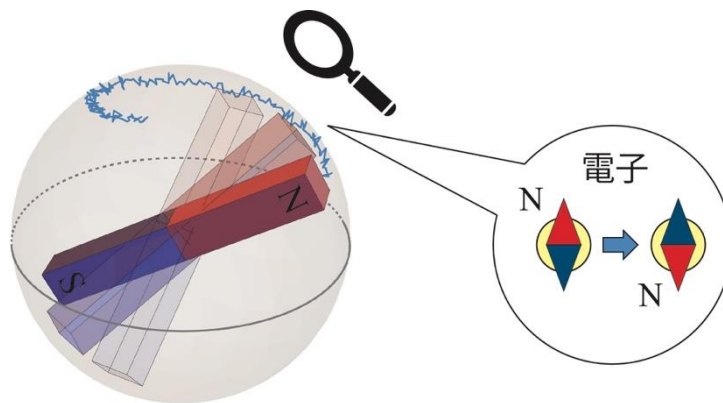


2025年3月13日  
東京大学  
慶應義塾大学  
科学技術振興機構 (JST)

## ノイズこそが信号だった！磁石の量子化を測定する新提案 ——光ポンププローブ法を用いた磁化ノイズ測定で量子化を直接観測——

### 発表のポイント

- ◆ 磁石の強さ(磁化)のノイズを光によって計測する新手法を提案
- ◆ これまで観測困難であった、磁石中のスピンの量子化を観測可能
- ◆ 磁石のスピンの用いた新しい量子情報デバイスの技術開発に貢献



本研究成果の模式図

### 発表概要

東京大学物性研究所の佐藤哲也大学院生（同大学大学院理学系研究科博士課程）と加藤岳生准教授、慶應義塾大学の渡邊紳一教授、中国科学院大学カブリ理論科学研究所の松尾衛准教授らによる研究グループは、光ポンププローブ法（注 1）を用いて磁化（注 2）のノイズを計測する新手法を理論的に提案しました。また、ノイズを定式化することでノイズ強度に「磁化の量子化」の情報が含まれていることを明らかにしました。これまで観測が困難であった磁化の量子化を、ノイズから直接観測できると示したことになります。

一般にノイズは測定において邪魔な存在とされますが、ノイズに重要な情報が含まれていることがあります。その代表的な例が「磁化の量子化」です。磁化の大きさはとびとびの値を取ると考えられており、磁石と金属の接合を作って金属に生じる電流ノイズを計測する手法が議論されていましたが、電流ノイズ観測の技術的困難によって実現には至っていませんでした。

一方で、近年光計測技術の進展は目覚ましく、磁化を効率よく高速で計測できる技術が開発されつつあります。本研究はそのような光計測技術に着目し、光を用いて磁化のノイズを測定する新提案です。これにより、磁石中で量子化された磁化を用いた量子情報デバイスの開発に貢献すると期待されます。

本成果は、米国の科学雑誌「Physical Review Letters」3月12日付（現地時間）のオンライン版に掲載されました。

## 発表内容

### 〈研究の背景〉

物理量の測定では、必ず意図しない物理量のノイズが混入します。通常、ノイズは精密な測定を妨げる邪魔者であり、ノイズを抑制するさまざまな工夫を行います。しかし状況によっては、ノイズが重要な情報を担うことがあります。この事実はしばしば「ノイズは信号である (The noise is the signal.)」と表現されます。その典型例がショットノイズ (注3) です。ショットノイズとは、もともと電気回路の電流測定において電子の数の統計的な変動をもたらすノイズを意味していました。実際に真空管の熱電子放出において、電子がランダムに飛び出すことによる電流のショットノイズが観測されます。電流のショットノイズには電流を運んでいる粒子の電荷の情報が含まれていることが知られており、実際に分数量子ホール状態 (注4) や超伝導における有効電荷 (注5) の決定などに用いられてきました。現在ではより一般に、物理系に何らかの流れが生じているときに流れを担う粒子の数が統計的に変動することで生じるノイズをショットノイズと呼んでいます。最近になって、磁石 (強磁性体) でショットノイズを測定する理論提案が行われています。磁石は電子がもつ小さな磁石 (スピン) が同じ向きに揃うことで磁力をもちますが、電子のスピンはとびとびの値をとる (量子化されている) ため、磁石全体の強さ (磁化) もとびとびの値をとります。この磁石にマイクロ波を当てて駆動させたときに、電子のスピンが近接する金属に移動しそれが電流に変換される現象が生じますが、このときに生じた電流のノイズを測定することで、磁石の磁化の量子化が観測できると予測されています。しかし、実験が困難であるためこれまで観測されてきませんでした。

一方、光技術の分野では、非同期サンプリング技術 (注6) を用いることで、ポンプ光で駆動した磁化が元に戻っていく (緩和する) 様子を短時間で多数回調べるができるようになってきました。これにより、磁化の運動を時間的に精密に追跡することが可能となり、磁化のショットノイズもつぶさに観察できるようになると期待されています。

### 〈研究の内容〉

本研究では、磁化のショットノイズを光技術で測定する新手法を提案しました。具体的には、磁化の運動とそれともなう磁化のゆらぎを定式化し、磁化ノイズを理論的に評価しました。磁場下の平衡状態にある強磁性体に対して、ポンプ光を照射して磁化を駆動させると、磁化はしばらくの間磁場の周りで回転し、徐々に平衡状態に向かって緩和していきます (図1の左図)。このときに観測される磁化の平均値まわりの揺らぎ (図1の右図) を理論的に定式化したところ、揺らぎの強度 (ノイズ強度) に磁化の量子化の情報が含まれることが明らかになりました。具体的には、本研究で取り扱った理論上のモデルにおいて、磁化の緩和がディラック定数  $\hbar$  (注7) を単位として生じますが、この量子化の情報はショットノイズ測定によって決定可能であることを示しました。一般に磁化の量子化の度合いは系によって異なると予測されますが、本研究の結果はその大きさがショットノイズ測定で決定できることを意味します。また、今後の非同期サンプリング実験による磁化の量子化観測の実証も期待されます。

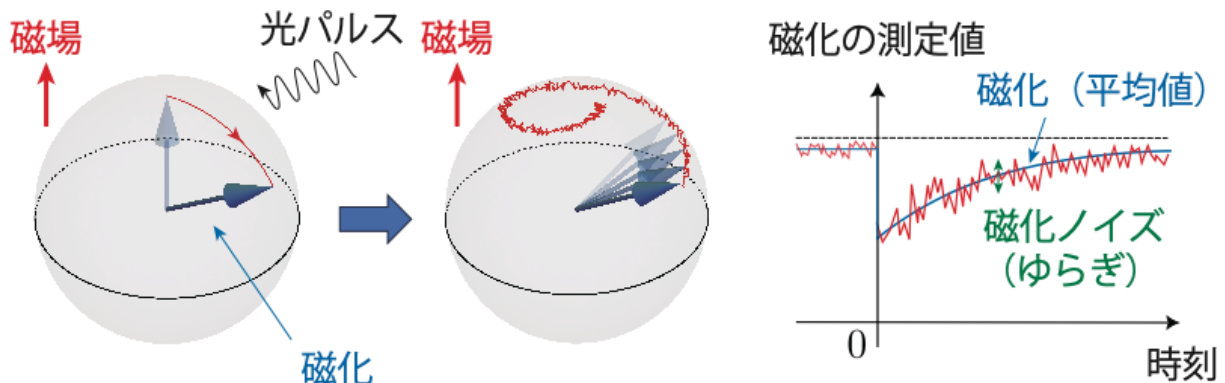


図1左：ポンプ光照射後の磁化の運動の様子 右：磁化の時間変化の様子

### 〈今後の展望〉

本成果は、単一磁区をもつ磁石（強磁性体）において、量子力学の特徴的な性質である磁化の量子化を直接観測する手法を提供するものです。磁石の磁化の変化は、磁石を構成する電子スピンの変化で生じているため、本結果は一個一個の電子スピン（電子がもつ小さな磁石）の変化がショットノイズを通して直接捉えられることを意味しています。現在、磁石に含まれる電子スピンを用いて量子情報を保持したり操作したりする試みが行われていますが、本研究は磁石中の電子スピンを用いた量子情報デバイスの開発に貢献すると期待されます。加えて、光ポンププローブ法に用いられるレーザー技術の新たな応用先としても、有望であると期待されます。

### 発表者

東京大学物性研究所

佐藤 哲也 博士課程（東京大学大学院理学系研究科物理学専攻）

加藤 岳生 准教授

慶應義塾大学

渡邊 紳一 教授

中国科学院大学カブリ理論科学研究所

松尾 衛 准教授

### 論文情報

雑誌名：*Physical Review Letters*

題名：Fluctuations in Spin Dynamics Excited by Pulsed Light

著者名：Tetsuya Sato, Shinichi Watanabe, Mamoru Matsuo, and Takeo Kato\*

DOI : 10.1103/PhysRevLett.134.106702

### 研究助成

本研究は、JSPS 科研費 基盤研究 (A) (課題番号：21H04565、24H00322)、基盤研究 (B) (課題番号：21H01800、23H01839、23K26165)、基盤研究 (C) (課題番号：24K06951)、挑戦的研究(萌芽) (課題番号：24K21743)、特別研究員奨励費 (課題番号：23KJ0702)、JST CREST (課題番号：JPMJCR19J4)、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP) (課題番号：JPMXS0118067246) の支援により実施されました。

### 用語解説

(注1) 光ポンププローブ法

物質に光を照射して非平衡に励起（ポンプ）し、その後の時間変化を別の光で観測（プローブ）する手法です。物質の励起状態などの高速な非平衡現象を時間的に追跡することができ、物質の性質解明に広く利用されています。

(注2) 磁化

磁石（強磁性体）の向きと強さを表す物理量です。ベクトル（向きと大きさをもつ量）として記述されます。本研究では磁化の磁場方向の成分に着目しています。

(注3) ショットノイズ

物質を非平衡に駆動することによって生じる揺らぎ（ノイズ）の一種。電流のショットノイズでは、電荷を担うキャリア（電子やホール）が電荷をもつ粒子であることを反映したノイズになっています。ショットノイズの「ショット」は「弾丸」を意味します。

(注4) 分数量子ホール状態

強磁場下の不純物の少ない二次元電子系において生じる特殊な多体状態。一般に磁場下では、印加した電流の向きに対して直交する向きに電圧が生じます（ホール効果）。生じた電圧を印加電流で割った量はホール抵抗と呼ばれますが、分数量子ホール状態ではそれが普遍的な抵抗値の有理数倍に量子化されます。この状態には、分数電荷をもつ粒子が存在することが知られています。

(注5) 有効電荷

通常、物質中で電流を担う粒子は電子やホールですが、電子間相互作用の影響によって、電流を担う粒子（準粒子）の電荷は素電荷 $e$  ( $< 0$ )からずれる場合があります。例えば、超伝導体では $2e$ の電荷をもつクーパー対が電流を運ぶことが知られています。このとき有効電荷は $2e$ となります。また分数量子ホール系では $e/3$ ,  $e/5$ といった分数電荷が観測されています。

(注6) 非同期サンプリング技術

二つのパルスレーザー光源を用いて、高精度かつ高速な光測定を行う技術です。パルスレーザー光源を二つ用いることで、高分解能な光測定を短時間で行うことが可能になります。

(注7) ディラック定数  $\hbar$

角運動量の大きさを表す基本単位のこと、不確定性原理など量子力学におけるあらゆる現象に顔を出す重要な物理量です。

## 問合せ先

〈研究に関する問合せ〉

東京大学物性研究所

准教授 加藤 岳生 (かとう たけお)

Tel : 04-7136-3255 E-mail : kato[at]issp.u-tokyo.ac.jp

〈報道に関する問合せ〉

東京大学物性研究所 広報室

Tel : 04-7136-3207 E-mail : press[at]issp.u-tokyo.ac.jp

慶應義塾 広報室

Tel : 03-5427-1541 E-mail : m-pr[at]adst.keio.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

〈JST 事業に関する問合せ〉

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔 (あんどう ゆうすけ)

Tel : 03-3512-3531 E-mail : crest[at]jst.go.jp