

論文の内容の要旨

論文題目:

Direct Measurement of Quantum Back-Action
in a Macroscopic System
(巨視系における量子的反作用の直接測定)

氏名: 松本 伸之

歴史的背景と将来の展望

1600年代初頭、彗星の尾の観測からケプラーは光の圧力（輻射圧）の存在を指摘し、物議を醸した。様々な検証実験によって、現在ではその存在は確固たる事実として認識されており、さらに夏目漱石の「三四郎」の中で野々宮先生（寺田寅彦がモデル）による光の圧力の研究が紹介された事で研究者の間のみならず世間一般に広く受け入れられてきた。2010年には、日本で開発された宇宙帆船 IKAROS がソーラーセイルによる航行に成功し、光の圧力はその存在のみならず有用性も実証されてきた。

他方、19世紀後半から発展を遂げた量子力学によって、物理量には不可避の量子揺らぎが伴うことが理論的・実験的に確かめられてきた。光に関して言えば、たとえ完全な暗闇を実現したとしても光の直交位相振幅の変動が存在しており、それは「真空場揺らぎ」と呼ばれている。マイケルソン干渉計を用いた重力波検出器に代表される、光を利用した物体の変動測定においては、真空場揺らぎは量子的な測定限界を与え、その一つである散乱雑音と呼ばれる光の位相雑音は研究者たちを悩ませてきた。ここで光の圧力に話を戻すと、その揺らぎは散乱雑音をもたらす位相変動成分とは直交した振幅変動成分を起源としており、これも散乱雑音と同様に量子限界を与える（輻射圧雑音と呼ばれる）。しかし散乱雑音とは異なり、輻射圧雑音は光の圧力の変動が被測定物と相互作用した結果生じる観測行為に伴う擾乱であるため、巨視的なスケールにおいては問題となった事は無い（2008年の zg スケールにおける観測を皮切りに、2013年には ng スケールでの観測が報告された）。これらの雑音のせめぎ合いによって決まる精度限界を標準量子限界と呼び、将来的には、重力波検出器の感度は輻射圧雑音、標準量子限界に制限されることが予想されている。「重力波天文学」創成のためには重力波の検出効率を上げる必要があり、これらの雑音の低減技術の開発が求められている。

このような精密測定の見点から言えば、輻射圧の変動は雑音源に過ぎない。しかし、見点を転じて量子力学の基礎研究の見点から言えば、これとは全く異なる結論が導き出される。なぜなら、観測行為に伴う量子的な擾乱の観測は、機械系（機械振動子）と光の量子性との相互作用の観測を意味するためである。さらに、光を介して巨視的な振動子間のエンタングルメント状態が生成可能であり、それは「量子測定問題」の解決につながる事が理論的に示唆されている。量子測定問題とは、巨視的な領域では重ね合わせ状態は破壊される（ように見える）が、それは線形なシュレディンガー方程式では理解できないという問題である。その答えを与える有力な候補として多世界解釈に基づいたデコヒーレンス理論などが提案されているが、実証論的な見点からは十分だとは到底言えない。そのため、実証可能な様々なモデルの検討が重要であると考えられる。特に重要なものに重力の効果を考慮に入れたモデルがあり、重力の非線形性、プランク質量（約 22 μg ）のスケールが我々が経験的に知っている古典的世界と量子的世界の境界と矛盾が無い点など、その効果の検証の重要性を高める物理的背景が数多く指摘されてきた。重力の効果を検証するためには、量子力学の見点から言って、巨視的物体の位置を巻き込んだエンタングルメント状態を生成可能な状態を用意する必要があり、上述の機械光学効果を用いた手法がその候補として挙げられる。例えば、重力波検出器を用いた検証可能性が指摘された他、浮上マイクロ球をラグランジュポイント L_1 、 L_2 周りのハロー軌道上で運用する MAQRO 計画などが提案されている。

エンタングルメント状態生成のための必要十分条件は、上述の精密測定の見点から言えば、標準量子限界を超える精度で機械振動子の変動を測定可能な状態を用意する事であり、輻射圧雑音の観測はその必要条件となる。しかし、プランク質量を超えるような巨視的な領域においては、その必要条件さえ達成されていなかった。その主な原因は熱的な揺動力の存在であり、巨視的な系を熱浴から孤立させることが困難なため、これまでの実験では非常に大きな熱的な揺動力（熱雑音）が機械振動子を揺らし光の量子性（輻射圧雑音）は覆い隠されてきた。熱雑音を低減させるためには機械振動子を熱浴から孤立させる方法が有力である。そのため（‘可動’鏡にする必要もあり）、巨視的な系においては重力波検出器と同様に、鏡をワイヤで懸架する事で自由質点に近づける手法が利用されてきた。共振器の機械光学効果の利用のため、さらには光の輻射圧揺らぎの効果を増大するために、懸架鏡を一端に利用した光共振器の開発が日本、アメリカ、ヨーロッパなど世界各地で進んできた。しかしこれまでの研究では、共振器の持つ本質的な不安定性（光反ばね効果）が問題となり、量子輻射圧揺らぎの観測は妨げられてきた。私は従来の 2 枚の合わせ鏡を用いた光共振器（線形共振器）では鏡の孤立化と安定化がトレードオフの関係にあることを指摘し、この限界を超える新たな手法として三角共振器の利用を提案した。そして、世界で初めて巨視的な質量 5 mg の鏡に与えられた量子的な擾乱の観測に成功した。従って、私の研究は将来の量子力学の検証実験のための大きな第一歩であり、さらに精密測定の見点から言っても、標準量子限界を超えた究極の感度実現を目指した輻射圧‘雑音’の低減手法の検証のためのプラットフォームの開発に成功したと言える。

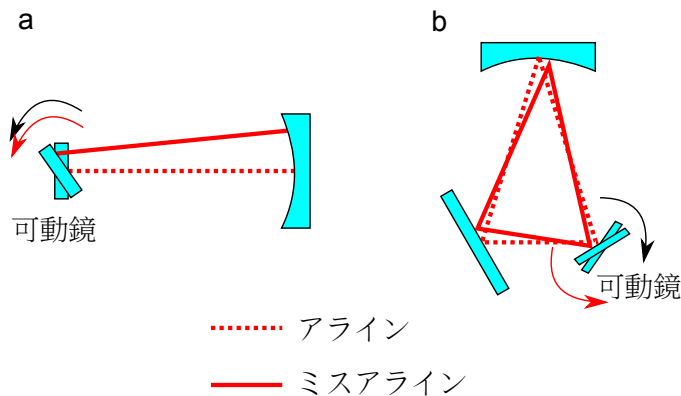


図 1: 共振器の光ねじればね効果。共振器の光軸、鏡の回転運動に対する応答。輻射圧力により鏡にはトルクが加わる。**a**、線形共振器の場合。鏡の回転と輻射圧トルクが同相なため、回復元力が働く。**b**、三角共振器の場合。鏡の回転と輻射圧トルクが逆相なため、復元力が働く。

三角共振器における光ねじればね効果

従来よく使われてきた線形共振器では、鏡のねじれ運動に対して生成される輻射圧力由来のトルクが鏡の回転と同じ方向であるため、反ねじればねの効果が生じる (図 1 a)。そのため、熱浴から孤立させるために十分に細いワイヤを用いて懸架された鏡 (つまり、機械的な復元力が小さい) は不安定になる。この不安定性の回避のためには、(1) 光を弱くして輻射圧トルクを小さくする、(2) 共振器長を短くする、(3) 太いワイヤで懸架する、(4) 複数本のワイヤで懸架する、(5) 制御する、などの対策が考えられる。しかし、(1) では光の輻射圧揺らぎが小さくなる、(3) では孤立化が不十分、(4) では懸架方法の複雑化が予期しない機械的なモードを生成し、新たな熱雑音を生じる、(5) では制御のためのアクチュエータを付けるために機械振動子を十分大きくすることで対策可能であるが、その場合輻射圧揺らぎの影響が小さくなり、他の技術的な雑音 (地面振動、レーザー光源の周波数雑音、回路の雑音) が相対的に増大し事実上観測不可能になる (また、アクチュエータから新たな熱雑音が生じる可能性もある)、(2) は効果的ではあるが単独では不十分、といった原因から、数多くの実験が量子輻射圧揺らぎの観測に成功しなかった。

そこで私は、線形共振器に鏡を 1 枚追加する事で共振器内部の鏡像反転が 1 回追加され、鏡の回転と輻射圧トルクを反転させることが可能であることを指摘し (図 1b)、さらにその実証に成功した。つまり、従来の問題点であった光反ねじればねの効果を変化させることが出来たため、鏡の孤立化と安定化の間のトレードオフは解消された。上述の (3) においても鏡の復元力を大きくするという点では類似性があるが、(3) と根本的に異なる点は光を用いた場合は新たな熱雑音の導入が無い点にある。使用したレーザー光 (波長 1064 nm) は基底状態の実効的な温度が 15,000 K 程度であり、室温においても十分に冷えていると見なせるからである。結果として、鏡に作用する熱雑音の大きさを 1000 倍低減したうえで、線形共振器を使った場合の限界に対し 100 倍のレーザーパワー (3.4 W) を光共振器に貯めることに成功した。

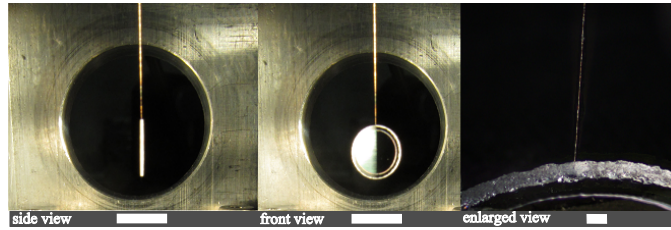


図 2: 機械振動子。直径 4 mm、厚さ 0.2 mm、質量 5 mg の鏡を直径 3 μm 、長さ 5 cm のタングステン線で懸架した。鏡とワイヤの接合部分はエポキシ樹脂で接着されており、鏡はシグマ光機で特別に製作された。スケールバーは左からそれぞれ 4 mm、4 mm、0.2 mm である。

並進方向における光ばね

上述の手法はさらに、光共振器の特性から生じる、振子の並進運動に対する光ばねが十分に利用可能になる点で重要である。光ばねの場合も光ねじればね同様に本質的な不安定性を伴うが、これまでの先行研究によって二つの異なる周波数の光を利用する方法で不安定性を解消可能であることが分かっていた。懸架鏡の共振周波数は一般に数 Hz 程度であり、比較的低周波帯域であると言える。低周波帯域においては一般的に雑音は大きくなるため、熱雑音以外の雑音も問題となる。そこで本研究では、光共振器内に十分に貯められた光によって光ばねの効果を利用し、その共振周波数を 2.2 Hz から 130 Hz に増大させて、これらの技術的雑音の影響を低減した。

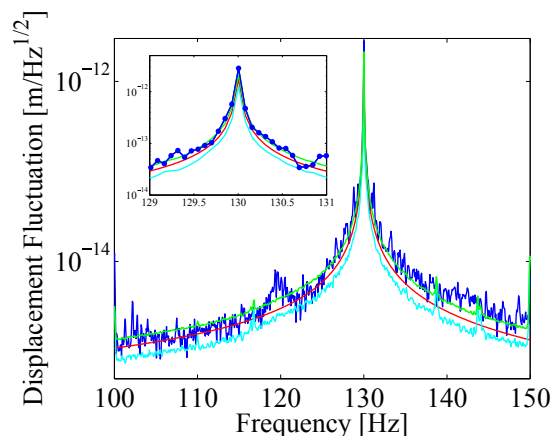


図 3: 量子反作用の測定。

結果

測定結果を図 3 に示す。青線が測定結果、赤線が振子の熱雑音、水色が光の反作用の効果（少なくとも 46% が量子的な成分）、緑色が熱雑音と反作用の和である。解析の結果、量子反作用の効果を SN 比 0.33 ± 0.03 で観測することに成功した。

まとめ

熱浴から孤立させるために懸架された鏡を、光で安定にトラップする新技術の開発に成功した。その結果、5 mg の鏡に与えられる光の真空場揺らぎから生じる量子輻射圧揺らぎの観測に成功した。本研究の成果は、(1) 重力波天文学創成を目指した量子雑音低減技術の検証のためのプラットフォームの開発、(2) 巨視的エンタングルメント状態を利用した量子力学の検証実験の必要条件の達成、という意義がある。