用いて、浮上鏡に働く光の復元力の測定を行った。回転方向の安定性と、光ばね効果による鉛直方向の安定性はすでに様々な先行研究で実証され、利用されているため、本研究では特に水平並進方向に働く復元力に着目した実験を行った。作製したねじれ振り子は鉛直軸回りのねじれ回転の共振周波数が 32.2 ± 1.1 mHz と小さく、浮上鏡の水平並進方向に働く復元力をねじれ回転の共振周波数変化として測定することができる。水平並進方向の復元力をもたらず上共振器を浮上鏡の上に構成し、入射光強度を変えながら共振周波数を測定することで、光によるばね定数の測定を行った。上共振器に入射するレーザーとしては、波長 1550 nm のものを用いた。

図4(左)は実際に作製したねじれ振り子の写真である。ねじれ回転の慣性モーメントを小さくし、懸架に用いるワイヤーとして直径 40 μm のものを使うことでねじれ回転の共振周波数を小さくしている。また、防振のために中段マスを導入し、2段振り子にすることで振動の影響を抑えた。中段マスは3本のワイヤーで懸架し、周りをネオジウム磁石で囲うことで渦電流ダンピングを働かせ、特に並進方向の防振を図った。ねじれ振り子の共ワイヤー数の測定は、光てこを

用いて行った。光でこに用いたレーザーの波長は 850 nm であり、ねじれ振り子の中心部に取り付けられたアルミ鏡で反射されたレーザー光の位置を位置検出素子(PSD)で測定した。

光によるばね定数の測定結果が図 4(右)である。入射光強度を変え、共振器内光強度を変えていくと、光による正ばねが大きくなっていることが確認できた。また、共振器のフィネスやモードマッチング率、共振器長、鏡の曲率半径などの実測値から期待されるばね定数と無矛盾であることが確認できた。これにより、浮上鏡の水平並進方向に働く光の復元力の実証に成功し、サンドイッチ型光学浮上の安定性検証に成功した。

本研究ではさらに、光学浮上の実現に向けた浮上鏡の製作を進めた。用いる浮上鏡は直径 3 mm 程度、厚さ 0.1 mm 程度と微小であり、なおかつ高反射率で曲率付きでなければならないため、その製作は技術的に困難である。2014 年の試作では、 30 mm 程度の曲率を持つ微小鏡の石英基材の製作には成功したものの、高反射コーティングをつける過程で鏡が割れてしまうという課題があった。そこで本研究では、直径 1 インチ 、厚さ 0.1 mm の石英基材にコーティングすることにより、その応力で鏡に曲率をつけ、その後で直径 3 mm に加工する手法の開発を進めた。また、光共振器を用いてフィネスや横モード間隔を測定することで、鏡の反射率と曲率半径を評価するシステムを開発した。 1 インチ の試作品では、強度反射率 90% 程度、曲率半径 500 mm 程度のものを得ることができ、直径 3 mm への加工にも成功した。今後はより厚いコーティングにより反射率を上げ、曲率半径を小さくすることを目指す。

さらに、穴の大きさを鏡の中心部から周辺部にかけて変化させたフォトニック結晶を製作することにより、高反射率と実効的な曲率を実現する手法の検討も進めた。穴の大きさを変えたいくつかのフォトニック結晶鏡を製作し、 95% 程度の強度反射率が幅広い穴半径の領域で実現できることを確認できた。今後は反射位相を測定し、実効的な曲率をつけるために必要なパラメータの探索とフォトニック結晶の実際の製作を進める予定である。

以上のように、鏡の光学浮上の世界初実現に向けて、安定性検証実験と浮上鏡の製作の双方で着実な開発を進めることができた。今後はまず、浮上鏡の製作方法を改善し、要求値を満たす浮上鏡の開発を行う。浮上鏡が制作でき次第、実際に光学浮上の実現を行い、量子力学の巨視的領域での検証実験を進める。

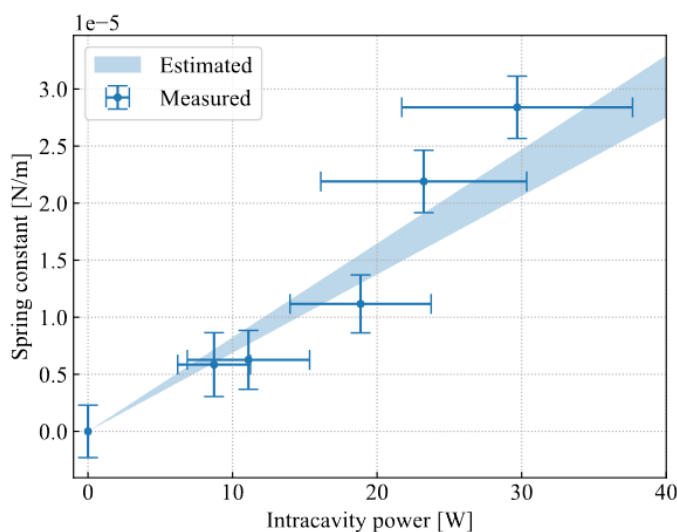
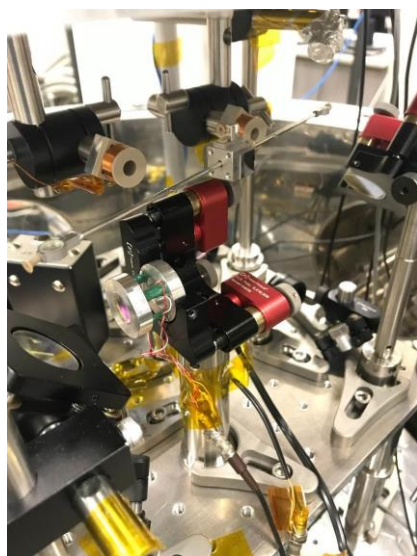


図 4: 光学浮上の安定性検証のために開発したねじれ振り子の写真(左)と測定された光によるばね定数の共振器内光強度依存性(右; Takuya Kawasaki *et al.*, *Phys. Rev. A* **102**, 053520 (2020)より引用)。期待される復元力と同等の復元力を実測することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 30件／うち国際共著 14件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Shoki Iwaguchi, Tomohiro Ishikawa, Masaki Ando, Yuta Michimura, Kentaro Komori, Koji Nagano, Tomotada Akutsu, Mitsuru Musha, Rika Yamada, Izumi Watanabe, Takeo Naito, Taigen Morimoto, Seiji Kawamura	4. 巻 9
2. 論文標題 Quantum Noise in a Fabry-Perot Interferometer Including the Influence of Diffraction Loss of Light	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/galaxies9010009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takuya Kawasaki, Naoki Kita, Koji Nagano, Shotaro Wada, Yuya Kuwahara, Masaki Ando, Yuta Michimura	4. 巻 102
2. 論文標題 Optical trapping of the transversal motion for an optically levitated mirror	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 53520
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physreva.102.053520	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Michimura, Tomohiro Fujita, Soichiro Morisaki, Hiromasa Nakatsuka, Ippei Obata	4. 巻 102
2. 論文標題 Ultralight vector dark matter search with auxiliary length channels of gravitational wave detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 102001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physrevd.102.102001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 KAGRA Collaboration	4. 巻 2020
2. 論文標題 Overview of KAGRA: Detector design and construction history	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 ptaa125
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa125	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuta Michimura et al.	4. 巻 102
2. 論文標題 Prospects for improving the sensitivity of the cryogenic gravitational wave detector KAGRA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 22008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.102.022008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuta Michimura, Kentaro Komori	4. 巻 74
2. 論文標題 Quantum sensing with milligram scale optomechanical systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/e2020-10185-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Rika Yamada, Yutaro Enomoto, Atsushi Nishizawa, Koji Nagano, Sachiko Kuroyanagi, Keiko Kokeyama, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Takeo Naito, Izumi Watanabe, Taigen Morimoto, Masaki Ando, Akira Furusawa, Seiji Kawamura	4. 巻 384
2. 論文標題 Optimization of quantum noise by completing the square of multiple interferometer outputs in quantum locking for gravitational wave detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 126626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2020.126626	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Komori Kentaro, Enomoto Yutaro, Ooi Ching Pin, Miyazaki Yuki, Matsumoto Nobuyuki, Sudhir Vivashek, Michimura Yuta, Ando Masaki	4. 巻 101
2. 論文標題 Attonewton-meter torque sensing with a macroscopic optomechanical torsion pendulum	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 11802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.011802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer	4. 巻 97
2. 論文標題 Direct approach for the fluctuation-dissipation theorem under nonequilibrium steady-state conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 102001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.102001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tomofumi Shimoda, Naoki Aritomi, Ayaka Shoda, Yuta Michimura, Masaki Ando	4. 巻 97
2. 論文標題 Seismic cross-coupling noise in torsion pendulums	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 104003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.104003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, Masaki Ando	4. 巻 97
2. 論文標題 Particle swarm optimization of the sensitivity of a cryogenic gravitational wave detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 122003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.122003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobuyuki Matsumoto, Seth B. Catafo-Lopez, Masakazu Sugawara, Seiya Suzuki, Naofumi Abe, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Keiichi Edamatsu	4. 巻 122
2. 論文標題 Demonstration of Displacement Sensing of a mg-Scale Pendulum for mm- and mg-Scale Gravity Measurements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 "071101"
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.071101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計45件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 20件）

1. 発表者名 Yuta Michimura
2. 発表標題 Levitating Optomechanics: Optical Levitation
3. 学会等名 LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration Meeting March 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 道村唯太, 川崎拓也, 長野晃士, 松本伸之, 小幡一平, 藤田智弘, 森崎宗一郎, 中塚洋佑
2. 発表標題 レーザー干渉計型重力波検出器による超軽量ダークマター探索
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Kawasaki
2. 発表標題 Quantum radiation pressure fluctuation in a linear optical cavity
3. 学会等名 The 3rd International Forum on Quantum Metrology and Sensing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川崎拓也, 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
2. 発表標題 光共振器における古典強度雑音を用いた反作用雑音低減の実証II
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Michimura
2. 発表標題 Laser Interferometry for Gravitational Wave Observations
3. 学会等名 TianQin Summer School on Gravitational Waves 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Michimura
2. 発表標題 Laser Interferometric Search for Non-Standard Physics
3. 学会等名 The First School on Quantum Sensors for Fundamental Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Michimura
2. 発表標題 Recent news from the optical levitation experiment
3. 学会等名 The 2nd QFilter Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 道村唯太
2. 発表標題 重力波観測と量子技術
3. 学会等名 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「宇宙量子エレクトロニクス」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 喜多直紀, 川崎拓也, 長野晃士, 牛場崇文, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹
2. 発表標題 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(11)
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川崎拓也, 小森健太郎, 榎本雄太郎, Ooi Ching Pin, 宮崎祐樹, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹
2. 発表標題 線形光共振器による量子輻射圧ゆらぎの観測実験
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川崎拓也, 小森健太郎, 榎本雄太郎, Ooi Ching Pin, 宮崎祐樹, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹
2. 発表標題 光共振器における古典強度雑音を用いた反作用雑音低減の実証
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 喜多直紀, 川崎拓也, 長野晃士, 牛場崇文, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹
2. 発表標題 光輻射圧による鏡の光学浮上法の安定性検証
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Michimura
2. 発表標題 Optical Levitation of a Mirror for Realizing Macroscopic Entanglement
3. 学会等名 The 1st QFilter Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 道村唯太
2. 発表標題 レーザー干渉計による精密距離計測
3. 学会等名 第三回 若手による重力・宇宙論研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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変位雑音評価
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 喜多直紀, 川崎拓也, 長野晃士, 牛場崇文, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹
2. 発表標題 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(7)
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川崎拓也, 喜多直紀, 長野晃士, 牛場崇文, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹
2. 発表標題 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(8)
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本伸之, Seth B. Catano-Lopez, 金井天馬, 菅原大和, 鈴木聖也, 阿部尚文, 小森健太郎, 道村唯太, 麻生洋一, 枝松圭一
2. 発表標題 冷却機械振動子を用いた重力センサーの開発
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川崎拓也, 喜多直紀, 長野晃士, 牛場崇文, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹
2. 発表標題 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(9)
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 喜多直紀, 川崎拓也, 長野晃士, 牛場崇文, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹
2. 発表標題 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発(10)
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小森健太郎, 榎本雄太郎, Ooi ChingPin, 宮崎祐樹, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹
2. 発表標題 ねじれ振り子を用いた量子輻射圧揺らぎの観測
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 道村唯太 (パリティ編集委員会、大槻 義彦)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 166
3. 書名 「低温レーザー干渉計で地下から重力波をとらえる - 大型低温重力波望遠鏡KAGRAの挑戦 - 」 『物理科学, この1年 2020』	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Yuta Michimura http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/michimura/ 微小な重力の測定を可能とする小型低雑音重力センサーを開発 https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/info/6267/</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------