

磁石の中の量子を数える

～量子コンピュータの要素技術を応用し、磁石の持つ量子的振る舞いを定量化～

1. 発表者：

中村 泰信（東京大学先端科学技術研究センター 量子情報理工学分野 教授）
田淵 豊（東京大学先端科学技術研究センター 量子情報理工学分野 助教）

2. 発表のポイント：

- ◆ 磁石の量子的振る舞いを初めて定量的に観測しました。
- ◆ 超伝導回路上の量子ビット素子を検出器として用いて、ミリメートルサイズの磁石の中に生じた集団スピン運動の量子である「マグノン（注1）」の数の分布を1つずつ計測することに成功しました。
- ◆ 量子コンピュータの要素技術である超伝導回路上の量子ビット素子（注2）は、マグノンのような他の物理系と組み合わせたハイブリッド量子技術の確立により、新たな高感度センサー技術などへの応用が期待されます。

3. 発表概要：

東京大学先端科学技術研究センターの中村泰信教授および田淵豊助教らの研究グループは、理化学研究所創発物性科学研究センターとの共同研究により、磁石の中に生じた集団スピン運動の量子である「マグノン」の数を1つずつ計測することに世界で初めて成功しました。

これまで磁石（強磁性体）中の集団スピン運動を、単一量子レベルで定量的に評価する技術はありませんでした。そこで研究グループは量子コンピュータの要素技術として注目されている超伝導回路上の量子ビット素子を超高感度な検出器として用い、球状の強磁性体単結晶試料中に励起されたマグノンを計数し、その分布を明らかにしました。このように超伝導量子ビット素子とマグノンとを量子状態を保ったまま組み合わせるハイブリッド量子技術を用いることで、超伝導量子ビット素子が物質の量子力学的な振る舞いに対する、新しい検出器となりうることが示されました。

今後、超伝導量子ビット素子を他の物理系と融合させたハイブリッド量子系を実現させることにより、新しいセンサー技術の開発への応用とともに、量子情報処理技術（注3）の深化につながると期待されます。

本研究の一部は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業「ERATO中村巨視的量子機械プロジェクト」、日本学術振興会 科学研究費補助金および外国人特別研究員（サマー・プログラム）、文部科学省・イノベーションシステム整備事業「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成」プログラム「ナノ量子情報エレクトロニクス連携研究拠点」、文部科学省「博士課程教育リーディングプログラム」事業「フォトンサイエンス・リーディング大学院」、情報通信研究機構 高度通信・放送研究開発委託研究「量子もつれ中継技術の研究開発」による支援を受けて行われました。本成果は、2017年7月5日（米国時間）に米国科学誌「Science Advances」オンライン版に掲載されました。

4. 発表内容：

<研究の背景>

これまで我々は物質を観測することで、その性質を解き明してきましたが、近年量子技術が飛躍的に向上し、物質の量子的振る舞いを観測する手段が確立され始めています。

また、二つの異なる物理系を量子力学的な状態を保ったまま結合させることにより、技術的な問題などで制御・観測することができなかった物理系を操る方法が広く検討されています。この方法はハイブリッド量子技術と呼ばれています。

研究グループは、これまで量子コンピュータの基盤技術として開発している超伝導量子ビット素子と強磁性体中の集団スピン運動（マグノン）を組み合わせたハイブリッド量子系を実現し、自由自在に制御・観測することで、新たな量子情報処理技術を確立させる研究を行ってきました。

<研究手法と成果>

研究グループは、強磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット（YIG）単結晶の球状磁石を用いました。直径 0.5 ミリメートル（mm）の球状試料の中には、 10^{18} 個程度の微小な磁気的性質を持つ電子に由来するスピン（＝小さな棒磁石）が存在し、それらが同じ方向を指して整列しています。スピン集団における低エネルギーの励起はスピン波と呼ばれており、個々のスピンの歳差運動（注4）がスピン集団全体にわたって波のように伝搬します。量子力学的な観点からみると、粒子と波の二重性（注5）により、スピン波の励起はマグノンと呼ばれる量子の生成として捉えられます。

しかし、これまでに強磁性体中のマグノンを、1つ、2つと直接数える手段は存在しませんでした。そこで研究グループは、超伝導量子ビット素子を通じて強磁性体中のマグノンの情報を取り出せるように、マイクロ波空洞共振器を介して YIG 球状試料と超伝導量子ビット素子を結合するハイブリッド量子系を構築しました（図1）。そして、ハイブリッド量子系の間にはたらく相互作用を制御し、超伝導量子ビット素子の励起エネルギーがマグノンの個数に応じた離散的な値をとる状況を構成しました。この励起エネルギーの違いを観測することでマグノンの計数が可能となります。

研究グループは、希釈冷凍機を用いた 10 ミリケルビン（mK）という環境下において観測を行いました。この温度域ではマグノンの励起個数が 0 個という、集団スピン運動の基底状態を実現することができます。その後マイクロ波を印加し、集団スピン運動を励起した状況下においてマグノンの個数分布を観測しました（図2）。マイクロ波電力を増加すると、マグノンの個数分布が 0 個から徐々に増えていくことが観測され、定量的にも理論的な予想と一致しました（図3）。

<今後の展開>

本研究成果は、超伝導量子ビット素子が、組み合わせ最適化問題の専用計算機である量子アニーリング機械や、幅広い計算問題を効率的に解くことのできる万能量子コンピュータに用いられるだけでなく、ハイブリッド量子技術を適用することにより、物質中の多数の原子が複雑に相互作用することにより生じた巨視的な自由度を持つ物理系の量子力学的な振る舞いに対する新しい検出器となりうることを示しました。今後、超伝導量子ビット素子と様々な物理系のハイブリッド量子系が確立され、超高感度のセンサー技術の開発や量子制御技術を組み合わせた量子情報処理技術のさらなる進展が見込まれます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：Science Advances（オンライン版）

論文タイトル：Resolving quanta of collective spin excitations in a millimeter-sized ferromagnet

著者：Dany Lachance-Quirion, Yutaka Tabuchi, Seiichiro Ishino, Atsushi Noguchi, Toyofumi Ishikawa, Rekishu Yamazaki, Yasunobu Nakamura*

DOI 番号：10.1126/sciadv.1603150

6. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

東京大学 先端科学技術研究センター 量子情報理工学分野

教授 中村 泰信（ナカムラ ヤスノブ）

東京大学 先端科学技術研究センター 量子情報理工学分野

助教 田淵 豊（タブチ ユタカ）

<JST 事業に関するお問い合わせ>

科学技術振興機構 研究プロジェクト推進部

古川 雅士（フルカワ マサシ）

7. 用語解説：

（注1）マグノン：磁石の中に生じた集団スピン運動のエネルギー量子。

（注2）量子ビット素子、超伝導量子ビット素子：量子情報の最小単位。従来の情報の取扱量の最小単位としてビットを用いるのに対し、量子情報では量子力学的2準位系の状態で表現します。古典ビットは0か1かのどちらかの状態しかとることができませんが、量子ビットは0と1だけでなく、0と1の状態の量子力学的重ね合わせ状態もとることができます。超伝導量子ビット素子は、超伝導電気回路上に実現する、人工的に作られた量子力学的2準位系。ジョセフソン接合と呼ばれる2つの超伝導体電極の間に絶縁体バリアが挟まれたトンネル接合を用いた電気回路上で実現されます。

（注3）量子情報処理技術：量子コンピュータ、量子通信、量子暗号など量子力学の物理原理に基づいた情報処理技術の総称。これまでの情報処理技術に対して、根本的な原理の異なる情報処理システムを構築しなければならないが、計算処理能力や通信の安全性などを飛躍的に向上させると期待されています。

（注4）歳差運動：電子スピンの磁場中に置かれたときに、磁場の方向を回転軸にスピンの首を振りながら運動すること。

（注5）粒子と波の二重性：量子力学に特有の性質であり、粒子的な性質と波動的な性質の両方を持つこと。

(関連プレスリリース)

「超伝導量子ビットと磁石の球のハイブリッド～目に見える大きさの磁石の量子力学的振る舞いを明らかに～」 (平成 27 年 7 月 10 日)

http://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/pressrelease/pdf/270710release_rcast.pdf

8. 添付資料：

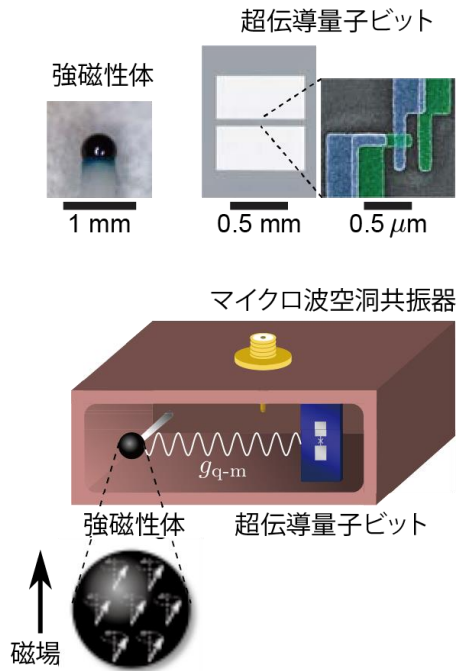


図 1：超伝導量子ビットを介したマグノンの個数状態の観測システムの概念図

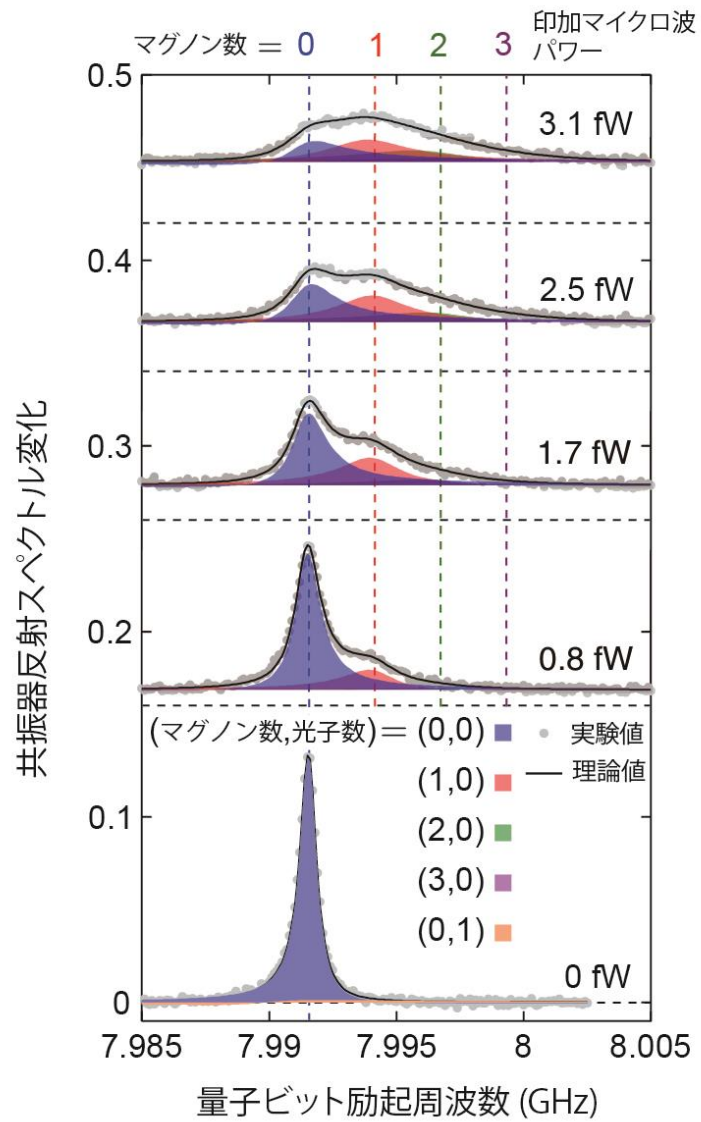


図 2 : 超伝導量子ビットを介したマグノンの個数分布の観測結果

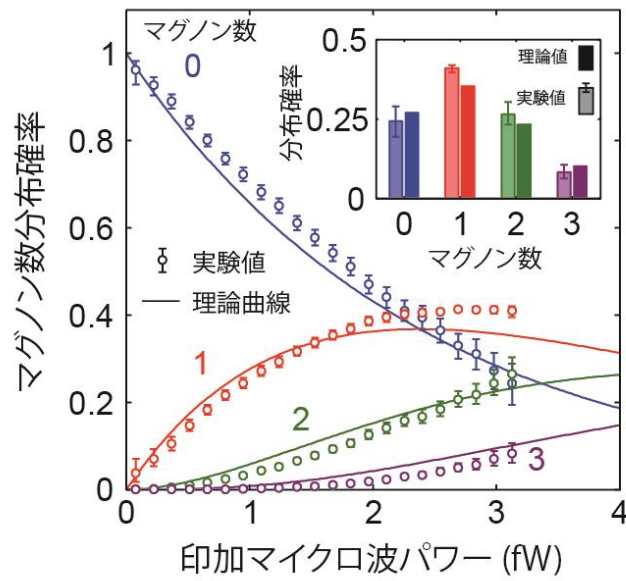


図 3 : YIG 球に印加するマイクロ波のパワーに対するマグノン個数分布の変化
 白丸が実験値、実線がマグノンの個数における分布確率の理論曲線を示す。
 実験値が理論曲線に乗り、本観測方法の妥当性を示している。