

令和元年5月28日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220601

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Hybrid quantum systems based on collective excitation in solid emerging from spontaneously symmetry breaking

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） 181,160,000円

研究成果の概要（和文）：対称性の破れに伴って生じる固体中の巨視的集団励起モードの自由度を単一量子レベルでコヒーレントに制御する手法を開拓した。超伝導回路上の量子状態制御技術ツールとして、他の量子系の量子状態制御を実現する量子ハイブリッド系を構築した。超伝導回路上のマイクロ波伝搬モードの量子状態はもとより、強磁性体中の集団スピン励起であるマグノンモードや、ナノメカニカル素子内の集団原子運動であるフォノンモードなどの量子状態を操作し、スクイーズド状態・粒子数（Fock）状態・量子もつれ状態など非古典的状態を自在に生成し観測する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体素子中の様々な自由度を量子力学的に制御・観測する手法を開発することにより、固体中の集団励起モードの素励起を直接調べることを可能にするとともに、量子技術の適用領域を拡大し量子情報や量子計測応用への可能性を切り拓いた。

研究成果の概要（英文）：We investigated coherent control at the level of single quanta of collective excitation in solid, which emerge in a macroscopic scale as a result of spontaneous symmetry breaking. By using superconducting quantum circuits as a tool, we constructed hybrid quantum systems in which quantum degrees of freedom of other physical systems are coherently controlled. The targets included photons in a propagating microwave mode on a superconducting circuit, magnons as quanta of collective spin excitations in a ferromagnetic crystal, and phonons as quanta of collective motions of atoms in nanomechanical devices. We developed a number of techniques to generate and observe nonclassical states, such as squeezed states, Fock states and entangled states, in those hybrid systems.

研究分野：量子情報科学

キーワード：量子ハイブリッド系 超伝導量子ビット 量子情報 量子計測 ナノメカニクス マグノニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子情報科学の発展とともに、様々な物理系を対象とした量子制御・量子観測技術の向上がなされてきている。量子力学やそれに基づく量子光学の分野では長らく電子・スピン・原子といった微視的な自由度が量子状態制御技術の対象となってきた。古くは原子分光・電子スピン・核スピン共鳴に始まり、最近では 2012 年のノーベル賞の対象となった Haroche や Wineland の共振器量子電磁力学やイオントラップの研究に至るまで、電磁場あるいはその量子としての光子との相互作用を通じて、微視的な自由度の量子状態を制御・観測する技術が積み上げられてきた。一方で、本研究で対象としたような、自発的対称性の破れから固体中に生ずる集団励起モードは、一般的に単一量子レベルでの制御・観測の対象とはなっていなかった。

1980 年に Leggett が巨視的量子コヒーレンスの概念を提示し、巨視的な自由度における量子現象の発現の可能性を議論した。それを契機に超伝導回路における集団励起モード（表面プラズモンポラリトンモード）の量子制御の研究が盛んになり、さらに量子情報科学が注目を集め始めたことで活性化された。その中で本研究代表者らは、固体素子で初の量子ビットの実証例として、電荷の自由度を用いた超伝導量子ビット回路を実現し（Nakamura *et al.*, Nature 1999）、磁束の自由度を用いた量子ビット回路も実現した（Chiorescu *et al.* Science 2003）。その後、超伝導量子回路における量子状態制御の研究は飛躍的に進展し、量子情報処理への応用も目標とする大きな研究分野となっている。一方で、固体中で起こる対称性の破れとそれに伴う集団励起モード（南部・ゴールドストーンモード）の発現は、超伝導回路以外にも多数存在する。強磁性体中のスピン波、結晶格子中の音波はその代表例であり、それぞれマグノン、フォノンという量子に対応する。さらに有限なサイズを持つ系では、離散的な固有モードが形成され、それらを独立した調和振動子として取り扱うことができる。しかしその量子状態を単一量子レベルで制御しようという試みはごく最近まで行われていなかった。本研究を開始した当時、量子ハイブリッド系として、異種量子系を組み合わせる新たな物理や機能の発現を目指す研究が始まりつつあった。特にジョセフソン接合の持つ大きい非線形性のおかげで非調和的な集団励起を扱うことができる超伝導回路を量子制御のツールとして用いることで、マグノンやフォノンなど他の調和モードの励起を単一量子レベルで制御する試みが行われはじめていた。その後、量子技術の適用範囲や応用範囲を広げるために異なる物理系の利点を組み合わせることのできる量子ハイブリッド系が注目を集めることになった。

2. 研究の目的

対称性の破れに伴って生じる固体中の巨視的集団励起モードの自由度を単一量子レベルでコヒーレントに制御する手法の確立を目的として研究を推進した。超伝導・強磁性・結晶秩序などは自発的対称性の破れの典型例である。そこですでにある程度確立している超伝導回路上の量子状態制御技術をツールとして、他の量子系の量子状態制御を実現する量子ハイブリッド系を構築することを目指した。超伝導回路上のマイクロ波モードの量子状態はもとより、強磁性体中の集団スピン励起であるマグノンモードや、ナノメカニカル素子内の集団原子運動であるフォノンモードなどの量子状態を操作し、スクイズド状態・粒子数 (Fock) 状態・量子もつれ状態など非古典的状态を自在に生成し観測する手法を開発することが目標とされた。

3. 研究の方法

固体中の巨視的集団励起モードを構成要素とする量子ハイブリッド系を構築し、超伝導量子回路と他の量子力学的自由度の間で、マイクロ波パルスを駆使したコヒーレント制御の実現や量子限界測定に取り組んだ。またマイクロ波のみならず光と固体中の巨視的集団励起モード間のコヒーレントな相互作用の可能性も探索した。特に以下の研究項目に重点を置いた。

- (1) 超伝導量子回路におけるマイクロ波非古典量子状態の生成と観測
- (2) 強磁性体単結晶中の単一マグノン量子状態制御・観測およびスピン集団励起と光子との相互作用の増強
- (3) オプトエレクトロナノメカニクスにおける機械振動子の基底状態実現および単一フォノン極限での制御と観測、さらにフォノンと光子の相互作用の増強

特に項目(2)、(3)に関してはマイクロ波と光の両面からのアプローチを行った。

4. 研究成果

- (1) 超伝導回路におけるマイクロ波量子状態制御および観測

超伝導量子ビットはジョセフソン接合を含む非調和的な超伝導共振回路として理解することができる。共鳴するマイクロ波を照射することにより、他の準位を励起することなく、エネルギーの最も低い 2 つの準位の間でラビ振動を起こして重ね合わせ状態を制御することが可能である。さらに線形共振回路と結合することにより、共振回路中に閉じ込められたマイクロ波光子状態を制御することも可能になり、いわゆる回路量子電磁力学の研究対象となる。本研究ではこれらをツールとして用いて、特に導波路中を伝搬するモードの量子状態制御と観測に新しい結果をもたらした。

可視光や赤外光の単一光子検出器は市販されているが、それに比べてエネルギーが 4~5 桁も小さいマイクロ波光子の単一光子検出は従来の技術では不可能であった。本研究では、超伝導量子ビットと非共鳴的に結合した超伝導共振器でマイクロ波の 1 次元導波路を終端するという

構成で、2つの方式のマイクロ波単一光子検出器を提案・実証した。最初の方式では、量子ビットを強くマイクロ波駆動したときに共振器と量子ビットの間に生じるドレド状態を利用して型の3準系を実現した。そこに信号マイクロ波光子が入射した際に、量子干渉効果により決定論的なラマン遷移過程が起こることを利用して、光子を高効率で吸収し、それにより量子ビットが励起される様子を観測する[論文]。この方法で、約20 MHzの動作帯域内で任意の波束形状を持つマイクロ波単一光子を量子効率66%で検出することに成功した[論文]。また第2の方法は、量子ビットを予め基底状態と励起状態の重ね合わせ状態に準備しておき、共振器に入射した信号光子の反射に際し量子ビットの位相が反転することを利用して、光子と量子ビットの量子もつれゲートを実現し、直後に量子ビットを射影測定することにより、光子が飛来したか否かを判別するものである。この方法で、世界最高の量子効率84%を実現し、さらに検出後にも反射された光子は吸収されることなく状態を保っていること、すなわち量子非破壊測定が実現していることを量子トモグラフィにより検証した[論文]。

また、マイクロ波連続伝搬モードを超伝導共振器に入射し、それと結合した超伝導量子ビットの励起スペクトルを観測することにより、伝搬モード上の光子数分布を評価する手法を開発した。ジョセフソンパラメトリック増幅器と呼ばれる回路を用いると、マイクロ波連続伝搬モード上の真空スクイズド状態を生成することが可能である。これに対し、上記の方法を用いて評価を行ったところ、光子数分布に偶奇の非対称性が観測され、その非古典性が検証された[論文]。このような手法によるスクイズングの評価はマイクロ波領域で初の実現例である。

超伝導量子ビットと超伝導共振器の組み合わせは高精度の量子ビット制御と観測のための基本的プラットフォームであり、これに高速のフィードバックを組み合わせ、フィードバックの働く量子系における揺らぎの定理の検証とフィードバックによる情報から仕事への変換効率の測定を行った[論文]。この成果は量子系における情報熱力学の研究のさきがけとなるものである。

(2) 量子マグノニクス創成・オプトマグノニクスの開拓

強磁性体中のスピン集団励起はスピン波あるいは静磁波として古くから知られており、中でも磁場中で試料中の全スピンの空間的に一様に歳差運動する強磁性共鳴現象は典型的な例である。この集団励起自由度はキッテルモードと呼ばれており、調和振動子として扱うことができる。本研究ではこのモードの励起の量子としてのマグノンに注目した。

まず、無酸素銅でできたマイクロ波空洞共振器中にイットリウム鉄ガーネット(YIG)の直径0.5 mm程度の単結晶球を配置し、キッテルモードとマイクロ波共振器モードが強く結合することを示した[論文]。ここでは球の中に一方向に揃った(ネットで)約 10^{18} 個の電子スピンの存在し、そのために空洞共振器モードの磁場成分との相互作用が個数のルート倍だけ増強されている。次に同様の空洞共振器にYIG球と超伝導量子ビットを配し、空洞共振器中のマイクロ波モードを介したキッテルモードと量子ビットの強い結合を真空ラビ分裂として観測した[論文]。その後、この相互作用を利用して、YIG球のキッテルモードに励起されているマグノンの個数分布を1つ単位で計測することに成功した[論文]。これらの一連の研究は、量子マグノニクスという新たな分野を切り拓くものであり、これまでに数多く引用されている。

固体中のスピン集団励起は磁気光学効果を介して光ともコヒーレントに相互作用することが可能である。マグノンの自由度を介したマイクロ波から光への量子変換の実現を目指した研究を行った。室温で強磁性共鳴をマイクロ波で駆動しながら(すなわち多数のマグノンを励起しながら)YIG球にレーザーを照射すると、交流ファラデー効果により、光がマグノン誘起ブリルアン光散乱を受けて、サイドバンド光が生成される。これはマイクロ波から光へのコヒーレントな変換とみなすことができる。同様にマイクロ波駆動をオフにし、キッテルモード周波数を差周波に持つ2つのレーザー光をYIG球に入射すると、マグノンが生成され、それがマイクロ波光子となって取り出せることを示した[論文]。まだ変換効率は 10^{-10} 程度と量子変換に要求されるものには遠く及ばないが、スピン集団運動によるマイクロ波-光変換の原理実証となった。この実験はオプトマグノニクスの分野の先駆的な仕事としてその後の研究のさきがけとなり、Nature Photonics誌のハイライト記事でも紹介された。本研究でも、これに続いて、レーザー光をテーパナノファイバーでYIG球上のウィスパーリングギャラリモードと結合し、マグノン誘起ブリルアン光散乱過程に角運動量の保存則に起因する非相反性があることを見出した[論文]。

(3) 量子ナノメカニクスの展開

物体に作用する光の輻射圧は古くから知られた効果である。光を共振器に閉じ込めると、光子が何度も鏡に反射するため、輻射圧相互作用が増強され、1光子レベルでの量子力学的効果が重要になってくる。同様な実験は超伝導量子回路の上でも行われており、共振器オプトメカニクス・エレクトロメカニクスとして活発に研究されている。

本研究では、まず窒化シリコンメンブレンの機械振動モードの基底状態冷却に取り組んだ。メンブレンに電極を蒸着し、それをシリコン基板上の対抗電極と約300 nmの間隔で対向させて固定した。これによりメンブレンの機械的振動が並行平板キャパシタを変調することになる。このキャパシタを超伝導空洞共振器に埋め込み、マイクロ波共振モードと機械振動モードが結合するようにする。これは輻射圧相互作用と同様の結合をもたらす。ここで共振器周波数(約

7 GHz) よりも機械振動周波数 (約 1 MHz) だけ低い周波数を持つマイクロ波を照射すると、原子の重心運動のレーザー冷却と同じ原理により、機械振動モードのフォノンが汲みだされるサイドバンド冷却が起こり、機械振動モードが冷却される。本研究では、希釈冷凍機中で約 500 個の熱励起フォノン占有状態からスタートして、最終的に平均フォノン数 0.5 個、すなわち振動の量子基底状態のごく近くまで冷却できることを示した[論文]。この論文で示した空洞共振器とナノメカニカル素子との結合方式は、その後の研究で他のチームによっても採用されている。

メンブレンの機械振動子は共振周波数が低く、基底状態への冷却がようやく達成できたもののそれ以上の展開が困難と判断し、より高い共鳴周波数を持つ表面弾性波 (SAW) 共振器の研究へ移行した。表面弾性波は基板表面を伝搬する音響モードであり、厚さ方向に波長程度の深さまでに局在している。 piezoelectric 効果を利用して楕型電極により生成・検出され、また周期電極によるブラッグ反射を利用して共振器を構成することが可能である。弾性波の音速の遅さゆえ波長が短く、コンパクトな高周波回路としてモバイル機器などに広く応用されている。本研究では、その SAW 共振器中のフォノンを量子極限で検出することを試みた。超伝導マイクロ波共振器と結合した超伝導量子ビットを piezoelectric 効果により水晶基板上の SAW 共振器と結合し、量子ビットの非線形性を利用したパラメトリック駆動により、フォノンをマイクロ波共振器中の光子へ上方変換し、その光子を検出することにより、熱励起フォノン雑音スペクトルを観測することに成功した。その結果、約 800 MHz の周波数を持つ SAW 共振器モードが希釈冷凍機の最低温度環境下で熱励起占有数約 0.57 であることを決定し、この測定方法がフォノン 1 個レベルの信号に対して十分な感度を持つことを示した。またフォノン - マイクロ波光子の間の内部量子変換効率が 0.39 であることを見出し、その向上への指針を明らかにした[論文]。その後の研究で、実際に相互作用の増強を実現し、他のオプト・エレクトロメカニクス研究にさきがけて、マイクロ波光子 1 光子レベルのプロープ信号強度で SAW 共振器モードの直交位相振幅の量子限界計測が可能になるほどの強い結合を実現している [arXiv:1808.03372]。

ナノメカニカル素子を介したマイクロ波と光の間の量子変換技術も注目されている。本研究でも、LiNbO₃ 光導波路と表面弾性波共振器の間の光弾性相互作用を介した結合を利用した電気光学 (EO) 変調素子の評価などを行い、高い変換効率を実現する目途を得ている。また派生技術として、通常電氣的な信号増幅により検出されている核磁気共鳴 (NMR) 信号をメンブレンの機械振動を介して光信号に変換して検出する技術を提案・実証した[特許]。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 28 件)

Y. Tabuchi, S. Ishino, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, and Y. Nakamura, Hybridizing ferromagnetic magnons and microwave photons in the quantum limit, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 083603 (2014).

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).

K. Koshino, K. Inomata, Z. R. Lin, Y. Nakamura, and T. Yamamoto, Theory of microwave single-photon detection using an impedance-matched Λ system, *Phys. Rev. A* **91**, 043805 (2015).

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).

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).

K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura, Single microwave-photon detector using an artificial Λ -type three-level system, *Nature Commun.* **7**, 12303 (2016).

A. Noguchi, R. Yamazaki, M. Ataka, H. Fujita, Y. Tabuchi, T. Ishikawa, K. Usami, and Y. Nakamura, Ground state cooling of a quantum electromechanical system with a silicon nitride membrane in a 3D loop-gap cavity, *New J. Phys.* **18**, 103036 (2016).

D. Lachance-Quirion, Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, and Y. Nakamura, Resolving quanta of collective spin excitations in a millimeter-sized ferromagnet, *Sci. Adv.* **3**, e1603150 (2017).

S. Kono, Y. Masuyama, T. Ishikawa, Y. Tabuchi, R. Yamazaki, K. Usami, K. Koshino, and Y. Nakamura, Nonclassical photon number distribution in a superconducting cavity under a squeezed drive, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 023602 (2017).

A. Noguchi, R. Yamazaki, Y. Tabuchi, and Y. Nakamura, Qubit-assisted transduction for a detection of surface acoustic waves near the quantum limit, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 180505 (2017).

S. Kono, K. Koshino, Y. Tabuchi, A. Noguchi, and Y. Nakamura, Quantum non-demolition detection of an itinerant microwave photon, *Nature Physics* **14**, 546 (2018).

Y. Masuyama, K. Funo, Y. Murashita, A. Noguchi, S. Kono, Y. Tabuchi, R. Yamazaki, M. Ueda, and Y. Nakamura, Information-to-work conversion by Maxwell's demon in a superconducting circuit

quantum electrodynamical system, Nature Commun. **9**, 1291 (2018).

他 16 件

〔学会発表〕(計 257 件)

国際学会 (招待講演) 70 件

Y. Nakamura, “Impedance-matched Λ system in a superconducting waveguide”, ITAMP Workshop on Light-matter interactions in low dimensions, Jun 29, 2015, Cambridge, MA, USA

K. Koshino, K. Inomata, Z. R. Lin, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura, “Theory of deterministic switching of a superconducting qubit induced by single microwave photons”, 15th Internal Superconductive Electronics Conference, Jul 9, 2015, Nagoya, Japan

Y. Nakamura, “Quantum magnonics: hybridizing magnons with a superconducting qubit”, Gordon Research Conference on Spin Dynamics in Nanostructures, Jul 26-31, 2015, Hongkong, China

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

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

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

Y. Nakamura, “Hybrid quantum systems using magnons in a ferromagnetic crystal”, International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2016), Jul 7, 2016, University Town, Singapore

K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, J. S. Tsai, T. Yamamoto, and Y. Nakamura, “Single microwave-photon detector for quantum information”, International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD 2016), Nov 15, 2016, Tsukuba, Japan

Y. Nakamura, “Fluctuation relations and Maxwell’s demon in a circuit QED setup”, APS March Meeting 2017, Mar 13, 2017, New Orleans, USA

K. Usami, “Cavity optomagnonics with spherical magnets”, Optomagnonics Workshop, Jun 27, 2017, Erlangen, Germany

K. Usami, A. Osada, R. Hisatomi, A. Gloppe, Y. Nakata, A. Noguchi, R. Yamazaki, Y. Tabuchi and Y. Nakamura, “Opto-magnonics with yttrium iron garnet”, 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2017), Nov 8, 2017, Pittsburgh, USA

Y. Tabuchi, “Sensing magnetization oscillation in quantum regime”, APS March Meeting 2018, Mar 5-9, 2018, Los Angeles, USA

Y. Nakamura, “Hybrid quantum systems based on surface acoustic waves”, 23rd Australian Institute of Physics Congress (AIP2018), Dec 9-13, 2018, Perth, Australia

他 57 件

国際学会 (一般講演) 81 件

国内学会 (招待講演) 37 件

国内学会 (一般講演) 69 件

〔図書〕(計 1 件)

T. Yamamoto, K. Koshino, and Y. Nakamura, “Parametric amplifier and oscillator based on Josephson junction circuitry” in Principles and Methods of Quantum Information Technologies (Lecture Notes in Physics), Eds. Y. Yamamoto and K. Semba (Springer, Berlin, 2016) pp. 495-513. Published on Dec 31. 2015.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 磁気共鳴装置および方法並びにオプトエレクトロメカニクス測定装置
/ Magnetic Resonance Device and Method

発明者: 山田和彦, 武田和行, 宇佐見康二, 中村泰信, 山崎歴舟, 野口篤史, 長坂健太郎, 高橋雅人, 岩瀬英治

権利者: 国立大学法人高知大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-160376 / PCT/JP2017/029569

出願年: 2016 年 / 2017 年

国内外の別: 国内 / 海外

〔その他〕

解説記事 7 件

関連報道 19 件

ホームページ等 <http://www.qc.rcast.u-tokyo.ac.jp/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：石川 豊史

ローマ字氏名：(ISHIKAWA, Toyofumi)

研究協力者氏名：野口 篤史

ローマ字氏名：(NOGUCHI, Atsushi)

研究協力者氏名：グロウプ アーノ

ローマ字氏名：(GLOPPE, Arnaud)

研究協力者氏名：ラシャンス - キリオン ダニー

ローマ字氏名：(LACHANCE-QUIRION, Dany)

研究協力者氏名：猪股 邦宏

ローマ字氏名：(INOMATA, Kunihiro)

研究協力者氏名：リン ツィーロン

ローマ字氏名：(LIN, Zhirong)

研究協力者氏名：山本 剛

ローマ字氏名：(YAMAMOTO, Tsuyoshi)

研究協力者氏名：日高 睦夫

ローマ字氏名：(HIDAKA, Mutsuo)

研究協力者氏名：オリバー ウィリアム

ローマ字氏名：(OLIVER, William)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。