

強磁性絶縁体イットリウム鉄ガーネット中の 静磁波モードにおける緩和現象の探究

Exploring Relaxation Mechanism in Yttrium Iron Garnet Using a Superconducting Qubit.

H27助自59

代表研究者	田 渕 豊	東京大学 先端科学技術研究センター 助教
	<i>Yutaka Tabuchi</i>	<i>Research Associate, Research Center for Advanced Science and Technology, The university of Tokyo</i>
共同研究者	中 村 泰 信	東京大学 先端科学技術研究センター
	<i>Yasunobu Nakamura</i>	<i>Research center for advanced science and technology, The university of Tokyo</i>
共同研究者	宇 佐 見 康 二	東京大学 先端科学技術研究センター
	<i>Koji Usami</i>	<i>Research center for advanced science and technology, The university of Tokyo</i>
共同研究者	山 崎 歴 舟	東京大学 先端科学技術研究センター
	<i>Rekishu Yamazaki</i>	<i>Research center for advanced science and technology, The university of Tokyo</i>

We demonstrate dispersive coupling between a superconducting qubit and a magnetostatic mode for exploring microscopic behavior in spin excitations in ferromagnets. Spin waves, called magneto-static modes in the long wavelength limit, are collective modes in rigid ordered spin systems. Yttrium iron garnet being typical ferromagnetic insulator has long been investigated for the microscopic origin of the linewidth of magneto-static modes at cryogenic temperatures. In the quantum limit where thermally-excited spin waves become very few with a typical ambient temperature down to 10 mK for spin excitation frequency of 10 GHz, spin wave behaves quantum mechanically, i.e., spin wave has properties of wave and particle simultaneously. Obvious signature is that energy of spin wave is discretized and restricted to the multiple of $\hbar f$, where $\hbar$ is Planck constant and f is the excitation frequency of spin wave. Nobody has reached to investigate relaxation behavior in the quantum limit.

Here we demonstrate a method to count such discretized spin-wave excitation in ferromagnetic insulator utilizing a superconducting qubit. Superconducting qubits are promising candidate for quantum computing as well as fundamental element in quantum information processing. The simplest qubit consists of two distinct electrodes shunted by a non-linear inductor formed by a Josephson junction. We have succeeded to couple the superconducting qubit and a magneto-static mode in yttrium iron garnet via microwave cavity. The induced coupling exchanges a single discretized energy quantum between the magneto-static mode and the qubit. When the qubit and magneto-static mode frequencies are detuned, energy exchange is suppressed by the energy conservation law. Instead, residual phase interaction induces qubit frequency shift depending on the excitation numbers in the magneto-static mode. Observed qubit spectrum splitting as well as excitation power dependency of spin-wave clearly shows that we can count the excitation numbers in ferromagnet in the quantum regime.

研究目的

イットリウム鉄ガーネットが代表する強磁性絶縁体は、万能な磁性材料として古くから知られている。強磁性相にあるスピンのダイナミクスは、1950年代から精力的に研究が続けられてきた。強磁性体へのマイクロ波照射により、マグノンとよばれる集団スピン励起を誘起し、その時間発展の様子や減衰の様子から物質固有のダイナミクスを得る。絶縁体は伝導電子による散乱が無いためスピンの緩和時間が長く、今日の緩和現象に関する実験・理論的な研究の礎となっている。

我々は強磁性絶縁体の量子極限下における制御に取り組んできた。その中でもとりわけイットリウム鉄ガーネット中の静磁波モードの一つである、均一歳差運動モード(キッテルモード)に注目している。このモードは全てのスピンが同相で歳差運動するため、均一なマイクロ波磁場により励起・観測が可能である。2015年に我々は超伝導量子ビットとの結合を考案した。我々は強磁性絶縁体と空洞共振器を用いる方法を考案し、4cm空間的に離れた場所に超伝導回路を作動させたとしても強磁性体と超伝導量子ビットが強結合することを実験的に実証した。量子情報処理を行う上で大きな問題点は、強磁性体スピンの緩和時間である。通常の金属強磁性体に比べると数桁長い緩和時間を持つ強磁性絶縁体であるが、過去文献中に報告されたイットリウム鉄ガーネット試料のキッテルモード緩和時間は最長320ナノ秒(4ケルビン下)と、高い信頼性を維持しながら量子情報処理を行うには短い。

本研究はイットリウム鉄ガーネットの試料中における緩和の様子を、量子極限において統合的に調べることを目的とする。我々は従来から知られている強磁性共鳴に加え、超伝導量

子ビットやマイクロ波量子光学の手法を適用することができる。超伝導量子ビットは量子情報処理のみならず、量子極限における物性値を調べる新奇ツールにもなり得る。マイクロ波量子光学は非古典的なマイクロ波状態を探究する学問である。緩和するスピンのダイナミクスを今までにない切り口から調べ、量子力学的理解に迫る。

概 要

本研究は強磁性体中のスピン波励起の微視的な緩和現象に迫るものである。強磁性体中のスピンの波、とりわけ球状試料におけるスピンの位相が揃って歳差運動するスピン波(静磁波)を均一歳差運動モードと呼ぶ。本研究ではこの均一歳差運動モードの微視的な緩和現象を調べるため、超伝導量子ビットを用いた新たな測定手法を開発した。

強磁性体にはイットリウム鉄ガーネット(YIG)を用いる。YIGはマイクロ波発振器の静磁場可変フィルタ共振器に用いられるなど、マイクロ波との親和性が古くから知られている。このYIG試料に0.3 Tの静磁場を印加すると、強磁性体中のスピンは約10 GHzにて歳差運動する均一歳差運動モードを持つ。均一歳差運動モードは全てのスピンが同じ方向を向いて歳差運動するため、最大の磁気双極子モーメントを持ち、マイクロ波磁場との結合強さが最大となることが特徴である。この静磁波モードに起因する磁気共鳴現象は強磁性共鳴呼ばれ、古くから研究が行われている。YIGはこの緩和時間が長いことで知られ、緩和現象機構探究の典型的な物質である。

10 GHzの静磁波に対し環境温度が10mK程度となると、環境の熱雑音による励起がほとんど無い状況となる。この状況を量子極限と呼び、波の粒子的な性質が顕著となる。例えば

静磁波励起は励起エネルギーに応じて歳差運動する静磁波であったが、この極限ではその励起エネルギーが離散化(量子化)する。励起エネルギーは励起周波数のプランク定数倍の値しかとる事を許されず、静磁波励起の励起エネルギー量子が0個、1個、2個…と数えられることとなる。我々はこの極限下における励起エネルギー量子の振る舞いを観察する。

均一歳差運動モードが相互作用するマイクロ波電磁場を単一の電磁場モードに限定するために、 $5.3 \times 2.4 \times 0.3 \text{ cm}^3$ という横長の空洞共振器を設計しTE102共振器モードに注目する。超伝導量子ビットはシリコン基板上に形成したアルミニウム電極と、アルミニウム/酸化アルミ/アルミニウムによるジョセフソン接合からなる。アルミニウム電極からなるキャパシタンスと、ジョセフソン接合に由来する等価インダクタンスの比を適切に調整すると、量子ビットが形成される。この量子ビットは約 $0.7 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$ の大きさであり、アルミニウム電極により電気双極子アンテナを形成する。この双極子アンテナが空洞共振器と相互作用する。

超伝導量子ビットを用いて均一歳差運動モードの振る舞いを観察するために、両者を結合する。我々はTE102共振器モードを介して超伝導量子ビットを電氣的に、均一歳差運動モードを磁氣的に相互作用させることでこれを実現した。均一歳差運動モードと超伝導量子ビットの励起エネルギーが縮退する状況においては、TE102共振器モードを介した間接相互作用が誘起される。我々はこの状況下において量子ビット周波数と均一歳差運動モード周波数を離調した状況を考察する。両者のエネルギーが異なると、エネルギー保存則に起因しエネルギーの交換が抑制されている。その一方で位相に関する相互作用を生じ、分散結合と呼ばれる。

分散結合下の均一歳差モードと超伝導量子ビットは、その相互作用によりお互いの状態に応じて周波数シフトが生じる。我々は均一歳差運動モードの周波数が超伝導量子ビットの状態に応じて変化するとともに、超伝導量子ビットの共鳴周波数が均一歳差運動モードの励起エネルギー量子数で変化することを世界で初めて観測した。また静磁波励起電力に応じた量子ビットのスペクトルの詳細な解析から、平均静磁波励起量子数を求め、励起電力に比例することを示した。

熱雑音の無い量子極限において、スピン波の励起エネルギーは究極的に粒のように離散化する。従来であれば波として存在するスピンの波は、量子極限において粒のように離散化する。その粒の有無を情報の0と1に対応させる新しい量子情報処理に関する研究が広がりつつある。本成果は超伝導量子ビットを超高感度検出器として利用することにより、スピン波の励起エネルギー量子の個数を数えられる新たなツールを提供する。励起エネルギーの個数分布統計やスピン波の緩和に由来する個数変化のリアルタイムな観察は、量子極限下におけるスピン緩和機構に従来と異なる視点で知見を与え、磁石という身近な物質の理解に新たな道を拓く。

— 以下割愛 —