

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13855

研究課題名(和文)光機械結合系振動子を用いた巨視的量子状態の観測

研究課題名(英文)Observation of Macroscopic Quantum Behavior Using Opt-Mechanical System

研究代表者

安東 正樹(Ando, Masaki)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：90313197

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、巨視的物体の量子力学的性質を解き明かすことを目的とし、小型の光-機械結合を実現してその変動を精密計測することを目指していた。研究の結果、長さ15mm程度の棒状鏡をねじれ振子として懸架した小型振動子を用いて、光-機械結合系の実現に成功した。棒状鏡の両端でそれぞれファブリ・ペロー光共振器を構成して、それを安定な制御状態に保った。さらにそれらの差動変動を観測することで、振動子の回轉變動スペクトルを測定した。熱雑音や光量子雑音という原理的雑音には2桁程度及ばない測定結果であったが、このような小型な系で光-機械結合系を実現するという重要な結果を得ることができた。

研究成果の概要(英文): The purpose of this research is to investigate quantum behavior of macroscopic objects. For it, we developed a small opt-mechanical oscillator comprised of a 15-mm scale bar-type mirror and Fabry-Perot cavities at the both edges of the mirror. We successfully operated the cavities stably, and obtained the first results of fluctuation spectrum. The fluctuation was larger than the fundamental limitations, such as optical quantum noise and thermal noise, by about 2-orders. However, we have made a significant step to realize this small-scale opt-mechanical system.

研究分野：重力波物理学

キーワード：量子的性質 巨視的物体 冷却 振動子

1. 研究開始当初の背景

本研究の目的は、巨視的な物体の量子的性質を実験的に観測することである。原子・分子といった微視的なスケールの現象は量子力学を用いて良く記述できる一方で、「シュレーディンガーの猫」のような巨視的なスケールにおいては、量子的な性質は失われている。巨視系で量子現象が見られない原因が、量子論そのものにあるのか、もしくは熱揺らぎなどの外乱要因によって量子的性質が失われるのかは、物理学における大きな疑問となっており、実験的な検証が望まれている。

このような、量子世界から巨視的古典世界へのつながりを研究することで、量子デコヒーレンス(量子性が失われること)における熱・重力の役割や、粒子数の増加に伴う状態の局在化といった量子論の本質に迫ることが期待できる。また、重力波望遠鏡などの微小変動計測で必要とされる、光スクイーミングや光-機械結合を用いた量子非破壊測定といった感度向上のための手法、さらには、振動子-量子ビットの結合を用いた量子メモリの実現といった応用など、幅広いインパクトが期待できる。

このような背景のもと、世界のいくつかの研究機関で巨視的物体の量子的性質の研究が行われている(図1)。これらは、微小な機械振動子を用いて光共振器を構成し、通常の冷却手法と光-機械結合を利用したレーザー冷却を併用することで、熱フォノンの時間平均数を1以下に抑えよう、というものである。既に、nmから $\mu\text{m}$ のスケールにおいては、このような基底状態が達成されており、量子的性質の観測や、量子ビットと振動子モードの結合などが実現されている。また、30cm程度のスケールの振動子を200フォノン以内にまで冷却した例も報告されている。一方、当研究室では、振り子によって懸架された直径4mm、質量5mgの鏡を用いて光-機械結合系の研究を進めていた。光ばねの効果を利用して振動子の周波数100Hz以上という強い光-機械結合系を構成し、光が光子の集合であることに起因する量子輻射圧変動を直接測定することに成功している。これは、目に見える

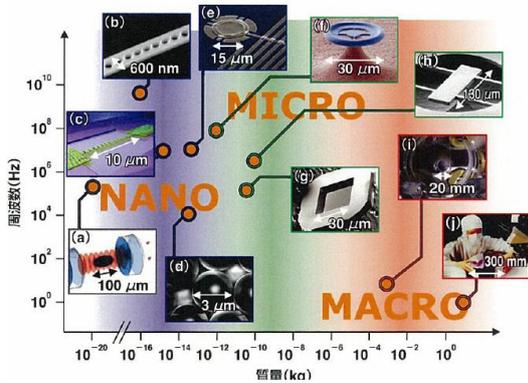


図1: 世界の量子オプトメカニクス研究

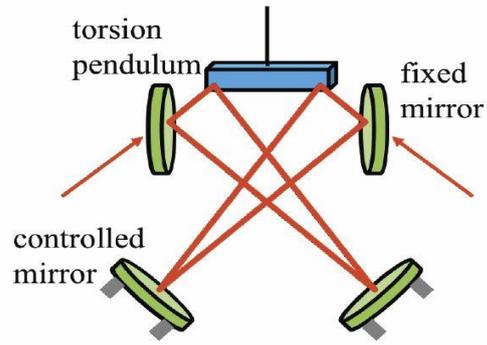


図2: ねじれ振り子を用いた光-機械結合系

程度の大きさの実験としては世界的にも突出した研究成果である。ただ、この研究では、常温下で測定を行っていることから、量子効果の精密測定においては、熱雑音によって信号-雑音比が制限されている。一方、当研究室では、新しい方式の重力波望遠鏡である低温ねじれ振り子装置の開発も進めている。この研究では、4Kにまで冷却できるクライオスタット設備を整備し、冷凍機の振動や地面振動の影響を抑圧する受動防振装置・能動防振装置の開発、レーザー干渉計を用いたねじれ振り子の精密変動計測の研究を進めた。

2. 研究の目的

上記の研究背景のもと、本研究では、これまでの研究の経験・成果と既存の設備を組み合わせることを着想とし、光-機械結合系をクライオスタット内に構築し、通常の冷却とレーザー冷却を併用することで、基底状態に近い状態(10フォノン以下)を実現することを目指す。本研究の成果は、ほとんど例がない大きさをもつ巨視的物体の量子状態の実験的観測としての重要な意義を持つと同時に、量子デバイスといった幅広い応用研究の先駆けとなるものである。

本研究は、cmスケールでの振動子基底状態の実現を目指す、独自の挑戦的な研究となっている。これが達成されれば、世界でこれまで行われている巨視的量子効果観測研究の中でも最大スケールでの研究となる。本研究では、その目標達成のための技術的手法の面でも、従来行われてきているレーザー冷却技術に加え、低振動型冷凍機の使用、能動防振装置の使用、ねじれ型振動子の使用といった特徴を備えている。

先行研究で行われているようなnmから $\mu\text{m}$ スケールでの測定では、振動子の共振周波数はMHzからGHzなどと十分に高く、低周波数で大きな振幅を持つ冷凍機の振動や地面振動の影響を避けることは、さほど困難とはならない。その一方で本研究のようにcmスケール以上の振動子を用いる場合、数Hzから数百Hz程度の地面振動などの外来振動が測定に対して致命的な影響を与えることになる。そこで、本研究では、低振動型の冷凍機

を用いるとともに、能動防振装置を用い、10Hz以下の外来振動を抑圧する。これらの技術は、低温重力波望遠鏡に用いるために当研究室で開発を進めてきたものを当本研究に応用したものであり、独自の技術の積み上げがされてきている。本研究では、能動防振と振り子を用いた受動防振を組み合わせることで、低周波数帯で1桁程度、100Hz付近の周波数帯で6桁程度の防振効果を持たせる計画である。

### 3. 研究の方法

本研究では長さ15mmの微小な棒状鏡で懸架することでねじれ振り子を構成し、その回転の振動モードを測定対象とする。鏡の両端で、それぞれファブリ・ペロー共振器を構成し、その差動変動を測定することで、棒状鏡の差動変動を読み取る(図2)。この共振器のフィネスは、1,000程度である。この値は、当研究室で進めている小型鏡を用いた実験で実現されている値を採用している。レーザー光源としては出力400mWのものを使用し、入射系の光損失を考慮して、光共振器内光量は、100Wを目標とする。共振器内に高光量を蓄えることによって光ばねを実現し、振動子の共振周波数を100Hz程度にまで上昇させる。また、複数光による光ばねを組み合わせることで(ダブル・オプティカル・スプリング)、共振周波数での測定を容易にする。この構成で、量子的輻射圧変動の大きさは、共振周波数での変動量は $10^{-11}$  m/Hz<sup>1/2</sup>程度と見積もることができる。振動子の機械的Q値を $10^6$ 、マクロな温度4Kの場合、熱雑音の影響は、この1/100程度と見積もることができ、高い信号-雑音比での量子的輻射圧変動の効果を測定することが可能になる。これらの構成は、当研究室で行われている量子輻射圧の測定実験に対して振動子構成を変更し、入射光量と共振器内パワーを増大させることで、信号強度を高めたもので、十分達成可能である。

本研究で目標としている $10^{-11}$  m/Hz<sup>1/2</sup>程度の変動量測定は、既存の常温での干渉計技術では十分に測定可能な値である一方で、それを低温で実現するためには、他の雑音要因を十分に考慮した装置設計が重要である。

振動子は、支持系のリコイルによる機械的損失を避けるために中心からワイヤで支持される構成になっている。これらは、振動子を冷却するためのヒートリンクとしての役割も果たす。この振動子とワイヤ支持系を一体化したフレームは、クライオスタット内に設置され、4Kの低温に冷却される。フレームを固定する部分は、上部の常温・大気中に設置された能動防振装置から懸架支持されており、地面振動や冷凍機に起因する振動の影響を避ける構成になっている。この能動防振装置は、ヘキサポッドと呼ばれる構成になっており、高感度加速度計で測定した変動を、支持脚部分に埋めこまれた6本のPZTにフィ

ードバックすることで、全自由度の外乱変動を1-10Hzの周波数帯で約1桁抑圧するものである。この能動防振装置は、本研究室で開発が進められている既存の装置を利用する。現在までに、1自由度で所期の振動抑圧性能が達成されており、全自由度での振動抑圧に関して技術的問題はクリアされている。この能動防振装置は、測定周波数帯より低周波数帯での振動を抑圧し、長時間の安定動作を実現するために、重要な要素となる。

振動子を収める真空・冷凍装置も大部分は既存の研究設備を利用する。真空槽は直径60cmの横向き円筒形をしており、ターボポンプによって、 $10^{-6}$ Pa程度の真空度まで到達可能である。その内面には熱輻射シールドが設置されており、4Kまでの低温を実現することが可能である。冷凍機としては、パルスチューブ冷凍機に防振機構を追加した低振動型冷凍機を使用する。この構成は、低温大型重力波望遠鏡KAGRAで使用されるものと同等の仕組みを持ったものであり、冷却特性・振動特性などが十分に評価された実績をもつ構成である。さらに、この真空クライオスタットは、外部の音響雑音・磁場変動雑音の影響を避けるための防音磁気シールドボックス内に収められる。

### 4. 研究成果

本研究の結果、巨視的な系の量子的振る舞いに迫る研究を進めることができた。本研究期間内に目標感度を達成することはできなかったが、微小鏡を用いた光-機械結合系の安定な実現とその特性評価、さらに変動スペ

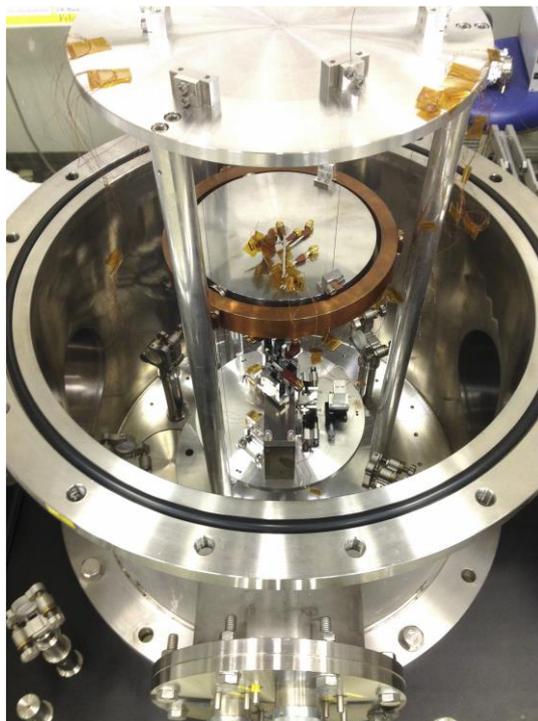


図4: ねじれ振り子装置の概観。微小鏡は防振系によって懸架され、それらは真空槽内に収められている。

クトルの測定を達成した。以下、それらについて説明する。

#### (1) 微小鏡による光-機械結合系の実現

長さ 15mm, 質量 10mg の棒状微小鏡を製作し, それを 1 本のワイヤで懸架することで, 微小なねじれ振り子型振動子を構成した(図 3)。さらに, この鏡の両端でそれぞれファブリ・ペロー共振器を構成し, それらの動作状態を実現した。棒状鏡が微小であり, かつ柔らかい振り子で懸架されていることから, 光学系の初期アラインメントや共振器動作状態への引き込みは容易ではなかったが, 防振系へのダンピングの工夫や光学素子の再設計などで安定な動作状態を実現できたのは大きな成果であった。

この光-結合系の特性評価も行った。2つの共振器のフィネスはそれぞれ 1,900, 2,600, 共振器長 9.4cm という結果が得られた。また, 光共振器による光ばねは 300Hz 程度, 共振器内光パワー数 W 程度も実現されている。これらはおおむね設計通りの値であった。さらに 2 つの共振器変動信号の差をとることで棒状鏡の回転に相当する差動変動を測定した。その結果,  $10^{-15} \text{m/Hz}^{1/2}$  程度という結果が得られた。これは, 目標とする光輻射圧雑音・熱雑音のレベルに 2 桁程度及ばない値であった。しかし, このような測定が可能になったことは大きなマイルストーンである。雑音源の特定も進められており, 今後のさらなる感度向上も期待できる。

#### (2) 冷却系の整備

ねじれ振り子のマクロな温度を低減し, 熱雑音を下げるために, 本実験は最終的には 4K 程度の低温下で測定を行うことを目指している。そこで, 本研究室の冷却装置の再整備を行った。低雑音パルス管冷凍機の補修と, 真空・クライオスタットの再整備を行い, 冷却試験を行った。その結果, 4K の低温まで冷却できることを確認した。さらに, その中に収める懸架系の熱設計とシミュレーション計算を進め, 1 か月程度の期間で冷却可能との結果を得ている。

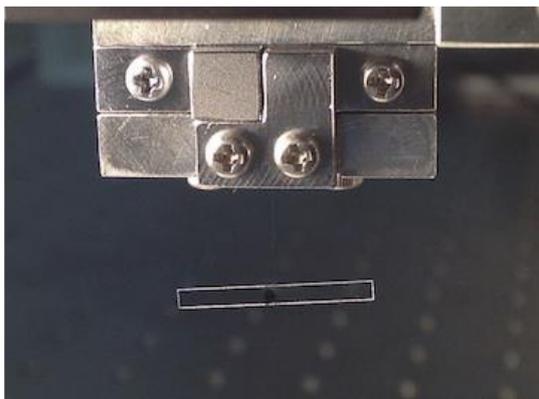


図 3: 懸架された長さ 15mm の棒状鏡

#### 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 3 件) (すべて査読有り)

[1] 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>

[2] 安東正樹: 重力波望遠鏡の極限光計測技術, フォトニクスニュース 第 3 巻 第 1 号, p. 7-10 (2017 年).

[3] N. Matsumoto, K. Komori, S. Ito, Y. Michimura, Y. Aso: Direct measurement of optical-trap-induced decoherence, Phys. Rev. A, 94, 033822 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.033822>

[学会発表] (計 18 件)

[1] 安東正樹: 重力波観測における光計測技術, 日本物理学会 第 73 回年会 シンポジウム (2018 年 3 月 22 日, 東京理科大学).

[2] 小森健太郎, 他: 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, 東京理科大学).

[3] Ching Pin Ooi, 他: Investigation of mechanical loss in torsion pendulums (2), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018 年 3 月, 東京理科大学).

[4] 長野晃士, 他: 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, 東京理科大学).

[5] 川崎拓也, 他: 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, 東京理科大学).

[6] 和田祥太郎, 他: 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, 東京理科大学).

[7] K. Komori, et al.: Towards observation of quantum radiation pressure fluctuation acting on a torsion pendulum, 18th KAGRA face-to-face meeting (Dec. 2017, Tokyo Institute of Technology).

[8] Ching Pin Ooi, et al.: Investigation

of mechanical loss in torsion pendulums, 18th KAGRA Face to Face Meeting (Dec 2017, Tokyo Institute of Technology).

[9] 長野晃士, 他: 光学浮上技術を用いた超精密位置測定装置の開発, 宇宙素粒子若手の会 第2回秋の研究会 (2017年10月, 東京大学).

[10] 榎本雄太郎, 他: 干渉計型重力波検出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, 宇都宮大学).

[11] 小森健太郎, 他: 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, 宇都宮大学).

[12] Ching Pin Ooi, 他: Investigation of mechanical loss in torsion pendulums, 日本物理学会 2017年 秋季大会 (2017年9月, 宇都宮大学).

[13] 長野晃士, 他: 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, 宇都宮大学).

[14] 川崎拓也, 他: 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, 宇都宮大学).

[15] 和田祥太郎, 他: 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, 宇都宮大学).

[16] 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19日, 大阪大学, 吹田市(大阪府)).

[17] 道村唯太, 他: 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 秋季大会 (2017年9月, 岩手大学).

[18] 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21日, 東北学院大学, 仙台市(宮城県)).

[図書] (計 3件)

[1] ピエール・ビネトリュイ (著), 安東正樹 (監訳), 岡田好恵 (翻訳): 重力波で見える宇宙のはじまり, 講談社ブルーバックス (2017) 354頁.

[2] 安東正樹: 重力波とはなにか, 講談社ブルーバックス (2016) 327頁.

[3] N. Matsumoto: Classical Pendulum Feels Quantum Back-Action, Springer Japan (2016年, ISBN:978-4-431-55882-8)

[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).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安東 正樹 (ANDO, Masaki)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号: 90313197

### (4) 研究協力者

松本 伸之 (MATSUMOTO, Nobuyuki)  
小森 健太郎 (KOMORI, Kentaro)  
道村 唯太 (MICHIMURA, Yuta)  
榎本雄太郎 (ENOMOTO, Yutarō)  
長野晃士 (NAGANO, Koji)  
和田祥太郎 (WADA, Shotaro)  
Ooi Ching Pin  
川崎拓也 (KAWASAKI, Takuya)