

強磁性体を用いた量子中継器：信号処理超伝導回路の開発

Quantum repeaters using ferrimagnet : development of
quantum signal processing superconducting circuits

2161901



研究代表者

東京大学先端科学技術
研究センター

助教

田 渕 豊

共同研究者

東京大学先端科学技術
研究センター

教授

中 村 泰 信

[研究の目的]

我々はイットリウム鉄ガーネット単結晶と超伝導量子ビットを用いた量子中継器の実現を目指している。量子力学では情報は0と1の2値を取ることに加えてその重ね合わせが許され、情報は観測されるまで分からず確率的となる。その量子力学的な情報量を記憶する素子を量子ビットと呼ぶ。本研究は量子力学が素子のふるまいを支配する極限下において、量子ビットの情報を光ファイバーネットワークに接続し、量子力学が安全を保障する鍵交換技術や秘匿通信技術を開拓するものである。

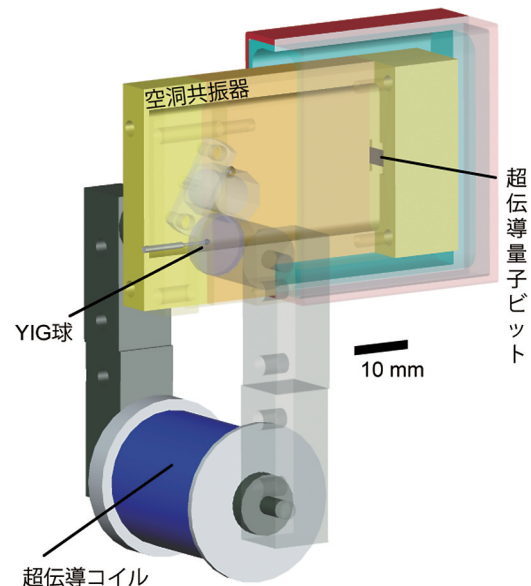


図1 強磁性体・超伝導量子ビット結合系

[研究の内容, 成果]

1. 強磁性体中の磁化の量子と超伝導量子ビットとの結合系

超伝導回路を用いた量子ビットは量子情報処理素子として注目されており、量子コンピュータの心臓部として期待されている。シリコン基板上にアルミニウム薄膜を蒸着することにより二つの電極によるキャパシタを設け、電極間にジョセフソン接合と呼ばれる非線形インダクタを形成する。この構造は非線形LC共振回路として動作し、10 ミリケルビンという極低温下

において電極間の電荷の分布に依存した2状態を取る。この状態を情報の0と1に対応させる。イットリウム鉄ガーネット(YIG)は、その量子ビットの情報を光信号へ変換する素子として期待されている。YIG中の電子スピンの静磁場を印加すると、ゼーマンエネルギーに対応する周波数においてスピンは歳差運動する。静磁場下のYIG単結晶中の電子スピンは大きな交換相互作用により隣同士同じ方向を向くことを強制される。そのため、試料表面を境界条件とするスピン波という歳差運動モードが生じる。

スピン波モードのエネルギー励起は量子力学的な描像の上で波動のみならず粒子としての性質を持ち、その離散的なエネルギー量子をマグノンと呼ぶ。スピン波の量子状態制御は、操作性の高い超伝導量子ビットを通じて行われる。超伝導状態は強大な磁場の印加により破壊されてしまうため、スピン波と超伝導量子ビットの直接的な結合は技術的に難しい。本研究では電磁場を介した結合を提案する。数センチという空間的に離れた超伝導量子ビットと YIG 試料中のスピン波は、共振器中の電磁場を介して結合する（図 1）。

2. 量子化したマグノン数の検出実験

光による量子情報の配送は、光子数が 0 個や 1 個という微弱電力により行われる。ここで光子とは電磁波の一種である光を、量子力学的に取り扱うことによるエネルギー量子を意味する。マグノンは量子中継器の中で、光からマイクロ波への情報担体となる。本研究ではマグノンが量子力学的に振る舞うことを確認するために、マグノン数の測定実験を行った。この技術は将来的に光信号から変換されるスピン波の検出技術となり量子中継技術に必須である。

実験装置の概略を図 1 に示す。横長の空洞共振器に超伝導量子ビットのシリコン基板が固定され、同時に酸化アルミニウム棒に固定された YIG 球状試料が取り付けられている。YIG 試料には永久磁石と超伝導コイルにより 0.3 テスラ程度の静磁場が印加されている。超伝導量子ビットと YIG 試料中のスピン波には直接的な相互作用は無いが、空洞共振器を介して間接的に相互作用する。我々は図 1 の構造を最適化して適切な周波数関係を選ぶことにより、超伝導量子ビットの共鳴周波数が YIG 試料中のスピン波の離散的なマグノン数に依存する相互作用の実現に成功した。励起マグノン数の情報が量子ビットの共鳴周波数または位相情報に対応するために、励起数の観測は量子ビットの共鳴を分光することにより得られる。実験は希釈冷凍機を用いて 10 ミリケルビンという極低温下に

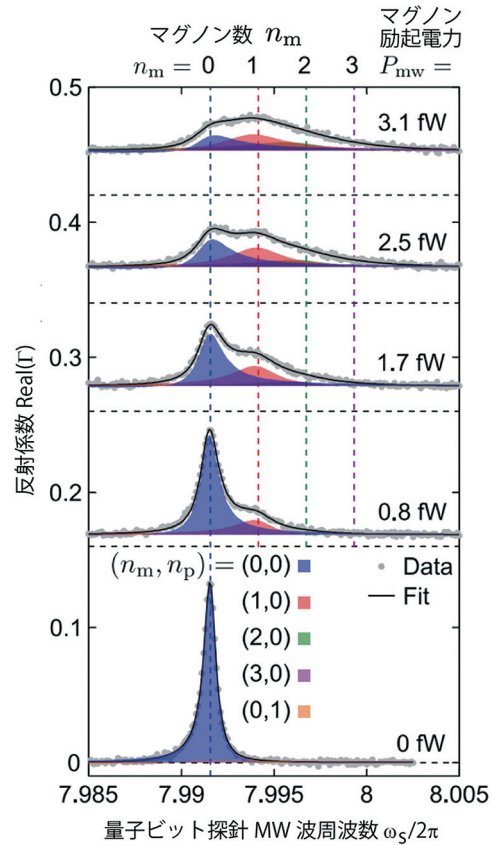


図 2 超伝導量子ビットの分光スペクトルの、マグノン励起電力 P_{mw} 依存性。

で行った。この温度域では熱雑音に由来する量子ビット、スピン波、共振器の熱励起が限りなく小さくなり、量子力学が振る舞いを支配する理想的な環境となる。

図 2 に観測により得られた量子ビットスペクトルをスピン波励起電力の大きな順に示す。超伝導量子ビットの分光スペクトルを得るために、量子ビットを微弱なマイクロ波により励起する。この様子をマイクロ波共振器の反射係数の変化として読み取っており、図中縦軸は量子ビット励起占有数に対応する。スピン波励起の無い（すなわちマグノンの存在しない）状態が図中最下段（励起電力=0 フェムトワット）に示されている。このとき超伝導量子ビットの共鳴線は単一のローレンツ線形を示す。次にスピン波を選択的に励起する周波数を持つマイクロ波によりスピン波を励起する。スピン波が励起されるにつれて量子ビットの共鳴線は分裂し、その線形は縦の点線で示す位置における共鳴線の重

ね合わせで記述される（図中 $P_{mw}=0.8, 1.7, 2.5, 3.1$ フェムトワット）。点線は量子化されたマグノンの個数状態に対応する量子ビットの周波数シフトの位置を示している。このようにスピン波の個数に対応して量子ビット周波数が離散的に分裂し、励起マグノン数を与えることが分かる。それぞれの個数に対応するピークの面積はマグノン数の占有率に対応する。これらの様子はマグノンがエネルギー粒子として量子化されたことを初めて示した例であり、マグノンが光からマイクロ波、または超伝導回路への橋渡しをする役割を持つことを示している。これらの内容は米国 AAAS の Science Advances 誌に出版された。

3. 量子ビット間の相関粒子対生成実験

磁性体を用いた量子中継器において、マグノンと超伝導量子ビットを用いて量子中継操作を行うためには、両者に相関対を生成する必要がある。本研究では超伝導量子ビット間に相関対を生成することを試みる。図3に量子ビット間に相互作用を誘起する空洞共振器の写真を示す。超伝導量子ビットは空間的に約15ミリメートル離れた位置に配置され、両者は直接相互作用しない。両者は空間的に共通する電磁波モードを電気双極子相互作用を通じて共有しており、二つの量子ビットと電磁波モードとの周波数離調が大きな際に両者に実効的な相互作用が誘起される。量子ビット周波数間にも離調が導入されており、通常は量子ビット間は相互作

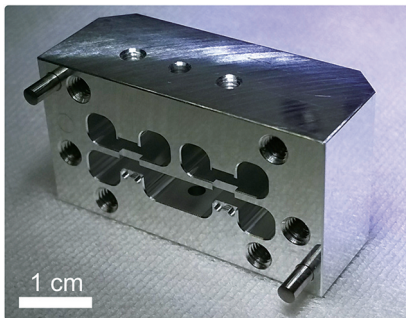


図3 量子ビットの相関対生成に用いられるマイクロ波共振器（片側）。三つの空洞のうち、横長の大きな空洞が量子ビット間の相互作用を誘起する。

用しない。我々は量子ビット間励起を実効的に誘起する交差共鳴量子ゲートを採用し、マイクロ波パルスオンオフにより相互作用を制御することで相関対生成を実装する。図4に相関対生成の実験に用いたマイクロ波の変復調回路を示す。用いられる周波数は6~12 GHzを想定している。FPGAを搭載したDA変換器基板を制御パルスの信号源として用い、混合器や帯域通過フィルタ、合波器、増幅器を組み合わせる実験系を構築した。実験に用いられる周波数は量子ビットの遷移周波数により決定され、その値は冷凍機内で測定するまで値が定まっていない。そのため我々は帯域通過フィルタを複数作成し（図5）、数々の周波数帯の信号に対応できるように実験系を調整した。実験中に信号送信に用いられる増幅器のわずかな雑音（-140 dBm/Hz）であっても量子ビットの制御品質に影響があることが分かり、フィルタの導入により劇的に改善した。この回路は前述のマグノン

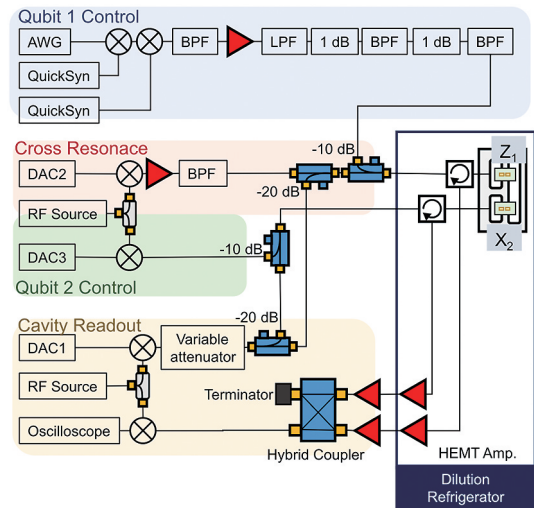


図4 マグノンまたは量子ビット間の制御のために構成したマイクロ波変復調器

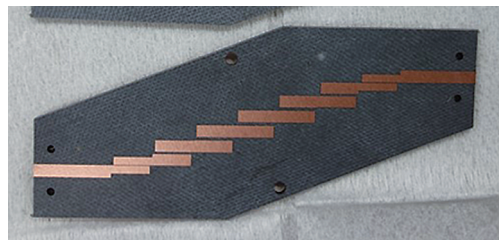


図5 6~12 GHz バンドパスフィルタ

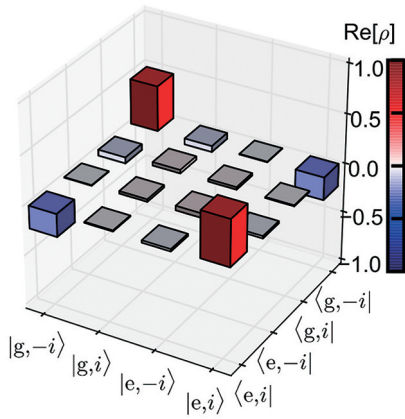


図6 相関対状態の密度行列の実部

数検出実験にも用いられている。

交差共鳴ゲートを改良し、漏話等による制御誤りに対して耐性を持たせた改良交差共鳴量子ゲートを用い、二つの量子ビット対して相関対生成実験を行う。図6に生成された相関対状態の密度行列の実部を示す。ここで密度行列とは量子力学的な状態の標準的な表現手法である。行列の非対角成分と呼ばれる四隅にピークが見られるほど相関の強い状態が得られていることを示し、図から四隅にピークの生じた相関対が生成されていることが分かる。この状態は量子力学的に $|g, -i\rangle + |e, i\rangle$ というもつれ状態の近似だと考える。このもつれ状態は片側の量子ビットが g とラベルされた状態の場合に、必ずもう一つの量子ビットが i という状態に一意に決まっており、片側の状態の測定結果が他方の測定結果に必ず相関する。この状態を相関対状態（もつれ状態）と呼ぶ。ここで相関対の情報量を通常の「ビット」にならい「eビット」を導入すると、約0.5 eビットが得られたことが分かった。これは2回に1回程度相関対生成に成功していることを意味している。

[今後の研究の方向、課題]

本研究の一連の成果により、量子中継器の信号処理部に必要な要素技術の基礎部分の開発を完了することができた。とくに微弱な量子力学

的な物理量を制御するためのマイクロ波変復調装置の開発は、今後の量子中継器実現のための要となる。図6に示した相関対状態の情報量は0.5 eビットと、理想値の約50%であった。この値の改善のためには、さらに高度な交差共鳴量子ゲートの開発が必要となる。我々は量子ビットに複雑なマイクロ波パルスを変調して印加することで高精度な制御ができることを計算機シミュレーションにより示した（米国物理学会, PhysicalReviewA 誌に掲載）。この手法を適用することで、さらに高精度の相関対生成が期待できる。また量子中継器の実現のためには、相関対を秘密鍵交換手続き（通信）終了時まで損失無く維持する機構を必要とする。この機構は近年盛んに研究されている量子コンピュータとも関連し、量子状態の維持機構の実現は量子情報処理実験における一つの聖杯とも言われている。今後は開発した装置群を用いてこれらの要素技術開発に取り組み、物理学が保証する秘匿情報通信の実現に貢献したい。

[成果の発表、論文等]

- [1] Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, K. Usami, Y. Nakamura, Quantum magnonics: The magnon meets the superconducting qubit, Comptes Rendus Physique 17, 729-739 (2016).
- [2] D. Lachance-Quirion, Y. Tabuchi, S. Ishino, A. Noguchi, T. Ishikawa, R. Yamazaki, Y. Nakamura, Resolving quanta of collective spin excitations in a millimeter-sized ferromagnet, Science Advances 3, e1603150 (2017).
- [3] Y. Tabuchi, M. Negoro, M. Kitagawa, Design method of dynamical decoupling sequences integrated with optimal control theory, Physical Review A 96, 022331 (2017).
- [4] 田淵 豊, 超伝導量子ビットを用いた強磁性体マグノンの観察, 第22回スピン工学の基礎と応用, 大阪大学 (2017年12月5日).
- [5] Yutaka Tabuchi, Sensing magnetization-oscillation in quantum regime, 米国物理学会, ロスアンゼルス (2018年3月5日).