

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分
平成29年3月17日現在

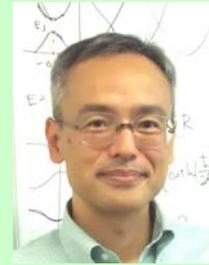
対称性の破れを伴う固体中の集団励起モードを用いた
量子ハイブリッドシステム

Hybrid quantum systems using collective modes
in solids with broken symmetry

課題番号：26220601

中村 泰信 (NAKAMURA YASUNOBU)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授



研究の概要

対称性の破れによって生じる固体中の集団励起モードに対し、量子光学的な手法を利用した量子状態制御を適用する。研究代表者がこれまで研究を進めてきた超伝導量子ビットをツールとして用い、ミリメートルサイズの固体素子中に現れる巨視的集団モードの素励起を自在に制御し、量子情報科学技術の基盤となるような量子ハイブリッド系を構築する。

研究分野：量子情報科学・量子エレクトロニクス

キーワード：超伝導量子ビット・量子ハイブリッド系

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らが世界に先駆けて開発した超伝導量子ビットの理解と性能向上が進み、マイクロ波領域における量子状態制御のための優れたツールとしての利用が可能になってきた。またナノメカニカル素子技術の発展とともに、オプトメカニクスのような、電磁場と固体中の集団励起モードの相互作用を扱う研究分野が立ち上がり、その量子極限追究の機運が高まってきた。一方、量子情報科学の分野では、量子中継などの応用に関連して、電磁波の量子状態と物質系の量子状態を相互に変換する技術への期待が高まってきた。

2. 研究の目的

固体素子中で量子制御の対象となりうる様々な巨視的集団励起モードを探索し、その量子状態を単一量子レベルで自在に制御する方法を開発する。さらに量子情報処理のための媒体としての利用方法を確立する。超伝導量子ビットの強みを活かした量子制御技術を探究するとともに、その弱みである光とのコヒーレントな相互作用を実現するために、両者の間でインターフェイスの役割を果たす他の物理的自由度を見出す。

3. 研究の方法

強磁性体結晶中のマグノンやナノメカニカル素子中のフォノンなど、固体中の集団励起モードの素励起を、電磁場を介して超伝導量子回路と相互作用させる。超伝導量子ビットの持つ強い非線形性により、これらの調和

振動子モードの量子状態を量子力学的に制御し、非古典的な状態を実現することが可能になる。さらにこれらの巨視的量子系をマイクロ波や光などの電磁場モードとコヒーレントに相互作用させる方法を開拓する。

4. これまでの成果

強磁性体結晶球中のマグノン励起の量子状態制御 [5,6]

強磁性体中で交換相互作用により一方向に揃ったスピン集団の素励起であるマグノンの自由度を単一量子レベルで制御することに世界で初めて成功した。まずマイクロ波空洞共振器内に直径0.5 mmのイットリウム鉄ガーネット (YIG) 単結晶を配置し、空洞共振器のマイクロ波モードと強磁性共鳴モードの強結合を実現した[6]。さらにマイクロ波空洞共振器中に超伝導量子ビットを導入し、マグノン励起と超伝導量子ビット励起が、空洞共振器内のマイクロ波光子の仮想励起を介してコヒーレントに結合することを、真空ラビ分裂の観測により示した[5]。またラビ振動の操作により、マグノン励起の非古典状態生成や、超伝導量子ビットを用いたマグノン励起数の計測も実現している。

共振器オプトマグノニクスの開拓 [3,4]

強磁性体中のスピン集団励起は、ファラデー効果を介して光と相互作用する。これを用いてスピン励起の状態を光へ転写することを目指している。そのための基礎実験として、室温でマイクロ波空洞共振器中の YIG 単結晶球にレーザーを照射し、マイクロ波駆動下

での強磁性共鳴により誘起された振動横磁化成分を光で検出した。またその逆過程として、強磁性共鳴周波数に相当する差周波を持つ2本のレーザー光を照射した際に誘導ブリルアン散乱によって発生するマグノンを、共振器を介してマイクロ波信号に変化し観測した[3]。これによりマイクロ波と光の間の、マグノン励起を介した双方向の信号変換の可能性を示した。さらに、光をYIG球を周回するウィスパーリングギャラリモード(WGM)共振器に閉じ込めることにより、マグノン誘導ブリルアン散乱がWGM共振器モード間で起こることを示した。その際に、マグノン励起モードの持つ軌道・スピン角運動量と、光モードの持つ軌道・スピン角運動量の間に成り立つ保存則により、特異な選択則が課され、光のサイドバンド生成に非対称性・非相反性が生じることを見出した[4]。

超伝導量子ビットを用いたマイクロ波単一光子検出器 [2]

光の領域の量子光学実験では単一光子検出器が欠かせないツールとなっているが、マイクロ波領域では、光の場合に比べて単一光子のエネルギーがはるかに小さいために、その検出は容易でない。本研究では、共振回路と結合した超伝導量子ビットをマイクロ波で駆動した際に生じる dressed 状態を利用して人工的な Λ 型3準位系を実現し、それを利用して帯域約20 MHzで、伝搬モード中のマイクロ波単一光子を66%の量子効率で検出することに成功した[2]。これは現時点で世界最高の性能である。

窒化シリコンメンブレンの振動モードの基底状態への冷却 [1]

厚さ50 nm、面積0.5 mm²の窒化シリコンメンブレンの基本振動モードは約1 MHzの共振周波数を持つ。表面にAl電極を蒸着したメンブレンを利用した並行平板キャパシタと超伝導空洞共振器のインダクタ成分を利用したLC共振回路を構成し、メンブレンのマイクロ波サイドバンド冷却方法を考案・実証した。メンブレン振動モードの平均フォノン占有数0.5に到達し、振動基底状態近くまでの冷却を実現した[1]。

5. 今後の計画

引き続き上述のような集団励起モードの量子制御技術の開拓と性能向上を目指して研究を進める。ピエゾ材料基板上の表面弾性波モードの素励起など新たな自由度の利用にも取り組む。特に、光との相互作用を増強する方法を見出すために、光とマグノンの空間モード重なりにより詳細な制御や、光弾性効果を利用した、格子振動と光との結合について探究する。マイクロ波側では、超伝導量子回路技術を駆使した、オンデマンド任意波

形単一光子波束の高効率生成や、単一光子検出器の検出効率向上などを旨とする。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む) 論文

- [1] “Ground state cooling of a quantum electromechanical system with a silicon nitride membrane in a 3D loop-gap cavity”, A. Noguchi, R. Yamazaki, M. Ataka, H. Fujita, Y. Tabuchi, T. Ishikawa, K. Usami, and Y. Nakamura, *New J. Phys.* **18**, 103036-1-10 (2016).
- [2] “Single microwave-photon detector using an artificial Λ -type three-level system”, K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura, *Nature Commun.* **7**, 12303-1-7 (2016).
- [3] “Cavity optomagnonics with spin-orbit coupled photons”, A. Osada, R. Hisatomi, A. Noguchi, Y. Tabuchi, R. Yamazaki, K. Usami, M. Sadgrove, R. Yalla, M. Nomura, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 223601-1-5 (2016).
- [4] “Bidirectional conversion between microwave and light via ferromagnetic magnons”, R. Hisatomi, A. Osada, Y. Tabuchi, T. Ishikawa, A. Noguchi, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. B* **93**, 174427-1-13 (2016).
- [5] “Coherent coupling between a ferromagnetic magnon and a superconducting qubit”, Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura, *Science* **349**, 405-408 (2015).
- [6] “Hybridizing ferromagnetic magnons and microwave photons in the quantum limit”, Y. Tabuchi, S. Ishino, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 083603-1-5 (2014).

受賞

- [1] 第10回 (2016年) 日本物理学会領域1若手奨励賞 (領域1), 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」, Oct. 1, 2015
- [2] 日本物理学会第3回 (2014年秋季大会) 学生プレゼンテーション賞, 石野誠一郎「空洞共振器を介した強磁性マグノンと超伝導量子ビットの強結合」, Oct. 22, 2014.
- [3] 第11回江崎玲於奈賞, 中村泰信「超伝導量子ビットシステムの研究」, Sep. 2, 2014.

ホームページ

<http://www.qc.rcast.u-tokyo.ac.jp/>