

量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出  
2018年度採択研究代表者

2022年度  
年次報告書

宗宮 健太郎

東京工業大学 理学院  
准教授

量子制御を用いたオプトメカ結合型調和振動子のマニピュレーション

主たる共同研究者:

小森 健太郎 (東京大学 大学院理学系研究科 助教)  
高橋 優樹 (沖縄科学技術大学院大学 量子情報物理実験ユニット 准教授)  
武田 和行 (京都大学 大学院理学研究科 准教授)  
松本 伸之 (学習院大学 理学部 准教授)

## 研究成果の概要

量子フィルタの導入による光バネの操作を実現することと、光バネを科学的・社会的に意義のある精密計測に応用することが、本研究の目的である。原理検証実験では、光共振器内に非線形光学素子を組み込むことで、光バネの実部と虚部のそれぞれを増減させることが目標であり、今年度にその目標を達成することができた。通常、光共振器は光路長を波長の整数倍にし、内部に光をため込んで運転するが、光路長を波長より短い範囲でずらす「離調」を施すと、光路長変化に起因する位相変調の一部が強度変調となり搬送波と結合して輻射圧をもたらすため、復元力となりオプトメカニカル振動子(光バネ)を形成する。光バネを構成する機械振動子には機械損失が存在するが、光バネ自体には存在しない。光バネを硬化させればその分だけ機械振動子の損失の影響は減り、熱揺らぎを軽減した振動子を実現できる。微小信号計測にとってプローブの揺らぎが感度を制限するため、光バネは理想的なプローブとして広く応用可能な技術である。

光バネを硬化させるには、離調の最適化、搬送波の光量の増加、機械振動子の軽量化、という3つの方法があるが、機械振動子は測定対象ごとに決まるものであり、光量の増加も熱的な問題で制限があるため、離調を最適化して決まる上限で決まる。そこからさらに光バネを硬化する方法として我々が提案するのが、非線形結晶を導入した能動的な信号増幅である。単一の光共振器に結晶を挿入する場合、パラメトリック変換と並行して生じる倍波生成過程による光学損失が増幅を制限するため、光学カー効果を用いた信号増幅の方が適合性が高い。結晶温度を位相不整合状態に制御し、搬送波のパワーを信号に変換する形で信号増幅を実現する。光共振器に非線形結晶を挿入すると光熱効果が発生する。光バネにとっては、虚部が変化して安定化する効果もあるが、光学カー効果が光熱効果と混ざってしまい、光学カー効果単体の増幅効果が分かりにくくなってしまふ。我々は、まず非線形結晶を極端な位相不整合状態に制御し、光熱効果単体の振る舞いを実験的に検証した。光バネ定数と光熱効果係数は、離調角と共振器内光量に対して類似の振る舞いを示すため、一度の測定では区別がつかないが、我々はパラメタを細かく変えて何度も測定を行うことにより光バネ定数と光熱効果係数を精度高く求めることに成功した。本研究成果は Optical Express 誌に掲載された。その後、光学カー効果の検証実験を行い、光熱効果の分を差し引くことで光学カー効果による光バネ定数の増加を確認することに成功した。

応用実験では、まず量子力学の検証実験について、共同研究をするフランス LKB のフォノンニック結晶が量子限界到達条件をクリアする振動子の作成に成功した。現状では反射機構がないため、薄膜中央部にフォトニック結晶構造を付加して量子計測実験を遂行する予定である。東工大では反磁性浮上実験で熱散逸が量子限界到達条件の20倍のところまで実現できたが、その後、真空系の改良中に磁石の脱磁が生じ、現在は浮上できていない状況であり、改良中である。学習院大では振動子の条件付きスクイーズ状態(測定結果に条件付けられた確率密度関数のスクイーズ状態)の確認を可能とする非因果的量子フィルタの開発を進めており、誤差の範囲内で良く一致した結果が得られた。

応用実験の二つ目は重力波望遠鏡の感度改善である。東工大では、パラメトリック信号増幅を組み込んだ信号リサイクル干渉計の開発実験を進めている。昨年度までに5自由度の同時制御に成功し、制御の安定化を進めてきたが、その結果、今年度ついに光バネの観測に成功した。東大では、高周波に特化した重力波望遠鏡の干渉計方式の中でも、大型望遠鏡への導入が計画さ

れている長基線信号増幅共振器の実証実験を進めている。今年度は、マイケルソン干渉計の両腕に光共振器を組み込んだ主干渉計の構築を進め、制御に成功した。

応用実験の三つ目は光検出式核磁気共鳴(NMR)観測である。京大とOISTでは、光検出式NMRにおけるフィードバック冷却の研究および、ファイバ共振器の開発を行った。本方式では薄膜の機械振動の帯域幅が狭いため、狭帯域でも撮像可能な磁場掃引を用いる手法を開発してきたが、なお数キロヘルツ程度の帯域幅が要求されていた。そこで、薄膜の熱振動を光で検出し、電気信号の光変換に用いているドライブ信号の強度にフィードバックをかけるという独自のアプローチを採用し、感度を損なうことなく帯域幅を1桁程度広げることができるようになった。それと並行して、安定動作のために薄膜と光ファイバの端面を利用して光共振器を構成するファイバ共振器の開発を進めている。OISTでは、炭酸ガスレーザー照射による光ファイバ端面の加工を行う装置の開発・改良を行い、レーザー加工の信頼性を引き上げることに成功した。

#### 【代表的な原著論文情報】

- [1] S.Otobe, K.Komori, K.Harada, K.Suzuki, Y.Michimura, and K.Somiya, "Photothermal effect in macroscopic optomechanical systems with an intracavity nonlinear optical crystal," *Opt. Exp.* 30, 42579 (2022)
- [2] M.Croquette, et al., "Recent advances toward mesoscopic quantum optomechanics," *AVS Quantum Sci.*, 5, 014403 (2023)
- [3] W. Jiang, K. Takeda, "Crystal-size effect on the kinetics of CO<sub>2</sub> adsorption in metal organic frameworks studied by NMR," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 24, 21210-21215 (2022)