

平成30年 6月16日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05461

研究課題名(和文) 超伝導量子ビットと光の間の量子インターフェイスの実現

研究課題名(英文) Interfacing superconducting qubits and quantum light

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、冷却原子で実現された常磁性スピン集団やナノメカニクスと光やマイクロ波等の電磁波との相互作用の研究を有機的・建設的に融合し、磁気秩序を持った強磁性スピン系を用いてマイクロ波-光変換を実現することを目指した。成果としては、1) マイクロ波から光へのコヒーレントな双方向変換を球状強磁性体中の静磁波モードに励起するマグノンを経由して実現、2) 静磁波モードと光間の相互作用を増強するために光共振器を使う共振器オプトマグネニクスという分野の創始、3) 共振器オプトマグネニクスの枠組みでブリルアン散乱を介した光子とマグノンの間の非相反な相互作用の起源の解明、の3つが挙げられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we are aiming at realizing microwave-to-optical photon conversion through ordered spins in ferromagnetic materials, which embrace both merits of collectively enhanced interaction typically realized with the paramagnetic spin ensemble and rigidity against nearest neighbor unwanted interaction. We achieved 1) the coherent and bidirectional conversion between microwave and optical photons through magnons in a magnetostatic mode of a ferromagnetic sphere, 2) pioneering a new research field called "cavity opto-magnonics" to enhance photon-magnon coupling, and 3) understanding the origin of peculiar non-reciprocal interaction between photons and magnons in the setting of cavity opto-magnonics.

研究分野：量子光学

キーワード：量子光学 磁性物理学

## 1. 研究開始当初の背景

1) 超伝導量子ビットのデザイン、操作法、散逸過程の理解が飛躍的に向上し、超伝導量子ビットを要素とした大規模量子計算機の実現が現実味を帯びてきていた。超伝導量子ビットは、自然界の原子では実現できないような巨大な電気双極子モーメント(通常原子の  $10^7$  倍!)を持つようにデザインされており、マイクロ波領域の電磁波と非常に強く相互作用する。このため、光領域の量子光学では困難であった実験も、超伝導量子ビットを基にした人工量子系で実現されつつあった。そこで、10mK という極低温下でしか動作できない超伝導量子ビットを何等かの媒体を介して光とリンクできれば、操作性で優れたマイクロ波領域の極低温人工量子系と光領域の量子光学の接点に新しい研究領域を切り開くことが可能と考えられた。本研究では、そのような新領域創成の先駆けとなるべく、超伝導量子ビットと光の間の量子インターフェイスを強磁性絶縁体のマグノンモードを使って実現することを目指した。

2) 本研究の特色は、マイクロ波や光とのモードマッチが容易というメカニクスのようなオーダーした系が持つ利点と、マイクロ波、光双方と電磁氣的結合が可能という集団スピン系が持つ利点を合わせ持つ、“磁気オーダーした強磁性スピン集団”を量子インターフェイスの中核として使う点である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的としては、以下の3点が挙げられる:

1) 量子インターフェイスの実現に向けて、10mK の極低温環境下でのみ動作する超伝導量子ビットを常温でもロバストな光で操作するための基礎技術を開発する。将来的には、超伝導量子ビットを要素とした量子計算機の間を光ネットワークで結んだ大規模量子インターネットの実現に貢献できる。

2) 量子的な操作性に優れた超伝導量子ビットで光 - 光間の量子操作を実現する可能性を開く。光領域の量子光学では不可能であった様々なタスクが超伝導量子ビットとの結合を介して可能になると考えられる。

3) 大振幅の古典的なスピン波を利用して情報を伝達・処理するスピントロニクスデバイスを究極的な単一マグノンレベルで動作させる『量子マグノニクスデバイス』に昇華させる礎を築く。

## 3. 研究の方法

強磁性体の材料として、マイクロ波領域で磁気損失が小さく、光の通信波長帯で透明かつ大きなファラデー効果を示すガーネットフェライト、 $Y_3Fe_5O_{12}$  (イットリウム鉄ガーネット、YIG) を選定した。この強磁性絶縁体内に励起する長寿命マグノンモードを利用した超伝導量子ビットと光の量子インターフェイスの実現に向けて、研究期間内に以下の課題に取り組んだ:

a) 常温下で、静磁波モードによるマイクロ波-光間の古典的な結合の実証

b) ウィスパリングギャラリーモード光共振器を利用した静磁波モードと光間の相互作用の増強

c) ボルテックス(軌道角運動量)を持つ静磁波モードと光間でのボルテックスの交換に関する物理的理解

以下、各項目における研究成果を詳解する。

## 4. 研究成果

a) 常温下で、静磁波モードによるマイクロ波-光間の古典的な結合の実証

マイクロ波から光へのコヒーレントな双方向変換を強磁性体中のマグノンを媒介として実現した。この実験は、強磁性絶縁体 YIG の鋭い強磁性共鳴を利用する世界的にも類を見ないユニークなマイクロ波 - 光変換器として認識されている。

YIG の球状試料内に励起される磁化の一様歳差運動は静磁波モードと呼ばれ、光とはファラデー効果を介したパラメトリック過程で非共鳴に結合し、マイクロ波とは、マイクロ波空洞共振器内の磁場の最大点に強磁性体を設置することで、磁気双極子相互作用によって共鳴的に結合する。

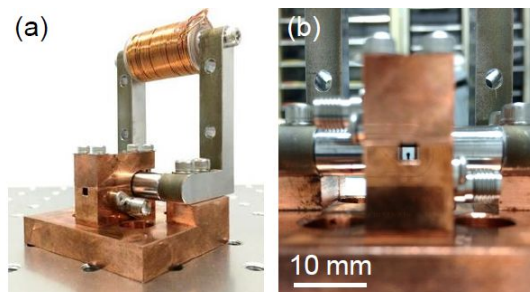


図1: 実験に用いたマイクロ波空洞共振器

図1(a)、(b)にこの実験に用いたマイクロ波空洞共振器を示す。

本実験では、マイクロ波で励起した静磁波モードをファラデー効果を介して光のストークス/アンチストークス散乱光に位相情報も含めてコヒーレントに変換できること、また、この逆過程、つまり、逆ファラデー効果を介して光で励起した静磁波モードをマイクロ波共振器内のマイクロ波にコヒーレントに変換できることを示した。

強磁性体中のマグノンを使ったこの実験が刺激となり、量子光学の観点から強磁性体中のマグノンを光で操作するオプトマグノニクスという研究分野の創出に繋がった

### b) ウィスバリングギャラリモード光共振器を利用した静磁波モードと光間の相互作用の増強

強磁性静磁波モードによるマイクロ波 - 光間の情報変換の変換効率が非常に小さく、上記の実験系の延長線上では、量子の領域でのマイクロ波 - 光間の光子の変換は実現できないことが明確になった。

そこで、変換のボトルネックとなっている静磁波モードと光間の相互作用を増強するために、光共振器を導入した。

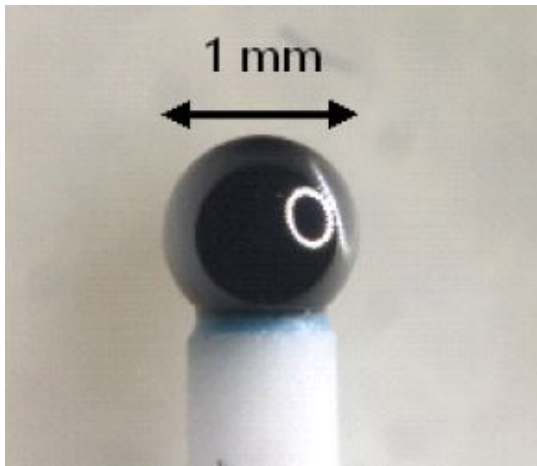


図2 : ささやき回廊モード(WGM)光共振器として使ったYIG球状試料

本実験では、図2に示すような直径1mm程度の球状のYIG試料そのものを光の囁き回廊モード(WGM)共振器として利用し、YIG球内に励起される静磁波モード中のマグノンとWGM中の光子の相互作用を観測した。YIG球内で生じる光のマグノン誘起ブリルアン散乱はこの物理系の時間反転対称性の破れを反映して非相反になる興味深い物理を見出した。

### c) ボルテックス(軌道角運動量)を持つ静磁波モードと光間でのボルテックスの交換

## に関する物理的理解

磁化が一様歳差運動する静磁波モード(キッテルモード)を使った上記の共振器オプトマグノニクスの実験で見出したマグノン誘起ブリルアン散乱の非相反性を系統的に理解するため、キッテルモード以外の様々な静磁波モードに対してもマグノン誘起ブリルアン散乱の非相反性が観測できるかどうかの研究を進めた。

WGMも静磁波モードとともにスピン角運動量だけでなく(一般には)軌道角運動量、すなわちボルテックスを持つ。本実験では、様々な静磁波モードのボルテックスを同定し、マグノン誘起ブリルアン散乱過程によって、WGMと静磁波モードの間でボルテックスが交換されるが、その全軌道角運動量は保存されることを見出した。

本研究は、ボルテックスという量子化された磁気構造(トポロジ)と非相反性との間の興味深い関係を示したことのみならず、オプトマグノニクスに磁気構造という新規の自由度を導入し、オプトマグノニクスの新しい方向性を見出したといえる。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

1)

A. Osada, A. Gloppe, R. Hisatomi, A. Noguchi, R. Yamazaki, M. Nomura, Y. Nakamura, and K. Usami,

“Brillouin Light Scattering by Magnetic Quasivortices in Cavity Optomagnonics”

Phys. Rev. Lett. **120**, 133602 (2018)

DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.133602>

2)

A. Osada, R. Hisatomi, A. Noguchi, Y. Tabuchi, R. Yamazaki, K. Usami, M. Sadgrove, R. Yalla, M. Nomura, and Y. Nakamura,

“Cavity Optomagnonics with Spin-Orbit Coupled Photons”

Phys. Rev. Lett. **116**, 223601 (2016)

DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.223601>

3)

R. Hisatomi, A. Osada, Y. Tabuchi, T. Ishikawa, A. Noguchi, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura,

“Bidirectional conversion between microwave and light via ferromagnetic magnons”

Phys. Rev. B **93**, 174427 (2016)  
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.174427>

4)  
Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura,

“Coherent coupling between a ferromagnetic magnon and a superconducting qubit”

Science **349**, 405 (2015)  
DOI: 10.1126/science.aaa3693

〔学会発表〕(計 14 件)

1)  
Koji Usami  
“Cavity Optomagnonics with spherical magnets”  
Workshop Optomagnonics 2017 (Erlangen, 2017)

2)  
Koji Usami  
“Cavity Optomagnonics with spherical magnets”  
Impurity spins for quantum information and technologies (Okinawa, 2017)

3)  
宇佐見康二  
“共振器オプトマグノニクス”  
豊田理研ワークショップ「スピン秩序の動的  
光制御」(名古屋, 2017)

4)  
Koji Usami  
“Opto-magnonics with Yttrium Iron Garnet”  
62<sup>nd</sup> Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (Pittsburgh, 2017)

5)  
Koji Usami  
“Cavity opto-magnonics with ferromagnetic spheres”  
43<sup>rd</sup> Reimei/GP-Spin/ICC-IMR International Workshop "New Excitations in Spintronics" (Sendai, 2018)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.qc.rcast.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
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

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：

(4) 研究協力者 ( )