

令和4年度研究助成 成果報告講演(1)

精密量子計測に向けた 低温環境での光アライメント 技術の開発



不破 麻里亜

ふな まりあ

国立研究開発法人産業技術総合研究所
研究員

博士(工学)

ご略歴

- 2012年 東京大学工学部物理工学科卒
- 2016年 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程修了
博士(工学)
- 2016年 - 現在 ドイツ・マックスプランク光科学研究所 研究員、
東京大学生産技術研究所 研究員、
オーストラリア・オーストラリア国立大学 研究員、
東京大学先端科学技術研究センター 助教、
学習院大学理学部 助教を経て、
2024年より国立研究開発法人産業技術総合研究所 研究員(現職)

私が研究している量子情報処理分野では、原子、イオンや超伝導回路の量子力学的な性質を生かし、特定の計算を超高速化した量子計算機によって創薬や物流へ貢献したり、光の量子性を生かした量子暗号通信によって盗聴不可能な通信を実現したりすることを目指しています。このように、ある物質の量子力学的な性質を利用して新しい産業を創出するためには、まずその量子重ね合わせ状態を実現する必要があります。

そこで、未だ試みのない大きな物体の運動の量子重ね合わせ状態の実現を目指して、物体の運動を電磁波によって高精度に計測・制御する研究が進められています。例えば、重力波望遠鏡の技術を用いて、量子慣性計を実現できる可能性があります。このような背景の元は、本研究では、物性科学をこの量子計測分野と融合することで、世界で最も大きな固体の重心運動の量子性を機能化することを目指しています。

特に機械振動子を用いた加速度計の感度は、物体の変位 s に対し、 $dg=(k/m)ds$ の関係 (k :ばね定数、 m :質量) で与えられます。つまり、浮上物体の質量 m が大きいほど、加速度の測定感度が上がります。そこで、重力波望遠鏡分野で蓄積された技術を低温環境に最適化することで、加速度や角加速度を正確に測り、GPSを用いずに自身の位置を取得しながら走行する非GPS航法や地震予測を行うことを最終目標としています。そのために、超伝導コイルを用いて鏡を4 K環境で磁気浮上し、その変位を光で読み出す技術の開発に取り組みました。

しかし物体が大きいほど、その量子性は物体を取り巻く環境からの外乱によって壊れやすくなるため、大きな物体の量子状態を実現するためには、

- (i) エネルギーと角運動量が保存した孤立量子系であり、
- (ii) 電磁波との相互作用により高精度に観測・制御可能

な系が必要になります。

このような系として、カンチレバーやMEMSなどとは異なり、振動子を支える結合部分でのエネルギー散逸がない、浮上型機械振動子が挙げられます。浮上型機械振動子の基礎研究は、米国のハーバード大学、カルフォルニア工科大学をはじめ、欧州、中国でも盛んに研究されており、数十億円相当の研究資金が投入されながら、今後も研究が加速すると予想されます。これらの大規模研究グループでは、浮上物体を剛体とみなし重心運動のみを対象としているため、これまで運動の量子状態を実現できた固体は、直径が100nm程度のナノ粒子に限られていました。

これらの研究では運動の量子状態を実現するためには、その重心運動を計測して制御するため補助的な電磁波が用いられます。この電磁波と運動の相互作用の強さは、量子的な零点振動の振幅に比例するため、質量 m が小さいほど相互作用が大きくなります。そのため質量が μg 以上、大きさが μm 以上の物体の運動の量子状態を生成するに当たっては、この相互作用の小ささが課題となっていました。

そこで私は、物性科学分野の知見を取り入れ、イットリウム鉄ガーネット (YIG) という磁性体の、集団スピン励起という内部スピン自由度を利用することを考えました。この集団スピン励起と電磁波の相互作用は、スピン数が多いほど強くなり、 $\sqrt{\text{質量}}$ に比例します。そのため、重心運動と電磁波の間で、物体の大きさによらない強い相互作用を実現できることを発見しました。これを利用することで、ナノ粒子より1兆倍重い世界最大固体の運動の量子状態を生成できることが理論的に示されています[1]。

さらにYIGのスピ密度が高く、スピン寿命が長いという特長を生かすために、その集団スピン励起をさまざまな量子系と相互作用させる研究が進展しています。例えば、電気との相互作用を用いてダークマター探索を行うことができます。本研究では、このハイブリッド量子系に、重心運動という新たな力学的自由度を加えることで、磁性、重心運動が電磁波と互いに相互作用する新しい物理系を築き、より多機能な応用可能性を開拓します。

このような理論的な進展を踏まえ、本研究では浮上物体を石英鏡からYIG球へと切り替えた方が、より高感度な加速度計を実現できるのではないかと考え、YIG球の浮上に取り組みました。YIGは絶縁体であり、通信波長帯で透明であるため、最終的には10 μm 角の微小鏡や、ナノ光構造を用いた鏡をYIG球に接着することで、光を用いた変位計測を目指します。

一方これまで実験的に実現されてきた磁気浮上系は、永久磁石と超伝導バルクを用いたものが主流であり、YIGは外部磁場を印加して初めて永久磁石のように振る舞う軟磁性体の浮上方法は知られていませ

んでした。そこで、このように外部磁場を印加した超伝導バルクの穴の中に浮上させる方法を見出しました(図1) [2]。ソレノイドコイルによって作られた一様磁場は、超伝導バルクによって外部磁場は集光され、超伝導体の穴の中心で極大値を取ります。YIG球は強磁性体なので磁場の極大値へと引力が働き、鉛直運動は穴の中心で安定します。

しかしEarshawの定理によって静磁場のみで物体を安定に浮かせることはできないため、水平方向を安定化させるためには超伝導体による反磁性を用います。超伝導バルクがYIG球に対して十分大きい時、反磁性力は磁石と超伝導体との距離の -4 乗に比例しますが、超伝導バルクがYIG球と同程度の大きさになると、有限サイズ効果によって力が距離に比例する復元力を働かせることができます。そこで電磁界シミュレーションを用いた最適化によって、YIG球に対して超伝導バルクの穴の大きさを適切に設計することで、YIG球を三次元調和振動子ポテンシャルに安定して浮上させられることを見出しました。

実際の実験ではニオブチタン超伝導線を470回巻

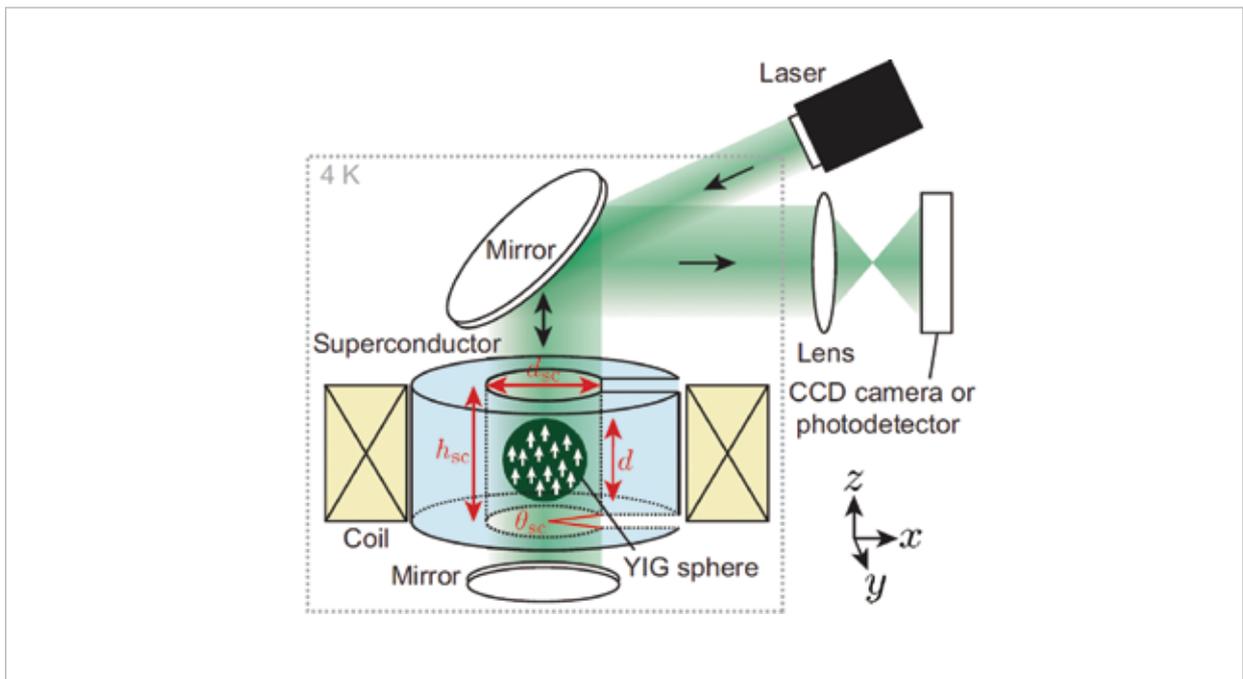


図1: YIG球浮上実験系の概要図

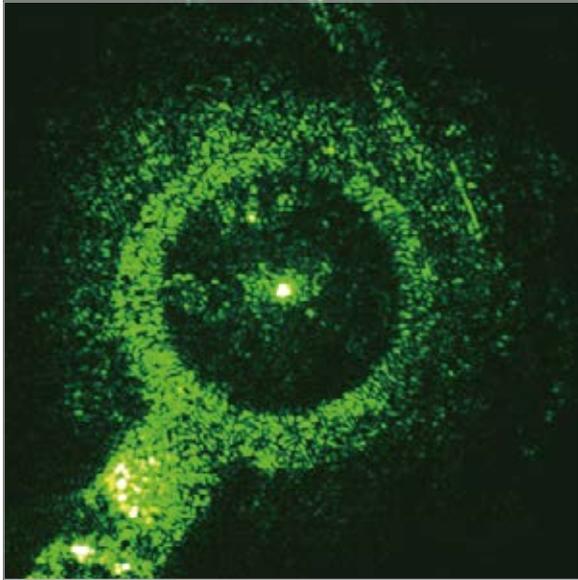


図2: 浮上したYIG球

いた自作小型超伝導コイルを作成し、そのボビンの中心にイットリウム系超伝導体である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO)を円柱状に切り抜き、さらに穴とスリットを開けたバルク体を固定します。その穴の中にYIG球を固定し、超伝導コイルを用いて外部磁場を印可するとYIG球を浮上させることができます。このようにして商用の直径0.5 mm、質量0.3 mgのYIG球を実験的に浮上させることで世界で初めてYIG球を浮上させることに成功しました [3]。

浮上したYIG球の運動を読み出すために532 nmのレーザー光を5 mW照射し、可視光反射率は17 %程度のYIG球の反射光を焦点距離が $f = 250$ mmと長い望遠鏡を用いて検出しました。このようにしてCCDカメラを用いて結像したYIG球の像から、確かに球が浮上したことを視覚的に確かめました(図2)。

さらに、浮上した球の振動を定量的に読み出すために、望遠鏡で集光した光を光検出器で検出し、変位雑音換算スペクトラム(図3)を測定しました。変位雑音換算スペクトラムでは、横軸が周波数、縦軸が変位を表しており、ピークが現れた周波数がYIG球の振動周波数を表しております。これより印加する外

部磁場に比例して、機械振動子の共鳴周波数が変化し、動的にばね定数 k を変化させられることが分かりました。

浮上したYIG球の振動振幅の減衰から、振動を励起してから止まるまでの平均振動回数が $Q \sim 10^3$ であることが分かりました。この原因として、一様磁場を印加する超伝導コイルのボビンにおける渦電流損失が支配的であることも数値シミュレーションとの比較によって分かりました。今後は超伝導コイルのボビンのサイズと治具を改良することで平均振動数が $Q > 10^7$ を超える振動子を実現することを目指します[2]。

このようにしてエネルギー散逸の小さな振動子を実現した後に、YIG球に光反射率 > 99 %のナノ光構造を接着し、光学的なポインティングのフィードバック制御による高感度位置検出を目指す。これにより将来的には浮上YIG球の運動の量子的な状態を実現し、高感度な慣性計による非GPS航法を社会実装する。

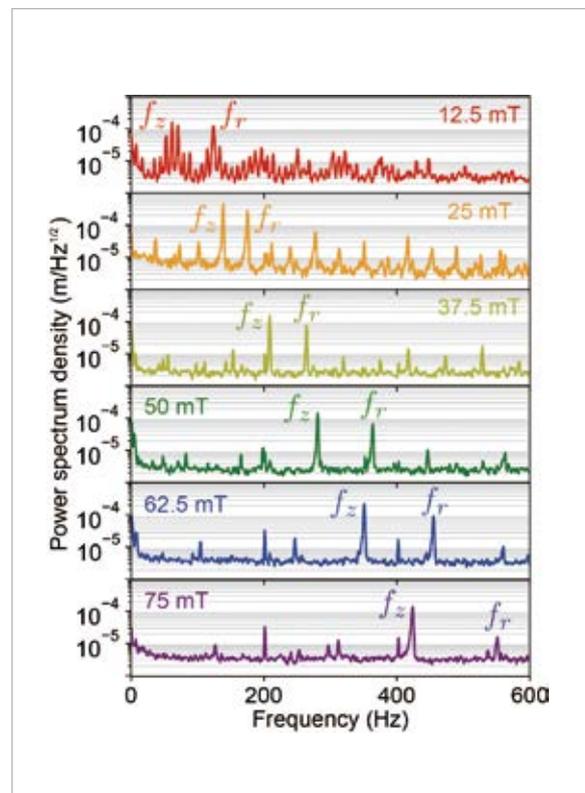


図3: 浮上したYIG球の変位雑音換算スペクトラム
 f_z : 鉛直方向の振動、 f_r : 斜め方向の振動

参考文献

- [1] A. Kani, B. Sarma, and J. Twamley, "Intensive Cavity-Magnomechanical Cooling of a Levitated Macromagnet", *Physical Review Letters* 128, 013602 (2022).
- [2] M. Fuwa, "Stable magnetic levitation of soft ferromagnets for macroscopic quantum mechanics", *Physical Review A* 108, 023523 (2023).
- [3] M. Fuwa, R. Sakagami, and T. Tamegai, "Ferromagnetic levitation and harmonic trapping of a milligram-scale yttrium iron garnet sphere", *Physical Review A* 108, 063511 (2023).