

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

光共振器の光路長を入射光の波長の整数倍より少し長くすると、鏡が揺れて光がドップラーシフトしたときに、赤方偏移成分がより増幅されることになるため、光のエネルギーが減り、減った分のエネルギーは鏡の運動エネルギーに変換される。物理的に離れた場所にある鏡の動きに相関が生まれ、光のばね(オプトメカ結合型調和振動子)が形成される。光ばねは観測を伴わないフィードバック機構であり、その共振周波数付近では自由質点で定義される標準量子限界を超えることが可能である。光ばねの共振周波数は、共振器内の光量と光子の滞在時間で決まる。測定対象に応じて照射できる光量に制限がかかり、共振器を構成する光学素子の光学損失もゼロではないことから、光ばねの共振周波数には上限が存在する。また、重力波望遠鏡のような長基線長の光共振器に適用した場合は、共振器内の光子の滞在時間が無視できず、共振周波数の上限は滞在時間の方で制限される。そこで、本研究では、光ばねを構成する共振器内にアクティブフィルタを組み込み、光ばねの実部と虚部を制御して、その操作性を高めることを提案している。

2018 年の研究成果の一つ目は、東京工業大学で実施している非線形光学素子を用いたアクティブフィルタによる光ばね硬化実験において、非線形光学素子による信号増幅効果を確認したことと、伝達関数測定によって光ばねの観測に成功したことが挙げられる。東工大では、シグナルリサイクリング干渉計で信号増幅を確認する実験と、ファブリーペロー共振器で光ばねを確認する実験を並行して行っている。前者は CREST 研究を開始する前から続けている実験で、すでにシグナルリサイクリング干渉計の安定動作と二倍波生成機構によるポンプ光の生成、干渉計内の非線形光学結晶へのポンプ光の注入、という 3 つのマイルストーンは前年度までにクリアしていたが、2018 年に、干渉計に入力した疑似信号が非線形光学効果で増幅することを確認することに初めて成功した。増幅を持続するには非線形光学素子の位置の制御が必要で、制御信号を確認するところまでは来ているのだが、技術的な問題で安定制御には至っていない。一方のファブリーペロー共振器の実験は、CREST 研究開始後に本格的に開始したもので、2018 年に伝達関数による光ばねの観

測に成功した。これら2つが2018年の大きな成果である。また、上記2つの実験と並行して行っている、磁石懸架実験も順調に進んでいる。

2018年の研究成果の二つ目は、東大先端研と京都大学で実施している、電気機械光学結合を用いた核磁気共鳴実験である。光ばねを導入するための準備実験で、現状では通常の光共振器を用いて信号取得している。水素原子が発生する磁場によりコイルに電気信号が流れ、薄膜コンデンサに電荷が蓄積し、薄膜が振動するのを、光で検知するというセットアップで、NMR信号を検出することに成功した[1][2]。電気機械光学結合を実現するには、薄膜の光学損失と機械損失を大幅に改善しないと行けない。そのために我々が検討しているのが、フランスLKBで開発中のPhotonic CrystalとPhononic Crystalである。2018年度大きな成果として、2019年3月にLKBを訪問し、LKBで開発したこれらのデバイスを日本側に提供してもらう約束をとりつけたことがある。NMR実験用に再製作するのに半年ほどかかるが、届き次第、システムの改善にとりかかる。

2018年度の研究成果の最後は、東北大学で実施している量子力学の検証実験である。自己重力効果の検証に先立ち、ミリグラムスケールの検出器で重力相互作用が測定できるかを検証することに成功したものである[3]。量子力学検証実験の1つのマイルストーンを突破したと言える。

【代表的な原著論文】

[1] Yusuke Tominaga, Kentaro Nagasaka, Koji Usami and Kazuyuki Takeda, "Studies on NMR-signal up-conversion from radio-frequency to optical regimes using a lightweight nanomembrane transducer", Journal of Magnetic Resonance, vol. 298, pp.6-15 (2019)

[2] 武田和行, "Electro-Mechano-Optical (EMO) NMR の研究開発", Bulletin of the Nuclear Magnetic Resonance Society of Japan, vol.9, pp. 32-34 (2018)

[3] Nobuyuki Matsumoto, Seth B. Catano-Lopez, Masakazu Sugawara, Seiya Suzuki, Naofumi Abe, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Yoichi Aso, and Keiichi Edamatsu, Demonstration of Displacement Sensing of a mg-Scale Pendulum for mm- and mg-Scale Gravity Measurements, Phys. Rev. Lett. 122, 071101 (2019)

§ 2. 研究実施体制

(1) 東工大グループ

- 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
 - ・重力波望遠鏡の開発

(2) 東大グループ

- ① 主たる共同研究者:道村唯太(東京大学理学部物理学科助教)
- ② 研究項目
 - ・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

(3) 先端研グループ

- 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)
- ② 研究項目
 - ・光バネを用いた核磁気共鳴検出器の開発

(4) 東北大グループ

- ① 主たる共同研究者:松本伸之(東北大学学際科学フロンティア研究所助教)
- ② 研究項目
 - ・光バネを用いた巨視的な物体の量子計測

(5) 京大グループ

- 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