

論文の内容の要旨

Optomechanical Torsion Pendulum for Measurement of Quantum Radiation Pressure Fluctuation (量子輻射圧揺らぎ測定のためのねじれ振り子型機械光学結合系)

氏名 小森 健太郎

概要

ねじれ振り子の両端で光共振器を構築し、その回転モードを測定することで、量子輻射圧揺らぎを信号雑音比 0.14 ± 0.03 で観測した。これは重力波検出器で重要となる 100 Hz 付近の周波数帯における測定、および質量が mg-g 程度の機械振動子を用いた測定において世界最高の値である。

重力波検出器における輻射圧雑音

重力波とは、アインシュタインが一般相対性理論から予言した、時空の歪みが伝搬する波動である。重力相互作用は他の力による相互作用と比べ非常に小さいため、重力波を観測することで、ブラックホールや初期宇宙など、電磁波では探査することが難しい対象から新たな情報を引き出すことが可能となる。その振幅の小ささゆえに、重力波の直接観測は長らく実現されてこなかったが、2015 年、アメリカの advanced LIGO がついに連星ブラックホールからの初観測を成し遂げた。さらに 2017 年、電磁波の観測から存在が確実だと考えられてきた中性子星連星合体からの重力波の観測にも成功し、他の電磁波望遠鏡との共同観測も実現させた。重力波天文学は本格的に幕をあけたと言える。

さらなる重力波観測のため、検出器の高感度化への取り組みがすすめられている。そこで問題となるのが、検出器で用いられているレーザー光の量子雑音である。レーザー光の振幅と位相は、不確定性関係から決まる原理的な揺らぎを持ち、特にその振幅揺らぎは輻射圧を介して検出器の試験マスを揺らすため、輻射圧雑音と呼ばれる。この雑音は、10-100 Hz という重力波観測にとって重

要な周波数帯で支配的な雑音となる設計であり、実際の大型検出器に先駆けて、輻射圧雑音を観測しその低減手法を実証することが必要である。しかしながら輻射圧雑音の大きさは非常に小さいため、先行研究では熱雑音といった他の古典的な雑音により、測定感度が1桁以上足りていなかった。

オプトメカニクスにおける輻射圧揺らぎ

質量の大きな物体は量子的な重ね合わせ状態をとりうるのだろうか。重力に関連した未知の量子デコヒーレンス機構は存在するのであろうか。これらの問いに答える手段のひとつとして、レーザー光と機械振動子の相互作用を記述するオプトメカニクス研究がある。機械振動子を一端にもつ光共振器を構築することで、レーザー光の輻射圧を利用し、その振動モードを冷却することができる。究極的には振動モードの零点振動を観測(基底状態冷却)したり、単一光子や複数の振動子のモード間との重ね合わせ状態を生成することが可能となる。

重力起因の量子デコヒーレンスの質量依存性を明らかにするには、様々な質量スケールの機械振動子を重ね合わせ状態にすることが重要である。そのための必要条件のひとつとして、振動子に作用する量子輻射圧揺らぎの観測が挙げられる。これまで fg-ng といった比較的軽いスケールの振動子は、輻射圧揺らぎの観測、基底状態冷却やエンタングルメントの生成の実現など、非常に研究が進んでいる。しかし一方で、mg-g といった質量スケールでは、やはり他の古典的な雑音が原因となり、いずれも達成されていない。

ねじれ振り子光共振器

我々は、100 Hz 帯で mg スケールの振動子を用いて量子輻射圧揺らぎを観測することを目指した。そこで、質量 10 mg の棒状鏡をねじれ振り子として用いた。棒の両端で光共振器を構築し、2つの共振器の差動信号を測定することで回転モードを読み取り、量子輻射圧揺らぎを観測する。この手法には、主に次の3つの利点がある。

- ねじれ振り子の共振周波数が低いため、懸架に伴って生じる熱雑音が小さい。
- 2つの共振器長変動の差をとることで、地面振動やレーザー光の周波数、強度雑音などの同相に効く雑音を除去できる。
- 回転モードは並進モードと比べて実効質量が軽いため、輻射圧揺らぎによる変位を増幅しやすい。

以上の利点を生かし、100 Hz 周辺で信号雑音比 1 以上の測定を試みた。

輻射圧揺らぎ観測のため、他の様々な雑音を低減するための装置を構築した。まず、光共振器が構築されているプラットフォームに防振を施し、地面振動の伝達を防いだ。またレーザー光の周波

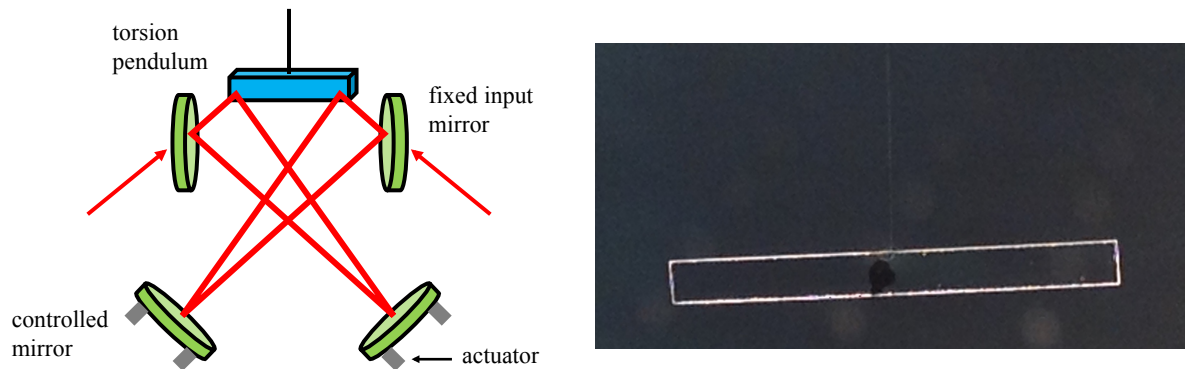


図1 左図: ねじれ振り子光共振器の概念図。三角共振器が2つ構成されており、共通する棒状鏡をねじれ振り子として利用する。右図: 棒状鏡の写真。質量は10 mg、高さ1.5 mm、長さ15 mm、厚さ0.2 mmである。

数を安定化するため、固定鏡で構成された参照共振器を利用した。さらに、レーザー光の一部を分けて強度揺らぎを測定、フィードバックして強度安定化を行った。

結果と解析

ねじれ振り子光共振器の制御は、共振器からの反射光強度を測定し、その信号を共振器を構築する他の懸架鏡に取り付けられたアクチュエータにフィードバックすることで行った。フィードバック制御に加えて、共振器内のレーザー光の輻射圧によって生じるばねの効果を利用して安定な制御が実現された。これは光ばねと呼ばれる現象であり、1 Hz 程度であった振り子の共振周波数を1 kHz 程度にまで上昇させるほど振動モードを固くすることができる。この光ばねを含む、共振器制御のオープンループ伝達関数の測定結果、およびあらかじめ測定しておいたアクチュエータ効率をもとに、適切な信号較正を行って、得られた電気信号を変位雑音に変換した。回転変動は、一方の共振器長変位の信号に、感度の良い周波数帯 (60-100 Hz) にある振動ピークが最も小さくなるようなファクターをかけて他方の信号から差し引くことで取得した。

結果として、60-100 Hz の周波数帯で差動変位 $3 \times 10^{-15} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ という感度を実現した。また、量子輻射圧揺らぎの大きさは、光ばねの共振周波数、制御中の共振器の線幅、2つの共振器における、棒状鏡上のビームスポット位置から求めることができる。これらの推定の結果、信号雑音比 0.14 ± 0.03 を得た。この値は、100 Hz 帯での測定、mg 以上の質量スケールでの測定という両側面にとって世界最高である。

また、現在の感度を制限している雑音を解析した。50 Hz 以下の周波数帯では、縦方向の地面振動雑音で制限されている。150 Hz 以上では、固定されている入射鏡用のホルダーの熱雑音が支配的である。50-150 Hz の感度はいまだ原因が特定できておらず、この未知の雑音源により信号雑音比が 0.14 ± 0.03 となっている。候補としては、プラットフォームの考慮されていない振動雑音、

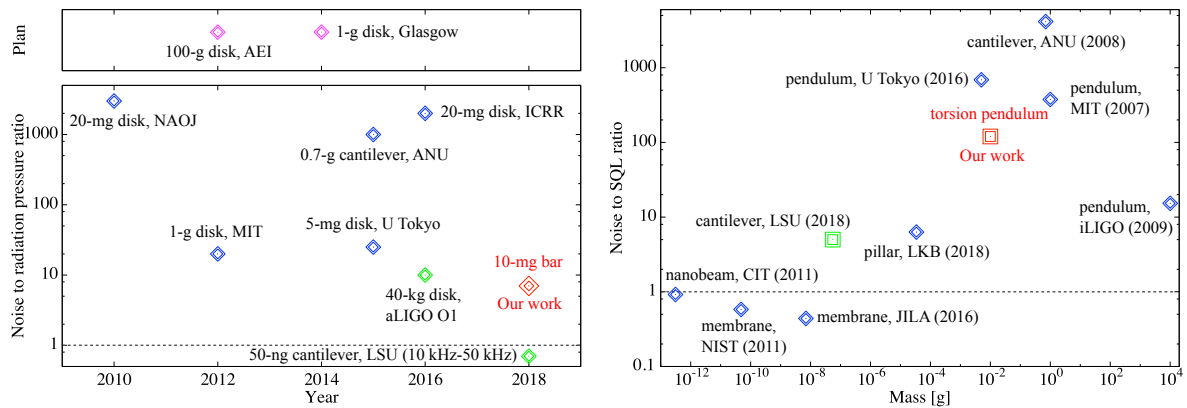


図2 100 Hz 帯での輻射圧雑音観測、様々な質量スケールでのオプトメカニクス研究という両側面における、先行研究と本研究との比較。

散乱光雑音が挙げられる。この未知の雑音や電気雑音を低減することで、信号雑音比 1 以上の測定を行うことが見込まれる。

結論

量子輻射圧揺らぎの観測は、重力波検出器のさらなる感度向上、およびオプトメカニクス研究の 2 つの観点から非常に重要な指標であるが、先行研究では 100 Hz 付近の周波数帯での測定、mg-g の質量スケールにおける測定は実現されてこなかった。そこで我々は、低熱雑音、同窓雑音除去、低実効質量といった利点をもつねじれ振り子光共振器を考案し、その回転モードで輻射圧揺らぎを測定することを目指した。60-100 Hz で信号雑音比 0.14 ± 0.03 を達成し、これは 100 Hz 付近の周波数帯での測定、mg-g の質量スケールにおける測定の両面で先行研究を上回る結果である。未知の雑音を特定、低減し、電気雑音の低減も行うことで、信号雑音比 1 以上の実現が可能である。