

論文審査の結果の要旨

氏名 松本 伸之

輻射場の量子性により、光の物質に対する力学的作用において離散的な性質が現れる。レーザー冷却のような原子や分子レベルの微視的な系の熱運動を光によって制御する場面では、光子の吸収や放出あるいは散乱過程における運動量の確率的なやりとりに起因する揺らぎは本質的な役割を担う。一方、レーザー光が巨視的な物体に照射される場合にも物体はレーザー光から輻射圧力を受ける。高安定なレーザーは理想的なコヒーレント状態に近いが、その場合であっても、真空場と同じ大きさの揺らぎをもつ。この揺らぎにより、物体が受ける輻射圧力には量子論的な揺らぎが生じる。この‘量子的な反作用’は照射されるレーザー光の量子力学的な状態に依存するので、これを精密に評価することが出来れば、巨視的な光であるレーザー光と巨視的な物体の量子的相関を検出することが可能となる。

例えば量子反作用による鏡の揺れは、反射光に位相シフトをもたらし、反射光は直交位相振幅がスクイーズされた状態となる。このスクイーズされた光は鏡の力学的な振動と量子的な相関を持つので、スクイーズされた光がさらに別の物体に作用することで、遠隔にある物体間に量子もつれを生じさせることも可能となる。これは、シュレディンガーが提起した、巨視系での量子力学的相関の実験的検証を可能とするものである。さらに、これは重力デコヒーレンスと呼ばれる量子系における重力効果の検証という観点からも注目されている。

この量子反作用は、重力波検出の様な極限的な変位計測においても重要である。重力波検出器は、懸架された鏡を用いてマイケルソン干渉計を構成し、鏡の相対位置変動を計測して重力波の飛来を検知する装置である。この場合、量子反作用は重力波信号を覆い隠す検出器の量子測定限界となるため、量子反作用は輻射圧‘雑音’と呼ばれる。他方、圧力の揺らぎを生じる振幅変動成分と直交した位相変動成分は干渉計の位相検出精度を制限する散雑音と呼ばれる。前者の雑音はそれぞれ光の強度に比例し後者は反比例することから、トレードオフの関係を生じる。干渉計による変位の究極的な検出限界はこれら二つの雑音のせめぎあいであり、古典的手法では超えられない究極の測定限界（標準量子限界と呼ばれる）が存在する。これが重力波検出器の感度限界を与えると予想されている。このような究極の感度を備えた検出器においてさえ重力波の検出効率は年間十数個に留まると考えられており、重力波天文学を開拓するためには、この限界を突破しなければならない。その為、更なる感度向上を目指した理論研究が精力的に行われ、周波数依存性のあるスクイーズド真空場を利用するなど様々な手法が提案されている。しかし、これらのアイデアを実験的に検証するためには、まず量子測定限界で制限される装置を実現する必要

がある。しかし、巨視的な系での輻射圧雑音は微弱であり、これまでその検出は行われていなかった。

このような背景のもとで、本研究は巨視的な物体における量子反作用効果を実験的に検証することを目的とした。連続波レーザー光（波長 1064 nm）を光源として懸架鏡（質量 5 mg）を一端とした三角型光共振器を開発し、光共振器の内部モードの量子反作用の効果を有意に評価する事にはじめて成功した。

本論文は、英文で全 7 章から構成されている。以下に各章の内容を要約する。

第 1 章では、機械—光学効果の概要を説明し、本研究の主題である量子反作用と他の測定限界について述べ、先行研究との比較を行っている。

第 2 章では、理論的背景として、本研究で対象とした光学系の説明として、まず機械系と結合していない場合の光共振器の特性について説明している。次に機械系の解説を行い、とくに熱雑音と系の散逸の関係、散逸の種類、散逸の効果を低減させるための‘希薄化’と呼ばれる手法の説明を行っている。最後に機械—光学系における二重光ばね効果の自発的安定性、量子反作用の導出を行っている。

第 3 章では、機械—光学系における実験の応用として、重力波天文学・巨視的量子力学の実現のための課題を述べている。どちらの研究を目指す上でも標準量子限界に到達する事が重要である事を説明している。また、標準量子限界を超える感度を実現する方法として、周波数依存のあるスクイズド真空場を利用する方法や量子反作用によって鏡を揺らし生成されるスクイーピングの効果（ポンデロモティブスクイーピング）を利用する方法について述べている。

第 4 章では、本研究で採用した、三角型光共振器における幾何学的な光ばね効果について説明している。三角型光共振器において、正の光ねじればねの効果が生じることを説明し、その実証実験について述べている。二枚の合わせ鏡を用いた場合（負の光ねじればねの効果）とは異なり、三角型光共振器を利用した場合に振子の熱雑音の低減（重力ポテンシャルによる振子損失の希薄化）と測定系の安定化が両立することを示している。

第 5 章では、量子反作用測定の実験セットアップの全体的な説明と個々の装置の詳細な説明がなされている。

第 6 章では、量子反作用の測定結果と、その正当性を示すために、光学系の特性評価として三角型光共振器のフィネス測定、機械系の熱雑音の評価のための振子の減衰振動の測定、機械—光学系の結合定数を評価するための光ばねの特性評価、共振器内部モードの量子性を保証するための入射光の強度安定度評価、最後に量子反作用測定直前に行った鏡の変位信号への校正のためのオープンループ伝達関数測定について示し、測定結果が確かに振子モードであることを示している。これらの測定結果が相互に矛盾がないことを示した上で、雑音の評価を行い、量子反作用の効果を有意に評価できたとする主張の正当性を示している。

雑音の評価は振子の共振点である 130 Hz の成分に関して行われ、(変位)熱雑音の大きさは $(1.9 \pm 0.7) \times 10^{-12} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、反作用は $(1.4 \pm 0.7) \times 10^{-12} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ (うち少なくとも 43%が量子揺らぎ成分)、それらの和が $(2.4 \pm 1.0) \times 10^{-12} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 直接測定した鏡の変動は $(2.8 \pm 1.0) \times 10^{-12} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ となった。これらの結果から信頼水準 68%で測定値と推定値の差が $(0.4 \pm 1.4) \times 10^{-12} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ の間に存在する事が示され、理論との一致が確認された。また、熱的揺動力のパワースペクトル密度 $S_{FF,th}$ と量子反作用力のパワースペクトル密度 $S_{FF,q}$ との比は、光で束縛された振子の機械応答の誤差の影響を受けないため精度よく推定することが可能であり、 $S_{FF,q}/S_{FF,th} = 0.33 \pm 0.03$ であることが示された。

第7章では、本研究で得た知見を活かした将来の実験計画を二つ提案している。第一の提案は、巨視的振動子の振り子共振モードをレーザー冷却によって実効的に冷やし、巨視的量子状態の実現を目指すものである。レーザー冷却によって十分にフォノンを除去することは可能とされるが、冷却に伴う量子反作用の効果による加熱効果が問題となることを指摘し、第3章で述べられた測定手法を用いることで解決可能性があることが示されている。第二の提案は重力波天文学の実現のために標準量子限界の低減を実験的に検証する事を目指した提案である。

以上、本研究は、機械振動子と光の結合した系において巨視的物体の揺らぎを高感度に検出する実験系を考案し、巨視的な系における量子反作用の効果をはじめて有意に評価することに成功したものである。この結果は、巨視系での量子力学効果の研究や重力波を通じて宇宙を観測する“重力波天文学”の実現といった将来の研究展開につながる重要な成果である。

なお、本論文の研究内容は坪野公夫、麻生洋一、早瀬元、道村唯太との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の提案、測定装置の開発、実験の遂行、結果の解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、本論文は博士(理学)の学位論文として審査員全員が合格と認める。