

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05444

研究課題名(和文) 巨視的懸架鏡の基底状態実現と空間量子化の実験的検証

研究課題名(英文) Cooling of a massive pendulum to its ground state for test of generalized uncertainty principle

研究代表者

松本 伸之 (MATSUMOTO, Nobuyuki)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：30750294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：mgスケールの懸架鏡の重心振動モードをフィードバックにより基底状態まで冷却することを目指し、高精度な変位測定系(光共振器)の開発を行った。機械振動子と光が結合した機械光学系における測定精度は振動子の質量でスケールされ、その限界は標準量子限界と呼ばれる。本研究では、標準量子限界まで50倍程度まで迫る精度を実現した。将来的に、基底状態を実現した重い振動子とパルス光を結合することで空間の最小単位を検証できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：We developed an optical triangular cavity with a suspended mg-scale mirror for cooling the mirror's center-of-mass motion to its ground state. As a result, our system operates within a factor of 50 of the free-mass standard quantum limit, providing a displacement sensitivity of $5e-17 \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ kHz}$. It may be possible to test a minimal length scale by interacting a pulse of light with such a massive oscillator prepared in its motional ground state.

研究分野：オプトメカニクス

キーワード：フィードバック冷却 オプトメカニクス 変位計測 重力波 量子重力

1. 研究開始当初の背景

基底状態にある機械振動子とパルス光を、機械振動子の振動周期の間に4回相互作用させた後、パルス光をホモダイン測定すると振動子の位置と運動量の交換関係に比例した信号が取得可能である。よって、プランク質量(約 22 ug)程度の振動子をパルス光と相互作用させることでハイゼンベルクの不確定性関係をプランクスケールで検証可能となる。相対論を考慮に入れた場合、プランク長より小さなスケールは物理的に存在しないため、不確定性関係が修正されることが予想される。そのため、不確定性関係の検証から、空間の最小単位が間接的に検証可能である。このような研究成果が、2012年にオーストラリアのグループから報告された(Nature Physics 8, 393-397 (2012))。しかし、当時(現在も)基底状態を実現した最も重い振動子は数 10 ng 程度である。

2. 研究の目的

mg 程度の懸架鏡の重心振動の基底状態を実現することで、空間最小単位の検証を実現することが本研究の究極的な目的である。

3. 研究の方法

機械振動子の振動モードを冷却するため、振動子のゼロ点振動程度の分解能を有する変位測定系(振動子を一端とした光共振器。レーザー光の波長は 1064 nm)を開発する。精密に測定された変位情報を適切にフィルター処理した後、機械振動子にフィードバックすることで振動モードの運動エネルギーを低減し実効温度を低減する。分解能がゼロ点振幅程度に到達すれば基底状態が実現可能である。しかし、変位測定系の精度向上は機械振動子の質量スケール・種類に拘わらず困難なため、これまでフィードバック冷却で基底状態を実現した系は存在しない。

質量の大きな機械振動子を用いて上記のような精密測定を実現するため、重力波検出器で培われた技術と申請者が提案した手法を利用する。重力波分野で培われた主な技術は、(1)重力によって機械的な Q 値を容易に向上可能(重力希薄化)な懸架鏡の利用(Phys. Rev. D 42, 8 (1990))、(2)レーザー光源の極限的な安定化、(3)多段防振装置の開発、(4)all in-vacuum な装置開発による測定精度の向上、などである。申請者の提案した主な手法は、従来の線形光共振器(2枚の合わせ鏡)に内在する光反ばね効果による不安定性(Siddels-Sigg 不安定性)を解消するため、共振器配置を三角形に変更することで生じる光反ばね効果によって系を安定化することである(opt. express 22, 12915-12923 (2014))。複数あるいは太いワイヤで懸架することで、反ばね効果に対して影響を受けにくい装置を開発した場合、重力希薄化の効果が低減するため(揺動散逸定理により与えられる)熱的な揺動力が増大してしまう。三角

共振器を利用した場合、重力希薄化(熱的揺動力の低減)と系の安定化を両立可能である。

変位測定系の精度は原理的にはレーザー光量で決まる量子雑音(最適な値を標準量子限界と呼ぶ)と懸架鏡の熱雑音(ブラウン運動)で与えられ、上記の工夫により量子雑音・熱雑音は完全に対策可能となる。これにより、 $2e-18 \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ kHz}$ の変位測定精度を実現することで、mg 程度の質量の懸架鏡の重心振動を基底状態まで低減する。

4. 研究成果

(1) all in-vacuum の装置開発

変位測定系・強度安定化系・周波数安定化用参照共振器全てを載せた直径 750 mm のアルミ板を5段防振し、直径 1 m・高さ 1 m の真空容器に設置した上で $1e-5 \text{ Pa}$ の真空度を実現した(図 1 参照)。防振装置にはミラー、レンズ等の光学部品、ミラーホルダー等の機械部品の他にもアライメント調整用のステージ・ピコモータが合わせて 50 個程度、光検出器、コイルマグネットアクチュエータ、防振ダンパーなどの装置を設置している。これら全てから出る脱ガス量を $2e-3 \text{ Pa L/s}$ 未満まで低減することを目標に、研究初年度は各部品の脱ガス量を測定し装置の選定を実施した。真空度が悪い場合、残留ガスと懸架鏡の衝突により生じるエネルギー散逸によって熱雑音が増大するが、その影響を十分無視できる目標の真空度を実現できた。

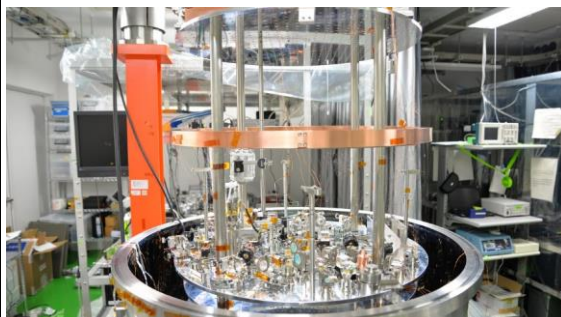


図 1 開発した多段防振装置。防振装置最終段のアルミ板上に全ての測定系を構築した。

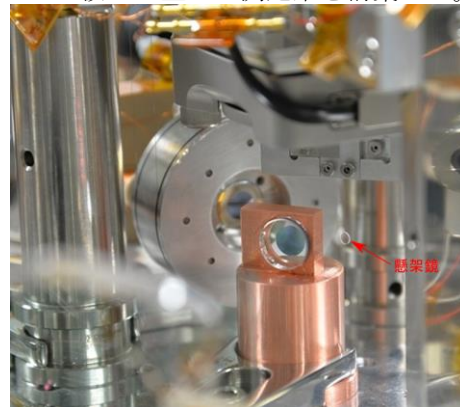


図 2 三角光共振器。直径 3 mm、厚さ 0.5 mm の円柱状の鏡を直径 1 um、長さ 1 cm 程度のシリカで懸架。手前は銅製の一体型ミラーホルダー、奥のアルミの円柱は制御用の懸架鏡。

(2) 光源の安定化系の開発

① 強度安定化

変位測定精度 $2e-18$ m/sqrt(Hz)@1 kHz を実現するためには、レーザー光の相対強度雑音レベルを $1e-8$ /sqrt(Hz)@1 kHz まで安定化しなければならない(光共振器のフィネス 5000 の場合)。本研究で購入した Coherent 社の Mephisto シリーズは市販のレーザーの中では高安定であるがその安定度は $1e-7$ /sqrt(Hz)@1 kHz 程度である。よって、更なる安定化が必要である。

強度安定化のため、音響光学変調器(AOM: acousto-optic modulator)をアクチュエータとして使用したアクティブフィードバック系を開発した。本研究ではアライメントの長時間安定度を高めるために大気中の入射光学系と真空中の測定系は光ファイバーで結合しており、ファイバー由来の強度雑音ピーク(@500 Hz)が観測された。よって、フィードバック制御の制御ゲインに対する要求値が 20 dB から 60 dB まで高まったが、目標の安定度を概ね達成した。

② 周波数安定化

変位測定精度 $2e-18$ m/sqrt(Hz)@1 kHz を実現するためには、レーザー光の周波数雑音レベルを $5e-3$ Hz/sqrt(Hz)@1 kHz まで安定化しなければならない(光共振器長 10 cm の場合)。Mephisto シリーズは市販のレーザーの中では高安定であるがその安定度は 10 Hz/sqrt(Hz)@1 kHz 程度である。よって、更なる安定化が必要である。

目標の安定度を実現するため、1 kHz で 80dB 程度の比較的高い制御ゲインを実現する必要がある。しかし、Mephisto に付属する周波数変調器(温度変調・ピエゾ)は高速応答性が良くないため、電気光学変調器(EOM: electro-optic modulator)を温調・ピエゾと並列で使用したアクティブフィードバック系を開発した。これにより、制御ゲイン 120 dB@1 kHz を達成した。

真の周波数の安定度を制御ループの外で評価(いわゆるアウトオブループ評価)するためには、もう一台周波数を安定化した光源が必要である。そのため、本研究では周波数の安定度の直接測定はできていない。しかし、(3)で述べる変位測定系の測定結果(図3、4)は、視点を転じてみれば、周波数雑音レベルのアウトオブループ評価と同等である。そこから見積もられる安定度は約 130 mHz/sqrt(Hz)@1 kHz であり、目標まで約 30 倍まで迫っている。

(3) 変位測定系の精度向上

図3に、光共振器を用いて測定した懸架鏡の変位量のパワースペクトルを示す(2017年12月19日に実施した初測定から1月9日までの改良の結果。黒点線が自由質点の標準量子限界であり、目標値の目安を与える。)。防振装置の固定、散乱光の除去、光源の安定化、

他の自由度とのカップリング低減、ビームジッターによるカップリングの低減、アクチュエータの自由度の分離、防振装置のマグネットダンピングの最適化、真空槽の配置方法の最適化等を実施し、測定精度を最大で 1000 倍程度向上できた。最も精度の良いのは、現在のところ $2e-17$ m/sqrt(Hz)@300 Hz である。

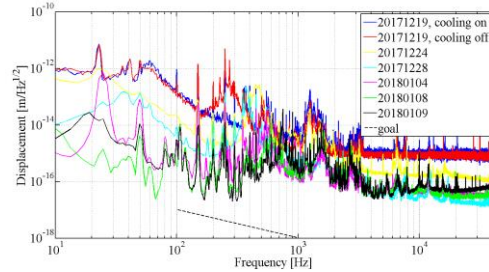


図3 変位精度の向上

精度の向上に伴い原因不明の機械共振(50 Hz の高調波は電源に由来するものであり、それ以外のもの)が多数観測されるようになったため、これらの謎の共振の原因追及及び除去を目指し装置改造を行った。

図4が、装置改造後の結果と1月9日の測定の結果を比較したものである。青線が改造後の結果であり、300 Hz の共振は光学トラップされた懸架鏡の共振である。赤線は改造前の結果で、750 Hz あたりの共振が光学トラップされた懸架鏡の共振である。青線では測定帯域である数 100-数千 Hz の全ての機械共振が除去されていることが分かる。様々な予備の実験・改造を行った結果、謎のピーク構造は光共振器で使用しているミラーホルダーに取り付けたねじなどの機械的共振及びピコモータ等の配線(直径 0.25 mm)のバイオリン振動の高次モードであった。その対策のため、図2に示すモノリシックミラーホルダーを利用した光共振器の開発及び配線の細線化(直径 50 μ m に変更)を実施した。

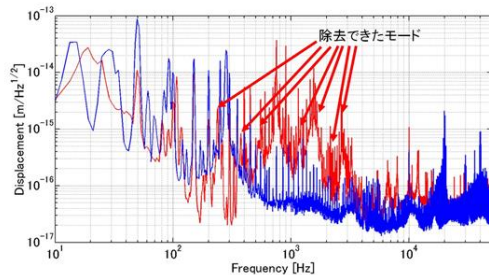


図4 ピーク構造をもつ雑音の除去。青線の雑音は光源の周波数雑音(Phys. Rev. A 94, 033822 (2016)中のモデル)とよく一致する。

(4) 研究成果のまとめ

mg スケールの機械振動子の基底状態冷却を実現するため、変位測定精度 $2e-18$ m/sqrt(Hz)@1 kHz を原理的に実現可能な装置開発に成功した。フィードバック冷却系の精度は原理的には量子雑音と熱雑音で決まるが、両者ともに対策を終えた。実際的な問題

として生じる様々な雑音に関してもほとんど対策を終え、光源の周波数安定度を向上すれば目標を達成可能な状況まで実験が進展した。最高精度は $2e-17$ m/sqrt(Hz)@300 Hz に達した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件) (全て査読あり)

- 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, 13799-13806 (2017). DOI:https://doi.org/10.1364/OE.25.013799
- ② Nobuyuki Matsumoto, Kentaro Komori, Sosuke Ito, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Direct measurement of optical-trap-induced decoherence, Phys. Rev. A 94, 033822 (2016). DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.033822
- ③ Nobuyuki Matsumoto, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Gen Hayase, Yoichi Aso, Kimio Tsubono, 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced backaction, Phys. Rev. A 92, 033825 (2015). DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.033825

[学会発表] (計 4 件)

- ① Nobuyuki Matsumoto, Towards probing fundamental Physics using a massive mechanical oscillator, 6th RIEC-RLE Meeting on Research Collaboration in Photonics, 東北大学, 2016
- 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, 東北学院大, 2016 年
- ③ 桑原祐也, 松本伸之, 牛場崇文, 井上翼, 苅田基志, 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, 大阪市大
- ④ 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, 大阪市大

[図書] (計 1 件)

- ① Nobuyuki Matsumoto, Classical Pendulum Feels Quantum Back-Action, Springer Japan 103 頁, 2016

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 伸之 (MATSUMOTO, Nobuyuki)
東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教
研究者番号 : 30750294

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

()