

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

2021 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

## § 1. 研究成果の概要

科学技術の発展のために微小信号計測は欠かせないものであり、その感度向上のためには熱揺らぎの小さいプローブが必要である。本研究では、輻射圧を介して光と物体を結合させ(オプトメカニカル結合)、遠く離れた光共振器の鏡をつなぐ「光バネ」を微小信号計測のプローブとして利用する手法を開発している。光バネの強度は、光共振器内に蓄積されるレーザー光量で制限されるが、測定対象によっては高出力レーザーを照射できないものもあり、そのようなケースで光バネ強度を向上する案として、光パラメトリック増幅を用いる手法を我々は提案した。光共振器の光学損失を補うだけのパラメトリック増幅を用意し、レーザー発振する閾値ぎりぎりの動作点にシステムを制御することで、光量を制限しつつ光バネ強度を理論上は無限大に増強することができる。この原理の実験的実証を行い、光バネを用いた応用研究に導入するのが本研究の最終目標である。

2021年度の研究成果の一つ目は、カスケード非線形効果を用いて光バネの実部の操作が可能であることを示した、というものである。これまで、光共振器内に非線形結晶を挿入し、位相整合状態でパラメトリック増幅を施してきたが、光バネを観測できるほどの高出力で運転すると結晶の倍波生成過程で基本波が減衰してしまい、光バネの実部を操作することはできなかった。そこで結晶の温度を位相不整合状態に制御し、ポンプ光を導入せずに共振器を運転したところ、分散を介して結晶伝搬中の位相速度が光速を超えるカスケード非線形効果が確認できた。この効果は3次の非線形効果であるカー効果と同じ信号増幅過程を示すことが分かっており、光バネ実部を操作できる手法であることが分かった。さらに、非線形結晶内部における光熱効果が光バネ虚部を変化させることも実験的に実証し、2つの効果を統合して光バネをマニピュレートできることが分かった。

応用研究としては、量子計測、重力波望遠鏡の高感度化、光検出型核磁気共鳴観測装置の開発、の3つをターゲットとしており、量子計測については低熱散逸振動子としてモノリシック振り子、反磁性浮上、フォノン結晶薄膜の3つの開発を続けている。2021年度の主な成果は、石英反磁性浮上実験でQ値測定を実施し、目標より1桁低い10の5乗という結果を得たことと、フォノン結晶薄膜の端部構造を改良し、Q値と共振周波数の積である $Qf_m$ を1桁改善したということである。重力波望遠鏡については、信号リサイクル干渉計のプロトタイプ実験を2か所で実施しており、東工大で実施している信号増幅検証実験機では、デジタル制御システムを駆使して5自由度同時制御に成功した。原田健一特任講師と大学院生が延べ6週間フランスに滞在し、デジタル制御について知見を共有した成果であり、光バネの共振周波数シフトを観測するという最終目標に近づいた。JAXAでは光共振器を組み込んだ信号リサイクル干渉計を構築し、信号側帯波の位相回転による帯域拡張効果の検証実験を行っており、着実に要素技術の開発を進めている。核磁気共鳴観測については、日仏共同研究の産物であるフォトニック結晶と電極を対向配置したハイブリッド薄膜を用いて、キャパシタの振動を光検出する技術の開発に成功した[1]。これまで永久磁石を用いていたが、装置を小型化し、超伝導電磁石で駆動するように改良した。さらに狭帯域検出器に対応した新規MRI撮像手法も開発した。3つの応用研究は全て順調に進んでいる。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 宗宮グループ

- ① 研究代表者: 宗宮 健太郎 (東京工業大学理学院物理学系 准教授)
- ② 研究項目
  - ・光ばねの発展的操作
  - ・非線形光学素子を用いた信号増幅
  - ・光バネを用いた巨視的な物体の量子計測
  - ・重力波望遠鏡の開発

### (2) 宇佐見グループ

- ① 主たる共同研究者: 宇佐見 康二 (東京大学先端科学技術研究センター 准教授)
- ② 研究項目
  - ・光バネを用いた核磁気共鳴検出器の開発

### (3) 武田グループ

- ① 主たる共同研究者: 武田 和行 (京都大学理学部化学教室 准教授)
- ② 研究項目
  - ・光バネを用いた核磁気共鳴システムの開発と MRI への応用

### (4) 高橋グループ

- ① 主たる共同研究者: 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)
- ② 研究項目
  - ・光バネを用いた核磁気共鳴システムの開発と MRI への応用

### (5) 松本グループ

- ① 主たる共同研究者: 松本 伸之 (学習院大学理学部物理学科 准教授)
- ② 研究項目
  - ・光バネを用いた巨視的な物体の量子計測

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) R. Shimazu and N. Yamamoto, "Quantum Functionalities Via Feedback Amplification," *Phys. Rev. Appl.*, 15, 044006 (2021)
- 2) E. Ivanov, T. Capelle, M. Rosticher, J. Palomo, T. Briant, P.-F. Cohadon, A. Heidmann, T. Jacqmin, and S. Deleglise, "Edge mode engineering for optimal ultracoherent silicon nitride membranes," *Appl. Phys. Lett.* 117, 254102 (2020)
- 3) K. Komori, T. Kawasaki, S. Otabe, Y. Enomoto, Y. Michimura, and M. Ando, "Improving force

sensitivity by amplitude measurements of light reflected from a detuned optomechanical cavity," *Phys. Rev. A*, 104, L031501 (2021)

- 4) Y. Tominaga, K. Takeda, "An electro-mechano-optical NMR probe for  $1\text{H}$ - $13\text{C}$  double resonance in a superconducting magnet," *Analyst*. 147 (2022) 1847-1852.
- 5) Y. Tominaga, A. Mikami, A. Iwamura, K. Usami, K. Takeda, "Heating-free, room-temperature operation of a radiofrequency-to-light signal transducer with a membrane oscillator and a built-in metasurface mirror," *Appl. Phys. Express*. 15 (2022) 012003.