

研 究 報 告 書

「大質量機械振動子を用いた巨視的量子力学分野の開拓」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2015 年 12 月～2019 年 3 月

研 究 者: 松本 伸之

1. 研究のねらい

基底状態まで冷却された大質量機械振動子を開発し、重力・量子論に新たな知見をもたらすことが可能となる実験分野を創成することが究極的な狙いである。これまで、様々な分野で量子実験の巨視化・重力実験の小型化は進んできている。前者は Cavity Optomechanics 分野における ng スケール振動子の基底状態実現が一つのベンチマークであり、後者のベンチマークは度量衡分野におけるねじれ振り子を用いた重さ 90 g のソースマスの重力の測定(重力定数 G の測定)である。これらの振動子の質量スケールは 10^{10} も隔たっており、重力・量子実験はこれまでの間お互いに影響を及ぼすことがなかった。本研究では、中間的な mg スケールの振動子を用いて量子・重力実験を同時に実現可能とする新たな装置開発を目指している。これにより、重力相互作用による量子状態の制御(例えば、機械振動子間の量子エンタングルメント状態の生成)という究極の実験が実現する可能性もあり、量子重力の実験的検証に繋がる可能性がある。

mg 程度の振動子を極限まで冷却するフィードバック技術の開発により、かつてない高性能重力センサーが実現すると期待されている。従来の重力センサーはねじれ振り子から原子干渉計といった様々な系で実現していたが、これらの測定対象は全て重たい(90 g 以上の物体～地球など)ソースマスに限られていた。大きい物体の重心位置等を精密に測定することは困難なため、これまでの重力定数測定には大きな系統誤差が伴ってきた。全ての物理定数の中で重力定数は(光速度は定義値となったため除くと)最も早くから測定されているにも関わらずその測定精度は最も低く、さらに測定結果の平均値が誤差の範囲内で一致していない。等価原理によりソースマスの質量は大きいほど測定感度が良いが、重力定数を精度よく測定するためには系統誤差を低減する必要がある。そのためには、精密に作製された(重力測定の観点からは)小さな機械振動子間の重力相互作用を測ればよい。小さな機械振動子間の重力を測定するためには、ブラウン運動の影響を抑えた高 Q 振動子を開発する必要があるが、これは振動子の基底状態実現と同様の要求であるため、両者の目的は異なるがアプローチとしては同一なものとなる。

2. 研究成果

(1) 概要

大質量振動子の基底状態実現のためには、振動子の量子的な揺らぎであるゼロ点振動を読み取れる変位測定装置を開発しなければならない。振動子のゼロ点振幅は振動子の質量が大きいほど小さくなるため、重たい振動子の基底状態実現のためにはより高性能な変位測定系を構築する必要がある。ゼロ点振動を読み取るために必要な測定時間を振動子の熱的デコヒーレンス時間(熱浴との相互作用により振動フォノンが一個励起する時間。揺動散逸定理から機械散逸の大きさに反比例する。)より短く、かつ振動子の共振周波数をデコヒーレンス率より高くできれば、基底状態を振動子の複数周期維持できる。

このような実験系を最も単純に構築するため、振動子としては懸架鏡を用い、変位測定系としては懸架鏡を一端とした光共振器を開発した。この場合、振り子の Q 値を光トラップで向上することで熱デコヒーレンスの影響を抑えることが可能である。本研究によって、機械的 Q 値に関しては世界最高レベルの 10^8 を実現し、後者に関しては雑音の低減により世界最高レベルの測定感度を達成した [1]。 10^8 の高 Q 振動子は、直径 $250\ \mu\text{m}$ の純シリカ線を加熱・延伸することで作製した細線(直径 $1\ \mu\text{m}$ ・長さ $1\ \text{cm}$)で懸架した鏡(振り子振動モードの Q 値は 10^5)を離調した光共振器で光学トラップすることで実現した。また、変位測定系の地面振動・光源雑音・音響・埃等から生じる雑音に関しては、高真空($10^{-5}\ \text{Pa}$)環境下にある5段防振装置上に光源安定化系・変位測定系を構築することで除去に成功した。より原理的な雑音である量子雑音や鏡熱雑音に関しては、変位測定系として三角光共振器を利用した自発的に安定なハイパワー光共振器によって散乱雑音を低減し、結晶コーティングの利用によって鏡熱雑音の対策をした。現在の測定精度は、重力センサーの性能として比較すると、従来よりも3桁程度小さな mg 程度のソースマスが生成する重力を検出可能な性能である。振動子の冷却の観点からは、 mg 程度の振動子を μK まで(基底状態は $50\ \text{nK}$ 程度)冷却可能である。

更なる改良に向けた取り組みとして、光源の周波数雑音を低減するために周回長が短くかつ安定な光共振器の開発に取り組んでいるほか、振り子モードの Q 値を現状の 10^5 から 10^6 に向上するための改造に着手している。これらの改良により mg スケールの機械振動子の基底状態が実現できる段階まで、研究を進展させることに成功した。

(2) 詳細

研究テーマ A、B: 熱デコヒーレンスの実効的低減の実証・直接低減

機械振動子を用いた量子実験を実現するためには、熱デコヒーレンスの影響を十分に低減しなければならない。熱デコヒーレンス率とは振動フォノンが一つ励起されるまでの時間の逆数であり、機械散逸の大きさで決まる。これよりも振動子の共振周波数を高く、かつ変位測定系の振動子ゼロ点振動の読み取り時間をこの逆数よりも短くしなければならない。

振り子振動モードは散逸のない重力ポテンシャルと散逸のある弱い弾性ポテンシャルの並列ばねのモデル(Zener モデル。擬弾性を示す。)で記述されるため、機械散逸は周波数の1次に反比例し、さらに機械散逸の大きさは(懸架線の機械散逸) \times (弾性ポテンシャルの大きさ)/(重力ポテンシャルの大きさ)で決まる。つまり、重力により散逸が低減される(散逸希薄化)ため、熱デコヒーレンスは低減される。本研究では純シリカの細線を開発し、振り子振動モードの機械的 Q 値を100倍向上することに成功した。

本研究で使用するレーザーの発振周波数は約 $300\ \text{THz}$ なため、ほとんど全ての光子は室温においてさえ基底状態にある。よって、レーザー光で実現する光学ポテンシャルは散逸を伴ったとしても、トラップされた機械振動子はブラウン運動を励起されない。これは、冷却した抵抗を接続した静電センサーの振動モードが実効的に冷却される cold damping と呼ばれる現象と同様の現象である。実効的に無散逸とみなすことのできる光学ポテンシャルで振り子振動をトラップすると、Zener モデルに無散逸ばねを並列につなぐことになるため、共振周波数の1次に反比例して振動モードの散逸を低減可能であり、機械的な Q 値(共振周波数/散逸)は共振の2次に比例して高くなる。実験的には、空気抵抗によって機械散逸が周波数に

依存しないことが多く(viscous damping)、機械的 Q 値は 1 次で高くなる。この場合、機械散逸は低減しないがコヒーレンスは実効的に改善される。本研究では、viscous 領域における実効的 Q の向上を実証した [2]。さらに、真空度を 10^{-5} Pa まで向上することで空気抵抗の影響を排除し、Zener model の成り立つ領域で Q 値を 1000 倍向上することに成功した [1]。懸架線長を(高次モード周波数・重力希薄化の観点から)最適化し、光ばねを 3 倍程度向上すれば基底状態を複数周期維持できる段階まで研究は進展した。

研究テーマ C・D: 光共振器長の変動測定における雑音低減と基底状態実現・長時間維持
mg スケールの機械振動子の零点振動振幅($\sim 10^{-17}$ m)を 40 Hz のレートで測定可能な変位測定系を実現するために、下記の項目を実施した。

(i) 真空対応防振装置の開発

残留ガスによる懸架鏡の機械散逸の増大を防ぐために、防振装置を設置した上で真空度 10^{-5} Pa を実現しなければならない。図 3 は開発を終えた真空対応防振装置の概要図と写真である。2 段防振スタック、一段コイルスプリング、2 段振り子から成る 5 段防振装置の最終段(main platform)上に重力センサー・光源の安定化システムを全て設置している。各種信号線の取り付けによる防振の悪化・防振装置の共振による変位測定系の感度悪化が開発当初は観測されたが、信号線の細線化(直径 50~100 μ m)・ダンピング機構の微調整により現在は対策済みである。

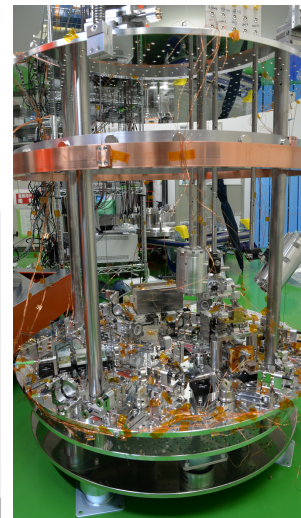
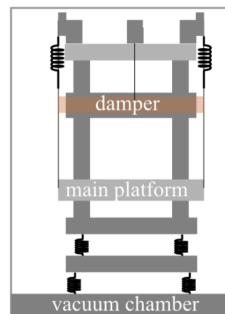


図 3 真空対応多段防振装置

(ii) 光源の周波数安定化システム・振動子の光学トラップ・フィードバック制御系

周波数安定化用参照光共振器、光学トラップ用光共振器の鏡には結晶コーティングという低ブラウン運動の精密変位測定用鏡を導入している(図 5 の図中の黒色コーティング)。これらは防振装置上に設置している。周波数安定化により、周波数安定度約 100 mHz/sqrt(Hz) @100 Hz を実現している。

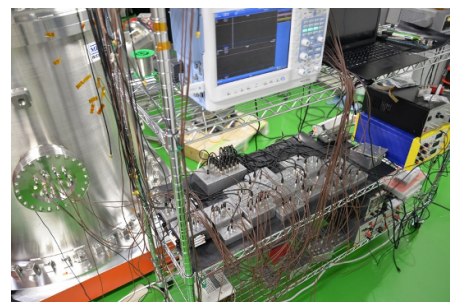
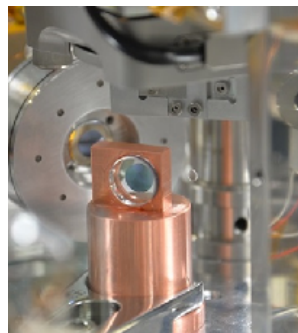


図 5 左から周波数安定化用参照光共振器・安定化システムや冷却システムの低雑音アナログフィードバック制御システム

(iii) 他の雑音源の発見と対策

高精度変位測定系の雑音源を事前に全て予測・対策することは不可能なため、実験者自身が各実験装置に特有の雑音源を発見し、対策することで性能を向上しなければならない。本研究では、主に下記の雑音源の同定と対策に成功し、懸架鏡のブラウン運動・光源の雑音のみで実験結果を説明可能な段階まで達した。

- (a) 散乱光の除去：光検出器を全て入射光に対してブリュースター角で設置し、微小な反射光は全て ND フィルターで除去した。
- (b) pitching モードと重心振動モードのミキシング：懸架鏡においてビームミスセンタリングがある場合、鏡の重心振動とピッチ方向の回転振動は共に光共振器長変動をもたらす。また、一般に重心振動の共振周波数はピッチ共振よりも低く、ピッチモードは重心モードより機械的 Q 値が低い。よって光トラップによって重心振動をピッチよりも高い周波数にすれば両モードは混ざり合い、トラップによる Q の向上はファクター程度低減する。この影響を、ミスセンタリングを低減することで限界近く低減することに成功した。
- (c) ミラーホルダーの共振振動：光学トラップ・冷却用の光共振器の一端に使用していたアクチュエータ付のミラーホルダーの共振モードが雑音源となっていた。ホルダーを一体型の金属ホルダーに変更することで雑音の除去に成功した。
- (d) 信号線による防振性能の悪化：防振最終段に取り付けたアライメント用ケーブル及び各種信号線を直径 $250\mu\text{m}$ の銅線から直径 $50\sim 100\mu\text{m}$ に変更した。測定器周りの電源・機械システムを変化させ、防振最終段に設置したマイケルソン干渉計の信号に変化が生じるかどうかを検証することで、これらのケーブルが雑音を導入していることが判明した。

図2に、懸架鏡の変位パワースペクトルを示す。主に上記の(a), (b)により、測定精度を最大で 1000 倍程度向上できた。精度の向上に伴い謎のピーク構造が現れている。

図 7 が、(c), (d)の対策の結果と図 6 の結果を比較したものである。青線が(c), (d)の対策の結果であり、300 Hz の共振は光学トラップされた懸架鏡の共振である。赤線は図 6 の改良後の結果で、750 Hz の共振が光学トラップされた懸架鏡の共振である。青線では数 100~数 kHz の全てのピーク構造が除去されていることが分かる。青線は懸架鏡のブラウン運動・光源の雑音で説明できる [1]。

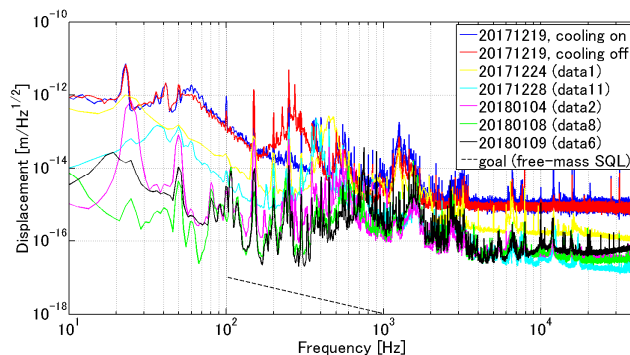


図 6 精度向上のための装置改造の結果

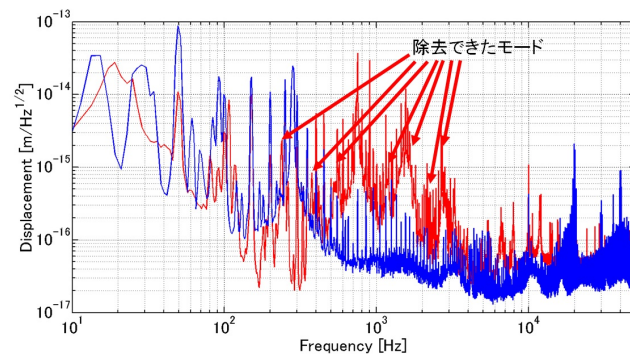


図 7 謎の機械共振の除去に成功

3. 今後の展開

今後の研究の主な方向性としては下記の4つが考えられる。(1)量子非破壊測定の実証による重力波検出器の感度向上への貢献、(2)量子コヒーレント状態を利用したレグット・ガーク不等式の検証による量子論の検証、(3)重力定数 G の高精度測定、(4)量子・重力実験の統合による量子重力の検証。より詳細には下記のとおりである。

- (1) 本研究で開発を進めている振動子の精密変位測定系は重力波検出器と同様な技術を用いているため、この装置を用いて世界で初となる標準量子限界感度の実現、及びその打破を実証できれば将来の重力波検出器の改良のために重要な知見が得られる。また、光ばねを応用した重力波検出器の感度向上に向けた種々の提案を検証するためのプラットフォームとしても活用可能である。
- (2) レグット・ガーク不等式の検証により量子論の大きな謎である実在性に関する知見が得られる。このような検証実験は様々な装置で実現しているが、巨視的な物体を用いた検証は実現していない。その実現のためには、振動子の量子コヒーレント状態を生成する必要があるが、そのためにはまず基底状態を実現する必要がある。本研究の進展により実現可能であると考えられる。
- (3) 従来の重力測定にはねじれ振り子や原子干渉計などのプローブが利用されてきた。プローブの改良は進んできた反面、その感度向上のためにソースマスは常に重たい物体 ($>90\text{ g}$) が利用されてきた。そのため、ソースマスのサイズに起因する種々の系統誤差が重力測定に悪影響を及ぼしていると考えられる。本研究で開発した冷却機械振動子を利用することで、小型機械振動子と冷却振動子の間の重力相互作用が観測できればこの限界を打破できる。重力定数の恒常性を高精度に検証可能な新たなセンサーを開発できれば、度量衡分野に革新をもたらすこととなる。
- (4) 基底状態に冷えた振動子と光子を結合させた系を二つ用意し、それぞれの振動子の間に働く重力相互作用が支配的になれば振動子と光子の量子重ね合わせ状態が重力相互作用で変調され、さらに振動子間が重力でエンタングルする様子が観測可能であると考えられる。このように、重力実験と量子実験を統合することが、本研究の延長線にある究極の目標である。その実現のためには、基底状態の実現・重力相互作用の観測は必要条件であり、これらに加えて機械光学結合定数の実効的な増幅機構の実現・振動子の光学的な量子状態制御技術を高度に実現しなければならないと考えられる。

これらの展開以外にも、量子・非平衡領域における熱力学の検証や種々の重力デコヒーレンスモデルの検証など、幅広い展開が期待できる。

4. 自己評価

①研究目的の達成状況

巨視的振動子の基底状態実現に向けた取り組みは世界中で進んでおり、本研究と同様にアクティブフィードバックを用いた振動子の量子状態推定・制御は大きな関心を集めている。従来のパッシブなレーザー冷却ではラマン散乱を光共振器で選択的に増強することで冷却を実現し、同様にラマン散乱を精密に制御することで量子状態制御を実現してきた。他方、ア

クティブフィードバックの場合、将来的にはカルマンフィルタを用いた非ユニタリーな量子状態制御につながる事が期待されており、従来の手法とは全く異なる状態制御に繋がると期待される。しかし、あらゆる振動子のスケール($\text{fg} \sim \text{kg}$ 程度)や種類(MEMS 振動子や光学浮上球、振り子など)においてアクティブフィードバックによる冷却は困難であり、2018 年時点では未だ基底状態は実現していない。このような世界的な状況の中、本研究は他の研究よりも比較的重たいスケールの振動子を扱う点で挑戦的である一方、振動子の機械 Q 値 10^8 という世界最高レベルの Q 値を達成した。さらに、測定が困難な高い Q 値の振動子のブラウン運動の変位スペクトルを測定可能な高精度変位測定系の実現も成功しており、着実に研究を進められている。

②研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

本研究は主に研究代表者自身が進めている。具体的には、真空システムの開発・防振系の構築・光学系の構築・光源の安定化システムの開発・フィードバック冷却システムの開発・データ取得及び解析を研究者が担当した。これらのうち、防振系の構築・光学系の構築の一部を研究補助者・学生と共に進めた。懸架線の開発は、Mark Sadgrove が構築したファイバー延伸装置を利用して博士課程在籍中の菅原大和が主体的に進め、その一部分を研究代表者が実施した。

③研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果(今後の見込みを含む)、領域独自の評価項目

本研究で目指している量子と重力の実験的統合は 21 世紀の物理学が目指すべき課題の一つであり、その実現は重力の量子的な性質の解明につながる可能性もある。その実現には数十年の研究の積み重ねが必要なのは明白であるが、高性能な機械振動子とその変位測定系の高精度化、及び振動子の量子状態制御技術の開発が問題解決のために重要であることは明白である。

本研究で開発した技術のさらなる発展により、これまでの限界であった質量 90 g よりも小さな物体の生成する重力を精密に観測することが可能となれば、重力定数測定のスースマスの大きさに依存する系統誤差を低減可能な新たな高性能重力センサーを実現できる。これまでの度量衡分野の発展は概ね著しいものであったが、重力定数だけは 200 年以上もの間測定されているにも関わらず測定精度が 100 倍程度しか向上していないという歴史的な背景がある。測定精度のみならず、重力定数の測定結果の平均値が誤差の範囲内で一致していない実験結果が多いことも大きな問題である。本研究の進展によりこの限界を打破し、重力定数の測定精度を数十倍程度の向上した上で、さらにその恒常性を示すことができる可能性がある。

最後に、本研究は重力波検出器の変位測定技術を応用した研究であるため、ここで得られた成果の進展により世界に先駆けて標準量子限界感度の実現及びその打破(量子非破壊測定)を実現することで、次世代重力波検出器にその技術をフィードバックすることが可能となる。世界に先駆けて標準量子限界感度を実現するためには、やはり高 Q 振動子の開発が不可欠であるが、本研究の成果により既に世界最高レベルの Q 値を実現している。将来的には本研究の成果をさらに発展させることで Q 値 10^{10} を超える振動子を実現できる見込み

である。

以上のように、本研究の成果から、量子実験と重力実験の統合・重力定数の精密測定・重力波検出器の性能向上等の波及効果が期待できる。つまり、量子論・重力理論・度量衡・重力波天文学といった現代科学の根本から最先端まで幅広い貢献が期待できる。

④異分野との交流他による新たな研究ネットワークの構築

本研究は日本の重力波分野に所属していた研究代表者が始めたが、現在では欧米の Cavity Optomechanics 分野の研究者との交流が深まりつつある。UCL の Sougato Bose とは量子論の検証実験に関する議論をしており、また Wiena の Markus Aspelmeyer とは振動子の状態推定の解析に関して議論をしている。Markus Aspelmeyer のグループで重力センサーを現在開発しているポストドクの Tobias Westphal はもともとマックスプランク研究所で重力波検出器 Virgo のための技術開発を行っていたが、今後は日本の重力波グループと海外の Optomechanics 分野でも交流が深まれば新たな展開が生じるかもしれない。Macquarie 大学の Jason Twamley は我々の機械振動子を複数個用いた新たな展開として量子ソリトンの生成に着目しており、その実現可能性に関して今後も検討を続ける。また、若手研究者との交流に関しては、NIST の理論物理学者である Daniel Carney や Yale 大学で重力逆二乗則の検証を開始した David Moore との交流が深まりつつある。Daniel はもともと高エネルギー物理の領域で研究をしていたが、現在は低エネルギー領域の実験が新たな研究分野の創成に繋がらないかどうか模索している。David は光学浮上した微小球を用いて重力法則を μm 領域で検証する計画を立てており、本研究とは相補的な実験課題に取り組んでいる。光学浮上実験とは技術的にも共有可能な点が多く、今後の研究協力も期待できる。また、国内の研究者に関しては、慶應義塾大学で量子フィードバック理論の研究をしている山本直樹とともに、カルマンフィルタを用いた機械振動子の最適状態推定に関する研究を進めている。東京大学の道村唯太とは、サブミリグラム鏡を光学的に浮上させる新たな実験を進めている。振動子のフィードバック冷却限界に関しては北海道大学の伊藤創祐と議論を進めた。東北大学の枝松圭一・小野崇人とは単一結晶から成るモノリシック懸架鏡の作製に関する研究を進めており、同じく東北大学の早瀬元とはシリカファイバーと鏡の接着を改良するための手法を共同で開発している。

⑤新たな視点や発想の創出、もしくは創出への貢献に基づいて、研究者自身の評価を簡潔にまとめてください。

装置開発で最も大切なことは「シンプルさ」であるという研究代表者の信念に基づき、最も単純な装置の一つである振り子の高性能化（機械 Q の向上と高次モードの除去、及び振り子変位の測定系の高性能化）に関して一定の成果を残すことが出来た。これは、現在の世界の潮流であるフォノンニック結晶の開発等とは全く異なる最も単純なアプローチではあるが、その性能は世界最高レベルまで向上することに成功した。シンプルな測定系の性能向上は、既に説明した通り重力定数の精度向上に向けた取り組みにおいて系統誤差の低減につながる事が期待できる。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

- | |
|---|
| 1. Nobuyuki Matsumoto, Masakazu Sugawara, Seiya Suzuki, Naofumi Abe, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Seth B Cataño-Lopez, Keiichi Edamatsu, arXiv: 1809.05081, 2018 |
| 2. Nobuyuki Matsumoto, Kentaro Komori, Sosuke Ito, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Direct measurement of optical-trap-induced decoherence, Physical Review A, 2016, 94, 033822 |

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

Invited talk: Quantum Engineering of Levitated Systems, Spain, 2018, Sep. 16 – Sep. 22