

軟磁性体磁気異方性を用いたねじれ振子型磁力計の開発

産業技術総合研究所 研究員 不破 麻里亜 *

1. はじめに

1.1. 機械振動の量子計測

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活かし、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、光の量子性を活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。

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、エネルギーと角運動量が保存した孤立量子系であり、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。

本研究提案時は、学習院大学松本研究室で低散逸化に成功している振子子を機械振動子として用い、軟磁性体の低散逸ねじれ振子子の作製と実証を目指しておりました。磁気異方性のある強磁性体を用いると、磁気異方性によって磁性体が磁場の方向に回転するコンパス効果が起きます。こ

の回転角度を精密に計測することで、YIG 球に印可されている外部磁場を正確に計測できるようになります。そこで近年発達している低散逸振子子作製技術およびマイクロ波計測技術を用いて、市販されているような従来コンパスを超える性能を持つ磁力計の開発を目指しました。

このような低散逸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、浮上型機械振動子を用いることでねじれ振子より高感度な磁力計を実現できるのではないかと考えました。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初め、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 100 nm 程度のナノ粒子に限られていました。

1.2. 世界最大物体の運動の量子性観測へ

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

* (助成採択時) 学習院大学理学部 助教

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、物体の大きさに依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。

さらに YIG のスピン密度が高く、スピン寿命が長いという特長を活かすために、その集団スピン励起を様々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。

2. 軟磁性球ねじれ振り子の作成と評価

まず直径 $\phi = 0.5 \text{ mm}$ 、重さ 0.3 mg の YIG 球を光ファイバの先端に接着し、ねじれ振り子を作製しました。ここでは、線径 $150 \mu\text{m}$ 、長さ 8 mm のファイバを用い、共振周波数 f_0 は約 1200 Hz 、振動が励起されてから止まるまでの平均振動回数 Q として約 10^6 を目指しました。この際、磁気異方性が最大となる結晶軸に合わせて YIG 球をファイバに接着することで、YIG 球の異方軸を適切に合わせることができるようになります。

イットリウム鉄ガーネット (YIG) の集団スピン励起と同じエネルギーを持つマイクロ波を印加することにより、マイクロ波が吸収されて集団スピン励起が励起される強磁性共鳴が発生します。このときに吸収されるマイクロ波の周波数は、

強磁性共鳴周波数と呼ばれます。

そこで、作製したねじれ振り子に 240 mT の静磁場を印加しながら回転させ、強磁性共鳴周波数の変化を計測しました。YIG には結晶の対称性由来する磁気異方性が存在するため、静磁場を印加する角度に応じて強磁性共鳴周波数が変化することを確認できました。このような回転による磁気異方性の大きさから、ねじれ振り子が正しく作製されていることが示唆されます。

続いて、回転に対する強磁性共鳴周波数の変化が最大となる角度 (Fig. 1 における 110°) に静磁場を印加した上で、自作した磁気回路を用いて 1 mT の静磁場をさらに印加することにより、磁気異方性の影響でねじれ振り子を回転させました。これは、コンパスが地磁気によって回転する現象と同様です。

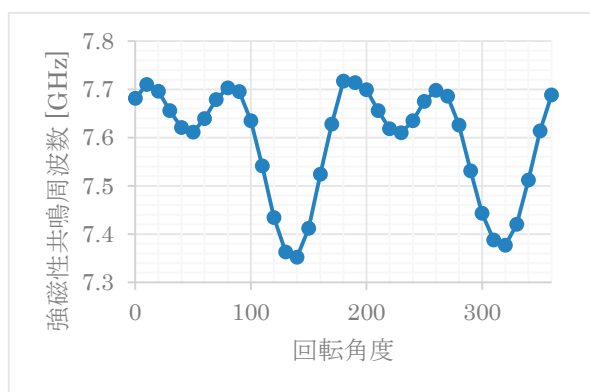


Fig. 1 YIG 球ねじれ振り子の磁気異方性

このときの強磁性共鳴周波数の変化をもとに、回転運動を減衰振動として観測しました (Fig. 2 参照)。この減衰振動の振動周期から、ねじれ振り子の共振周波数は $f_0 = 1184 \text{ Hz}$ 、平均振動回数は $Q \approx 20$ であることが明らかとなりました。

これにより、世界で初めて磁気異方性を利用した磁気-機械相互作用の読み出しに成功したと言えます。しかしながら YIG 球を支える振動部分におけるエネルギー散逸が支配的となっている

ため、今後はより低いエネルギー散逸が見込まれ、浮上型振動子を用いるように方針転換をしました。

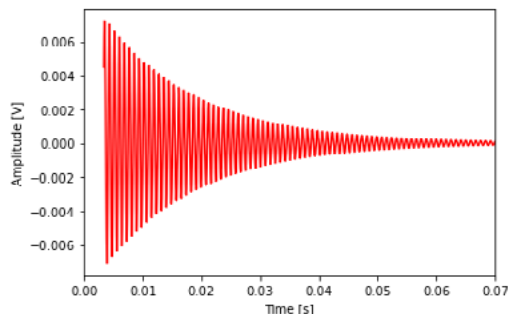


Fig. 2 減衰振動測定結果

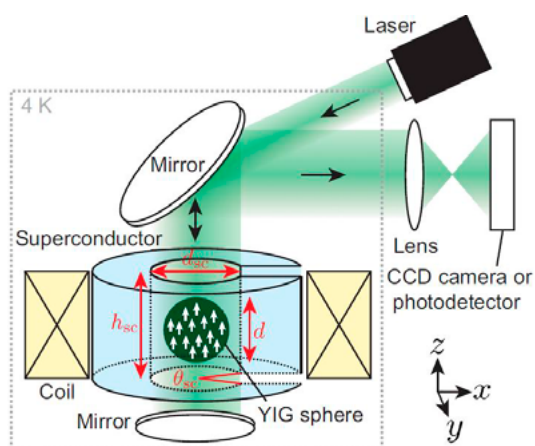


Fig. 3 YIG 球浮上実験系の概要図

3. YIG 球の磁気浮上

3.1. 浮上方法

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 (Fig.3) [1]。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、鉛直方向の安定化を図ることができます。

3.2. 実験結果

ニオブチタン超伝導線を 470 回巻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 [2]。

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 $f = 250 \text{ mm}$ 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 (Fig. 4)。

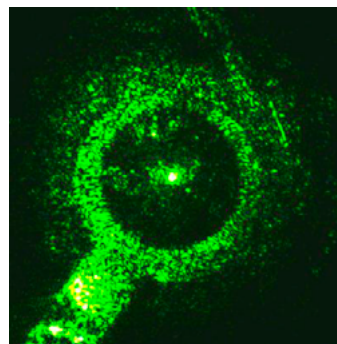


Fig. 4 浮上した YIG 球

3.3. エネルギー散逸計測

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 (Fig.5) 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 $Q \sim 10^3$ であることがわかりました。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柱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わかりました。渦電流損失は外部磁場 B に対して $B^{-0.5}$ に比例するため、外部磁場が強いほど Q 値は下がりますが、本実験でも同様の傾向を確認することができました。

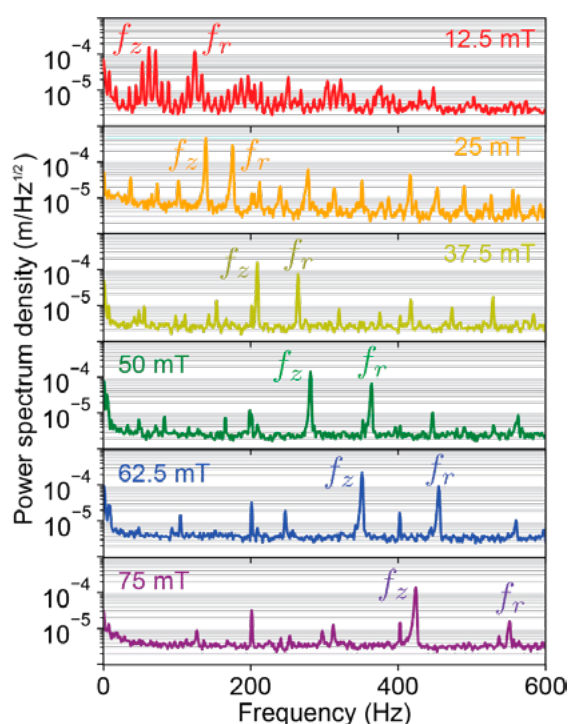


Fig. 5 浮上した YIG 球

4. 将来展望

本実験で観測された渦電流損失は、主に超伝導コイルの内径で生じていることが数値シミュレーションとの比較によってわかっております。

そこで超伝導コイルのボア径を 50 mm 以上に増やしたり、ヘルムホルツコイル構成を使用したり、ボビンにスリットを追加して渦電流の流れを緩和したりした上で、金属平面ステージを浮上系から 10 mm 以上離して配置することで、 $Q > 10^8$ を実現できることが期待されています。さらに、無酸素銅の代わりに融解シリカやサファイアなどの誘電材料を用いて治具を作製することで渦電流損失を大幅に軽減させられると期待されています。一方気体分子衝突によるエネルギー散逸は真空度と共に低下し、 10^{-4} Pa である本実験においては $Q > 10^{11}$ 以上になると予想されています。さらに YIG 球を直径 0.2 mm 以下のより小型なものへと変更することで、渦電流損失による $Q > 10^8$ 以上を実現できる可能性があります。

そこで本研究では今後、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、高感度な磁力計による資源探索を行う第一歩を踏み出したいと考えております。

5. 参考文献

- [1] M. Fuwa, “Stable magnetic levitation of soft ferromagnets for macroscopic quantum mechanics”, Phys. Rev. A 108, 023523 (2023).
- [2] M. Fuwa, R. Sakagami, T. Tamegai, “Ferromagnetic levitation and harmonic trapping of a milligram-scale yttrium iron garnet sphere”, Phys. Rev. A 108, 063511 (2023).

6. その他成果発表等

- ・ M. Fuwa, “Ferromagnetic Levitation Yttrium Iron Garnet Spheres for Macroscopic Quantum Mechanics”, Schrodinger Cats: the quest to find

- the edge of the quantum world, Okinawa, Japan (Dec. 10, 2024).
- ・ 招待講演 M. Fuwa, Invited “Ferromagnetic Levitation of a Milligram-scale Yttrium Iron Garnet Sphere”, Quantum Engineering of Levitated Systems, Benasque, Spain (September, 2024)
 - ・ 不破麻里亜、「ミリグラムスケールのイットリウム鉄ガーネット球の磁気浮上と調和ポテンシャル内安定化」、日本物理学会第 78 回年次大会、17aB102-6、東北大学（川内キャンパス）（2023 年 9 月 17 日）
 - ・ 岩立大勇、中村遼、不破麻里亜、ポスター「イットリウム鉄ガーネットの回転磁気異方性によるスピン機械相互作用を用いたねじれ振子子の回転測定と評価」、日本物理学会第 78 回年次大会、16aPS-32、東北大学（川内キャンパス）（2023 年 9 月 16 日）

7. 謝辞

本研究は、島津科学技術振興財団および矢崎科学技術振興記念財団の助成金によって行われました。