

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26600110

研究課題名(和文)低温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 state using cryogenic oscillator

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、巨視的な物体の量子的性質を実験的に観測することを目的としている。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。この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、量子論の本質に迫ることが期待できる。

本研究の結果、懸架された微小鏡にアクチュエータを取り付けることなく制御・冷却する遠隔冷却法の考案と実証、微小ねじれ振り子を用いた巨視的量子測定の実験セットアップの設計と製作を進めることができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to investigate quantum behavior in a macroscopic scale. In a microscopic scale, like a scale of atom or molecule, quantum mechanics can be used to describe physics. In the other hand, it is not valid in a macroscopic scale any more. The transition from micro to macro may be a key issue for expansion of quantum mechanics.

As a result of this research, we made achievements in two topics. One is a development of a remote cooling scheme. In a small mirror, we cannot attach an actuator on it. So we actuate the mirror by optical spring (radiation pressure) of a laser beam. Another achievement is detailed design of experimental setup for direct measurement of quantum radiation pressure noise of a laser beam, using a small torsion pendulum. We already started the assembly of the setup.

研究分野：重力波物理学

キーワード：量子雑音

1. 研究開始当初の背景

本研究では、巨視的な物体の量子的性質を実験的に観測することを目的としている。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。この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が必要とされる、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 μm 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る。これまでに、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[2]。これは、目に見える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となっている。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ている。

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

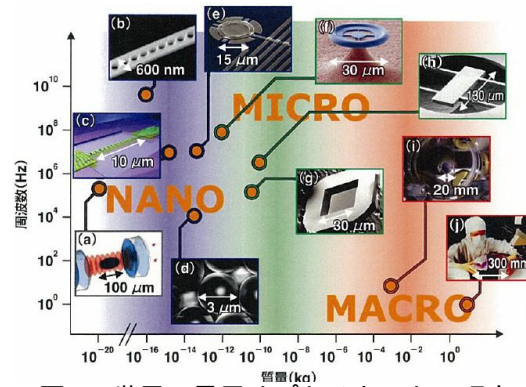


図 1 : 世界の量子オプトメカニクス研究

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 μm 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によって、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予定である。これらの値は、当研究室で既に達成されている値であり、実現性は十分に高い。

3. 研究の方法

本研究では 2 つの長さ 3cm の試験質量棒で構成されたねじれ振り子を構成し、それらの差動回転が測定対象とする振動モードになる。これらの試験質量には直径 4mm 程度の微小鏡が取り付けられており、それらの間でフ

ァプリ・ペロー共振器を構成することで、試験質量の差動変動を読み取る。この共振器のフィネスは、1,000 程度を想定している。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^{1/2} 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^{1/2} 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振動モードの不動点から上下のワイヤー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ー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、基礎的な実験と検討を積み重ね、非常に有望な実験セットアップの設計をすることができた。また、その実験の準備も進めている。以下、それらについて説明する。

(1) 遠隔冷却法の手法の考案と実証

我々が測定対象とするのは巨視的といっても数 mg 程度の質量をもった微小な鏡などである。この鏡は細線で懸架されている。その懸架鏡を振り子モードを基底状態まで冷却する手法の原理検証を行った。

共振周波数の低い懸架鏡においては、基底状態まで冷却するにはフィードバック冷却が必要となるが、mg スケールの鏡にアクチュエータを取り付けることは困難である。そこで、三角光共振器を構成する別の大きな鏡にアクチュエータを取り付け、この大きな鏡と mg 鏡を光ばねで束縛することで、光ばねを介し遠隔的に mg 鏡を冷却する手法を用いた。これにより、振り子モードの実効温度を 15mK にまで冷却することに成功した。また、基底状態まで冷却された場合にその基底状態を保つ周期数を実測し、懸架鏡の共振周波数 2.14Hz を光ばねで 1.06kHz まで上昇させた効果で、周期数を 10^{-11} 程度から 10^{-7} 程度にまで 4 桁改善することにも成功した。

(2) 微小ねじれ振り子を用いた巨視的量子現象の検証実験の考察

懸架鏡の振り子モードよりもねじれモードの方が、共振周波数が低くて熱雑音が小さく、基底状態冷却に有利であることを見出した。さらに、様々な共振周波数をもつねじれ振り子の Q 値を実測し、その Q 値が一定であることから、高周波で熱雑音が小さくなるストラクチャ・ダンピングのモデルに従っていることを確認した。そして、基底状態冷却の必要条件であるレーザー光の量子輻射圧揺らぎ観測に向けて、ねじれ振り子の両端で三角共振器を構築するセットアップを考案し、様々な雑音の見積もりを行った。

ねじれモードを読み出すため両腕で光共振器を組みその差動信号を得るが、この構成

はレーザー光の古典的な雑音が同相雑音除去される点でも優れている。結果として、すでに達成されているパラメータを用いて、1桁以上の広い周波数帯で量子輻射圧揺らぎが支配的になるような設計に成功した。

一方で、同相雑音除去の効果で要求値が緩和されるとはいえ、レーザー光の周波数および強度の安定化は必要である。そこで周波数安定化のための参照共振器や強度安定化用のフォトディテクターを乗せたプラットフォームを組み上げ、真空装置内で懸架し、周波数雑音、古典強度雑音の評価を行った。結果として、それぞれ要求値を満たす安定度を実現した。

今後は、ねじれ振り子共振器の組み立てに取り組み、両腕の共振器ロック、量子輻射圧揺らぎ観測に挑戦する予定である。

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 4 件) (すべて査読有り)

[1] 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>

[2] N. Matsumoto, K. Komori, Y. Michimura, G. Hayase, Y. Aso, K. Tsubono: 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced backaction, *Phys. Rev. A*, 92, 033825 (2015). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.033825>

[3] S. ドワイヤー, 安東正樹 (訳): 量子雑音のスケーリング, パリティ (丸善出版) 2015年8月号.

[4] Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Kimio Tsubono: Optically trapped mirror for reaching the standard quantum limit, *Opt. Express* 22, 12915 (2014). <https://doi.org/10.1364/OE.22.012915>

[学会発表](計 6 件)

[1] 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)).

[2] 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)).

[3] 小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹: 光ばね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28日, 大阪市立大学, 大阪市(大阪府)).

[4] Nobuyuki Matsumoto: Development of the 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced back-action, Workshop on Hierarchy of Quantum Mechanics (Feb. 25, 2015, Okazaki Conference Center, Okazaki (Aichi)).

[5] Nobuyuki Matsumoto, Kentaro Komori: Development of 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced back-action, Workshop on Hierarchy of Quantum Mechanics (February 23rd, 2015, Institute for Molecular Science, Okazaki (Aichi)).

[6] 小森健太郎, 松本伸之: 重力デコヒーレンス検証に向けた量子輻射圧揺らぎで駆動される巨視的振り子の開発, 日本物理学会第70回年次大会 (2015年3月21日, 早稲田大学, 新宿区(東京都)).

[図書](計 2 件)

[1] 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.

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

[その他]

[1] 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

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 雄太 (MICHIMURA, Yuta)