

論文審査の結果の要旨

氏名 小森健太郎

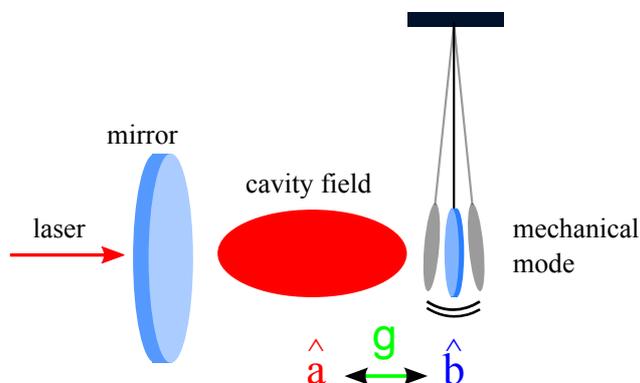
本論文は7章よりなる。イントロダクション(第1章)では、論文の構成がのべられ、2章では、重力波検出の歴史的経緯と、検出器における量子ノイズが具体的に述べられ、3章のオプトメカニクス研究と合わせて本研究の目的が纏められている。続く、第4章では、実験のセットアップや第5章では、結果や較正方法が詳しく纏めている。この研究で鍵となる「ねじれ振り子」が感度を20倍~100倍高めるメカニズムについて詳しく述べられている。第6章、観測されたノイズの考察が詳しくのべられ、最終章(7章)では結論と将来計画が述べられている。

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、つづく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、重力波天文学は本格的に幕をあげたと言える。さらなる重力波観測のため、検出器の高感度化が不可欠であるなか、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。輻射圧雑音と呼ばれる雑音は、10-100Hz 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であり、その初観測、その抑制の研究が重要であり、従来の研究では測定感度が1桁以上足りていなかった。

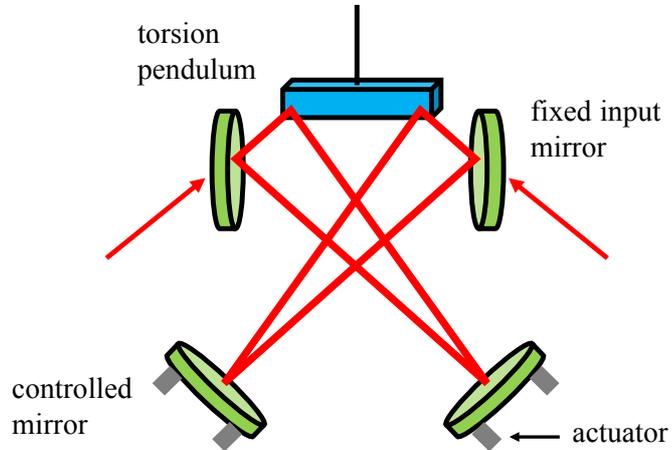
また、量子力学には、「デコヒーレンス機構」が存在するのだろうか? という本質的な問題がある。キャビティー内の量子的な光子とカップルしたミラーが量子的な振る舞いをするか否かが質量に依存するか否かの検証が重要である。未知の量子デコヒーレンス機構は存在するか否かを検証するこれらの問いに答える手段のひとつとして、レーザー光と機械振動子の相互作用を記述するオプトメカニクス研究である。ミリグラム〜グラム質量領域で振動子に作用する量子輻射圧揺らぎの観測がその一歩である。この2点が本研究の目的である。

輻射圧を測定するミラーのノイズとなるのが、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。

(右図)

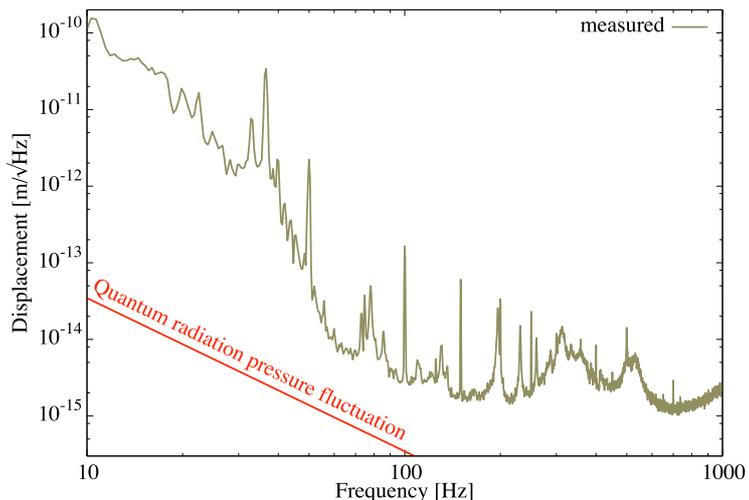


この量子輻射圧の量子限界に達するには複数のノイズが考えられ、上図で、光の入力が揺らぐ効果と、鏡懸架する機構が主なノイズ源である。本研究では、2重の光共振器（光学バネ）とねじればかりを用いる新しい方法（右図）で、これらのノイズを抑制する方法を提案し、実験を行った。この方法は3つの利点がある(1)ねじればかりを用いて、ゆれをねじればかりの回転に変換することで、懸架に起因するノイズを約1/20に抑制できる。(2)2重の光共振器をもちいて差分を取り出すことで、光の周波数ゆらぎなどのノイズを1/85に抑制できる。(3)ねじりばかりの慣性モーメントは、 $1/12 ml^2$ と質量にくらべて1/12に抑制されるため感度が高くなる。



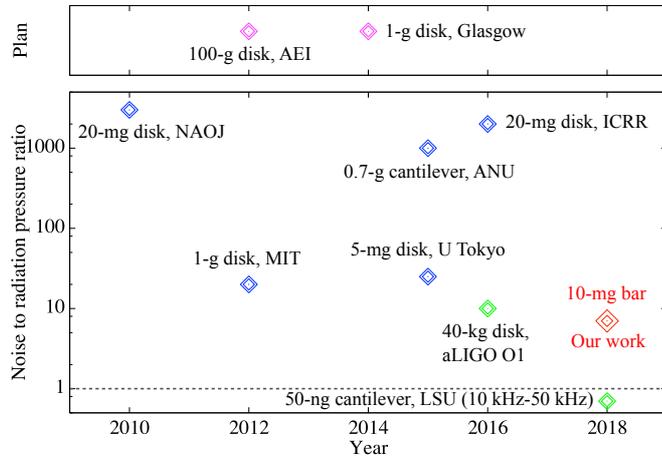
この3つのアイデアで、高い感度で測定が行われた。ねじれ振り子光共振器の制御は、共振器からの反射光強度を測定し、共振器を構築する他の懸架鏡に取り付けられたアクチュエータに、測定した信号フィードバックすることで行った。フィードバック制御に加えて、共振器内のレーザー光の輻射圧によって生じるばねの効果を利用して安定な制御が実現された。

右図に結果を示す。60-100Hz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。一方、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、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。残ったノイズを詳しく考察した結果、プラットフォームの考慮されていない振動雑音、散乱光雑音である可能性を指摘した。

この値は、100Hz 帯での測定としても、またミリグラム以上の質量スケールでの測定の両側面で世界最高感度である（右図）。なお、本研究は、数名の共同研究であるが、この研究に関しては論文提出者が主体となってアイデア、実験遂行、解析で主導的な審査員全員十分納得する研究結果であり、



論文提出者の物理学の知識も博士（理学）をうけるに十分である。したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。