

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600071

研究課題名(和文)量子マグノニクスの創生

研究課題名(英文)Introduction of quantum magnonics

研究代表者

中村 泰信 (Nakamura, Yasunobu)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：90524083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導量子ビットを用いて、強磁性絶縁体中のスピン集団励起自由度を量子的に制御することに成功した。ミリメートルスケールの磁石(イットリウム鉄ガーネット単結晶球)の中のマグノン励起と超伝導量子ビットをマイクロ波共振器モードを介してコヒーレントに結合し、単一マグノンレベルでの量子状態制御と観測を可能にした。この成果は、スピントロニクス分野でも注目されている強磁性絶縁体中の長寿命なスピン集団励起と量子状態制御技術、さらには量子情報科学との融合につながるものであり、「量子マグノニクス」とも呼ぶべき新たな研究領域を開拓したといえる。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated quantum state control of collective spin excitations in a ferromagnetic insulator. We coupled coherently magnon excitation in a millimeter-scale magnet (a sphere of single-crystal yttrium iron garnet) with a superconducting qubit via a microwave cavity mode. It enabled us to control and measure the quantum state in the single-magnon level. The results establish a new research field dubbed "quantum magnonics" which bridges the long-lifetime spin excitations in ferromagnetic insulators frequently used in the field of spintronics with quantum state engineering as well as quantum information science.

研究分野：量子情報物理学

キーワード：強磁性体 マグノン 強磁性共鳴 ガーネット

1. 研究開始当初の背景

イットリウム鉄ガーネット (YIG) は代表的な強磁性絶縁体で、古くから研究されている材料である。応用面でもマイクロ波発振器や光アイソレータなどに広く用いられている。伝導電子による散逸機構が存在しないため、化学的に安定で高品質の結晶が得られることも相まって、集団スピン励起モードの寿命が大変長いという特徴を持ち、1950年代から狭線幅の強磁性共鳴が観測されている。研究開始にはスピントロニクスの研究でも注目を集め、長い平均自由行程を持つスピン波を用いた情報伝送やスピン熱電効果など新しい観点からの研究が進められていた。申請者もスピン熱電効果の研究に関わり、本申請の着想を得るきっかけとなった[Kirihara *et al.* *Nature Materials* **11**, 686 (2012)]。

並行して他方では、申請者らによって初めて実証され[Nakamura *et al.* *Nature* **398**, 786 (1999)]、これまで大きな発展を遂げている超伝導量子ビット回路のように、量子情報処理や量子計測などを念頭において、巨視的な自由度を持つ物理系の量子状態をコヒーレントに制御する試みが盛んになっていた。常磁性スピンの集団励起を用いた量子メモリの研究も盛んに行われており、超伝導量子回路との結合や光との結合に関心が集まりつつあった。ただし、強磁性体中のスピン集団のような高密度でかつ強く相互作用するスピン集団の量子状態制御については全く手つかずの状態であった。

2. 研究の目的

本研究の目的として、以下のような課題を設定して取り組んできた。

(1) 巨視的な自由度としての強磁性体中の集団スピン励起の量子であるマグノンの量子状態を自在に制御する「量子マグノニクス」を提案し、その実現を目指す。マグノン励起の量子制御による新しい学理と機能の発現を目指して、スピントロニクスの量子極限に相当する、新たな研究領域を開拓する。

(2) 強磁性絶縁体中の長寿命のマグノンモードを、マイクロ波共振器を介して、超伝導量子ビット回路とコヒーレントに結合させる。さらに超伝導量子ビットを用いて実現されている量子状態制御技術を適用して、単一マグノンレベルの量子状態制御および観測を実現する。

(3) 通信波長帯の光とマグノンのコヒーレントな相互作用の定量的な評価を行う。

3. 研究の方法

直径 0.3 mm ~ 1 mm の強磁性絶縁体 YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$) の単結晶球を用いて実験を行った。フェリ磁性体である YIG 球中では Fe サイトのスピンが約 550 K のキュリー転移温度以下で秩序化している。Fe 原子のスピンが 3:2 の割合で互いに打ち消し合っているが、全体としては磁化を発現し、例えば直径 0.5 mm の球では電子スピン 10^{18} 個程度に相当するモーメントを持つ。スピン同士は強い交換相互作用によって秩序化しているため、全体としてはあたかも一つの巨大なスピンであるかのように振る舞う。

この YIG 球を無酸素銅でできたマイクロ波空洞共振器の中に配置する。YIG 球には 0.3 T 程度の外部磁場を印加して、磁化を飽和させ、その向きを定める。磁場を局所的にかつ YIG 球周辺でなるべく空間均一性を保ったまま印加するために、直径 1 cm 程度の永久磁石円板の対とヨークに超伝導コイルを組み合わせた磁気回路を用いた。超伝導コイルに流す電流により、磁場を 0.3 T 近傍で調節できるようにした。

マイクロ波共振器はおよそ 10 GHz の共振周波数を持つように設計した。YIG 球内の強磁性スピン集団励起である静磁波モードのうち特に空間的に均一なスピン歳差運動を持つものはキッテルモードと呼ばれる。マイクロ波共振器モードの磁場成分の腹の部分に YIG 球を置き、交流磁場が静磁場と直交するように配置すると、強磁性共鳴を誘起することができる。

実験では、希釈冷凍機中の 10 mK の温度環境下に上記試料を設置し、共振器のマイクロ波透過及び反射スペクトルを測定した。10 GHz の周波数は温度に換算すると 0.5 K に相当するため、10 mK の環境はマイクロ波光子およびマグノンの励起にとって十分低温であり熱励起は無視できる。ただし、室温環境から熱雑音が流入しないように、測定ケーブルには十分な減衰器やフィルターを設ける必要がある。

マグノンと通信波長帯の光の相互作用に関する実験は室温環境下で実施した。マイクロ波共振器に穴を開け、YIG 球にレーザー光を照射した。また別の実験では、マイクロ波共振器の代わりに小型のループコイルで YIG 球とマイクロ波を結合させ、YIG 球に接触したテーパナノファイバー中の伝搬モードを通じてレーザー光を YIG 球上のウィスパーリングギャラリー (ささやきの回廊) モード (WGM) 共振器に結合させた。

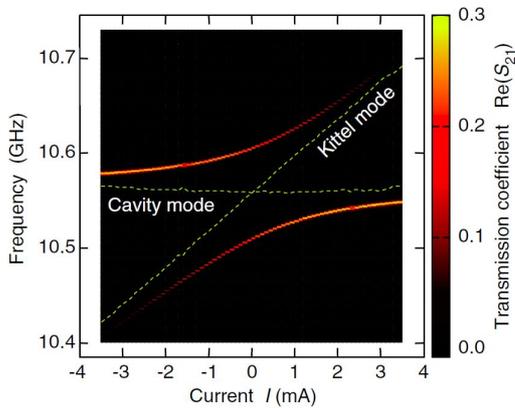


図1 マグノンとマイクロ波光子との強結合

4. 研究成果

(1) マグノンとマイクロ波光子との強結合

図1に示すのがマイクロ波共振器の反射スペクトルを、磁場（超伝導コイル電流）の関数として測定した結果である。磁場に依存するキッテルモードの周波数がマイクロ波共振器モードの周波数を横切るときに、エネルギー反交差が生じている。これは両者が強く結合していることを示している。解析の結果、結合強度は47 MHzであるのに対し、それぞれのモードの線幅は1~2 MHz程度であり、両者がコヒーレントに相互作用できる強結合領域にあることがわかった。また異なるサイズのYIG球に対して同様の測定を行い、理論から予測される通り、結合強度は球の体積すなわち総スピン数のルートに比例することを確認した。

この結果は、ともに調和振動子として記述されるマイクロ波共振器モードとキッテルモードが結合した系における固有振動モード分裂を示したものであり、実際には室温下で高パワーのマイクロ波を用いても同様に観測される。しかしここでは、極低温・低パワー下で、初めてマグノンおよびマイクロ波光子の平均占有数が1以下の量子領域で測定を行った。調和振動子においては量子と古典の振る舞いの差異が明確でなく、その意味では驚くべき結果とは言えない。

(2) 低温におけるマグノン緩和現象

しかしマグノンの共鳴線幅を調べると予

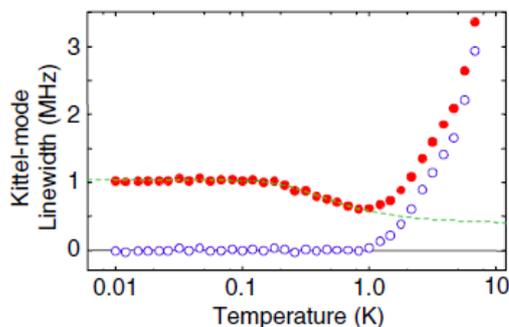


図2 マグノン共鳴線幅の温度依存性(赤丸)

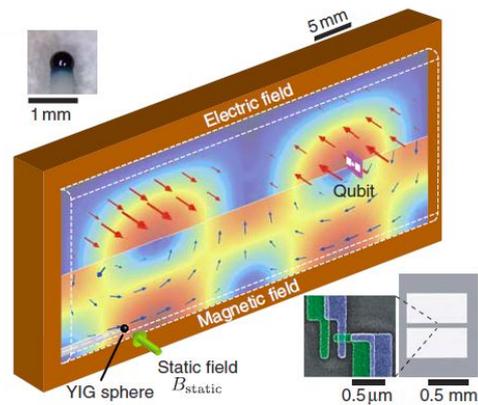


図3 マグノンと超伝導量子ビットとの結合

想外の結果が観測された。図2に、マグノン共鳴線幅の温度依存性を示す。測定を行う前には、線幅は温度の低下とともに小さくなることを期待していたのに対し、実験では1Kあたりで最小となり、それから大きくなって1 MHz程度で飽和した。この振る舞いは初めて観測されたものである。マグノンの周波数を ω_m として、温度依存性が $\tanh(\hbar\omega_m/2k_B T) + \text{定数}$ という特徴的な関数でフィットできること、またマイクロ波パワー依存性を調べると高パワー化で線幅の低下が見られることから、低温極限でマグノンの線幅に寄与しているのは、 ω_m と同じ周波数を持つ量子二準位系の集団であると解釈できる。温度やパワーの上昇とともに二準位系が飽和し、マグノンの緩和が抑制されるので、上記の振る舞いが説明される。二準位系の微視的起源については明らかになっていないが、YIG球の表面あるいは内部に、独立した局在電子スピが存在すると、磁場下でそのゼーマン周波数は ω_m と同等になると考えられるので、その候補となりうる。

(3) マグノンと超伝導量子ビットとの結合

次に自明な古典対応の存在しないような系の実現として、マイクロ波共振器を介して強磁性体球中のマグノン励起と超伝導量子ビットを結合させる実験を行った。

図3にその模式図を示す。やはり無酸素銅でできたマイクロ波共振器の中に、YIG球と超伝導量子ビットを約3 cm離して配置している。YIG球に静磁場を印加する必要があるのに対し、超伝導量子ビットには磁場がかからないようになるべく距離を取っている。用いた量子ビットはトランズモンと呼ばれるタイプであり、挿入図に示すようにミリメートルスケールの2つの大きなAl電極が約100 nm角の微小なジョセフソン接合を介して接続されている。これが実効的な量子二準位系すなわち量子ビットとして振る舞う。量子ビットはその巨大な電気双極子モーメントを通じてマイクロ波共振器中の電場と結合するため、電場の腹付近に置かれている。一方、YIG球は磁気双極子モーメントを通じて共

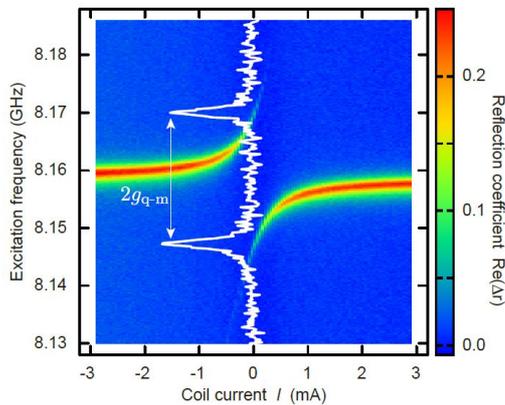


図4 マグノン誘起真空ラビ分裂

振器と結合するため、磁場の腹付近に置かれている。

YIG 球のキッテルモードと超伝導量子ビットは直接的には相互作用しない。しかしながら、離調されたマイクロ波共振器モード中の仮想光子励起を介した高次の過程により結合する。それを観測した結果を図4に示す。ここでは量子ビット-YIG 球結合系を連続マイクロ波で駆動しながら、より高い周波数にある別の共振器モードの応答を弱いプローブマイクロ波で検出している。量子ビットの状態に応じて、共振器モードの周波数が少しだけシフトする効果を利用して、量子ビット状態の読み出しを行うことに相当する。図のカラースケールは量子ビットの励起状態占有確率と読み替えることができる。横軸はYIG 球に対する印加磁場に相当し、それに応じてキッテルモードの周波数が変化する。マグノンの周波数が量子ビット励起周波数を横切るときに、エネルギー反交差が観測された。これは、量子ビットの励起スペクトルに対してマグノン場の真空揺らぎにより誘起されたラビ分裂であり、両者がコヒーレントに結合していることを示している。その結合強度は約 10 MHz であり、理論的予想と一致した。

さらに時間領域の観測において、超伝導量子ビットとキッテルモードの間の真空ラビ振動を見出した。量子ビットとマグノンの間でエネルギー-量子がコヒーレントに受け渡される様子が観測されている。この結果は同時に、量子ビットとマグノンの間の量子もつれ状態を生成できることを示している。

(4) YIG 球を介したマイクロ波-光の双方向変換

マイクロ波共振器中のYIG 球に、通信波長帯(波長 1.5 μm 付近)の光を照射し、強磁性体スピン集団励起との相互作用について調べた。

まずマイクロ波で強磁性共鳴を駆動して、それによって生じる振動横磁化成分を光のファラデー効果で検出することを試みた。静磁場は光軸と垂直に印加し、入射光は直線偏光を用いた。ファラデー効果により透過光の

偏光面がマグノン周波数で振動する様子を高速のフォトディテクタで観測した。その結果、強磁性共鳴の信号を光で観測することに成功した。駆動マイクロ波と検出信号の位相コヒーレンスも確認し、マイクロ波から光への信号伝達を実証した。

次に、これと相反な効果として、誘導ブリルアン散乱におけるマグノン生成の実験を行った。同じ実験系で、駆動マイクロ波をオフにする一方、マグノン周波数を差周波に持つ2つの連続レーザー光を入射した。誘導ブリルアン散乱によりYIG 球上に生成されたマグノンは強く結合した共振器中のマイクロ波光子となって測定ポートに出力される。ここでも位相コヒーレンスを保った光からマイクロ波への信号伝達を観測した。

結果として、YIG 球上の集団スピン励起を介したマイクロ波-光の双方向信号変換を実証した。しかしこれを量子情報処理のためのインターフェイスとして考えた場合、その量子変換効率はまだ 10^{-10} 程度であり、大幅な向上が必要とされる。しかしながら、本研究では変換過程の量子光学的な理解を進めるとともに、注意深い較正により双方向の変換効率を実験的に決定した点に意義がある。また磁気光学的な記述との整合性も確認し、今後の性能改善に対する設計指針を得た[R. Hisatomi *et al.* arXiv:1601.03908]。

(5) YIG 球上の WGM 共振器中の光とスピン励起の相互作用

次にナノファイバー導波路を介して、YIG 球上のWGM共振器に導入された通信波長帯光とキッテルモードのスピン励起との相互作用についても調べた。光に対するマグノン誘起ブリルアン散乱によって、サイドバンド光が生成される様子が観測された。

大変興味深いことに、キャリア光に対して低エネルギー側と高エネルギー側のサイドバンド光の強度に大きい非対称性があることが判明した。またそれは入射光の直線偏光に依存すること、レーザーの入射する向きにも依存することを見出した。これらの結果はマグノンによる光の非弾性散乱過程においてエネルギー保存とスピン角運動量保存を考慮することにより説明可能であることを示した。同時にその理解を踏まえて、WGM共振器を用いてマイクロ波-光の変換効率を増強するために満たすべき条件を理論的に明らかにした[A. Osada *et al.* arXiv:1510.01837]。

(6) 量子マグノニクスへの創生

以上で述べてきたように、本研究では、超伝導量子ビットと回路量子電磁力学の手法を用いて、強磁性絶縁体単結晶中のスピン集団励起自由度を量子的に制御することに成功した。ミリメートルスケールの磁石の中の単一マグノン状態をコヒーレントに制御するという前例のない成果を挙げることで

きた。現在スピントロニクス分野でも注目されている強磁性絶縁体中の長寿命なスピン集団励起と量子状態制御技術、さらには量子情報科学との融合につながる成果であり、「量子マグノニクス」とも呼ぶべき新たな研究領域を開拓した。実際に本研究の結果を受けて、世界の多くの研究機関で関連研究がスタートしている。

今後の課題としては、材料の改善によるマグノンのコヒーレンスの改善、マグノン励起モードの非古典状態の実現と観測、マグノンと光の相互作用の増強、マグノンを介したマイクロ波と光の間の量子変換効率の向上、そのための新規材料の開拓などが挙げられる。また YIG 球上のマグノンとフォノンの相互作用の観測、マグノンと WGM 上の光の相互作用におけるスピンおよび軌道角運動量の保存則の理解なども興味深い課題である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura, *Science* **349**, 405-408 (2015). 査読有.
DOI: 10.1126/science.aaa3693

Y. Tabuchi, S. Ishino, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 083603-1-5 (2014). 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.083603

〔学会発表〕(計 49 件)

田淵豊, 超伝導量子ビットと強磁性体中の単一マグノンとのコヒーレント結合の実現, 日本物理学会第 71 回年次大会, Mar 20, 2016, 東北学院大, 仙台. -invited

Y. Nakamura, Magnonic systems in the quantum regime, Gordon Research Conference on Mechanical Systems in the Quantum Regime, Mar 10, 2016, Ventura, USA. -invited

K. Usami, Quantum magnonics with light, CEMS International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (DAQS2016), Jan 12, 2016, Tokyo, Japan. -invited

Y. Nakamura, Hybrid quantum systems based on collective degrees of freedom in solids, Asia-Pacific Conference and Workshop on Quantum Information Science 2015 (APCWQIS 2015), Nov 30, 2015, Auckland, New Zealand. -invited keynote talk

Y. Tabuchi, Coherent coupling between a ferromagnetic magnon and a superconducting qubit, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT) 2015, Nov 20, 2015, Atsugi, Japan. -invited

Y. Nakamura, Quantum magnonics with a macroscopic ferromagnetic sphere, SpinTech VIII International School & Conference, Aug 10, 2015, Basel, Switzerland -invited lecture

Y. Nakamura, Quantum Magnonics: Hybridizing Magnons with a Superconducting Qubit, Gordon Research Conference on Spin Dynamics in Nanostructures, Jul 26-31, 2015, Hong Kong, China. -invited

Y. Tabuchi, Coherent coupling between ferromagnetic magnon and superconducting qubit, The 2nd school and conference on Spin-based quantum information processing, Aug 21, 2014, Konstanz, Germany. -invited

Y. Nakamura, Toward quantum magnonics: hybridizing magnon mode in ferromagnet with superconducting qubit, Spin Mechanics 2, Jun 22, 2014, Sendai, Japan. -invited

〔その他〕

研究室ホームページ
<http://www.qc.rcast.u-tokyo.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

中村 泰信 (NAKAMURA, Yasunobu)
東京大学・先端科学技術研究センター・教授
研究者番号 : 90524083

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

宇佐見 康二 (USAMI, Koji)
東京大学・先端科学技術研究センター・准教授
研究者番号 : 90500116

山崎 歴舟 (YAMAZAKI, Rekishu)
東京大学・先端科学技術研究センター・助教
研究者番号 : 00551409

田淵 豊 (TABUCHI, Yutaka)
東京大学・先端科学技術研究センター・
特別研究員
研究者番号：0727380

(4)研究協力者

石川豊史 (ISHIKAWA, Toyofumi)
野口篤史 (NOGUCHI, Atsushi)
久富隆佑 (HISATOMI, Ryusuke)
長田有登 (OSADA, Alto)
石野誠一郎 (ISHINO, Seiichiro)