光ポンププローブ法による磁化の非平衡ショット ノイズ測定

物性研究所 物性理論研究部門 佐藤 哲也、加藤 岳生

自然界でなにかを観測するとき、そこには必ずノイズが存在します。ノイズと聞くと、精密な測定を妨げる邪魔者と思いがちですが、実は、ノイズ自身もまた、重要な情報を持っていることが知られています。その典型例が、非平衡ショットノイズというものです。非平衡ショットノイズと非平衡な流れの比であるファノ因子は、分数量子ホール系における有効電荷の決定などに用いられてきました[1.2]。

近年、これらの非平衡ノイズの概念を強磁性体に拡張す る試みが行われるようになってきました。例えば、強磁性 体と非磁性金属が接合された系では、その界面で輸送され るスピン流のノイズを測定することで、界面でやり取りさ れる量子化角運動量を観測できることが理論的に提案され ています[3]。しかしながら、このような接合系での磁化 の非平衡ショットノイズ測定を実際に行おうとすると、電 子スピンから電流に変換して電流ノイズを測定し、その電 流ノイズから間接的に磁化ノイズを同定する必要がありま す。この測定を実験的に実現するのは難しいことが指摘さ れており、磁化の非平衡ショットノイズを実際に測定でき るようなセットアップが現在求められています。一方、光 技術の分野では、デュアルコム技術を用いることで、非平 衡に駆動した磁化の緩和を、短時間で多数回調べる実験手 法が確立されました[4]。これは磁化の運動を、時間的に 精密に追跡することを可能とするもので、磁化のノイズと いう微小な変化も、つぶさに観察できるようになると期待 されています。

これらの背景を踏まえ、本研究[5] では、光ポンププローブ法を用いて強磁性体の磁化の非平衡ノイズ・非平衡ショットノイズを測定し、磁化が緩和する様子を調べる新手法を、理論的に提案しました(図 1)。静磁場下の平衡状態にある強磁性体に対して、光パルスを瞬間的に照射して、磁化を非平衡状態に励起し、磁化の向きを傾けます。その後、磁化は非平衡なノイズを伴いながら、平衡状態に向かって緩和していきます。本研究では、この非平衡ノイズを、非平衡開放系という手法を用いて理論的に定式化し、詳細に調べました。

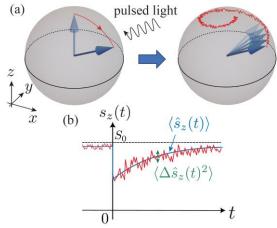


図 1 (a) 提案するセットアップにおける磁化の運動の様子。 静磁場のもとで熱平衡状態にある磁化に対して、光を瞬間的 に照射し磁化の向きを傾けます。その後、磁化は歳差運動を 始め、非平衡ショットノイズを伴いながら、熱平衡状態に向 かって緩和していきます。

(b) 磁化の時間発展の様子。 $\langle \hat{s}_z(t) \rangle$ は磁化の期待値、 $\langle \Delta \hat{s}_z(t)^2 \rangle$ は磁化ノイズの期待値。t=0 で光が照射されたあと、磁化の期待値は熱平衡状態に緩和していき、その期待値のまわりで、磁化が揺らぎます。

非平衡開放系の基礎方程式である Lindblad 方程式

$$\begin{split} \dot{\rho_s}(t) &= -\frac{i}{\hbar} \left[\mathcal{H}, \, \rho_s(t) \right] + \Gamma \hat{b} \rho_s(t) \hat{b}^{\dagger} \\ &- \frac{\Gamma}{2} \left\{ \hat{b}^{\dagger} \hat{b}, \, \rho_s(t) \right\} + \Gamma' \hat{b}^{\dagger} \rho_s(t) \hat{b} - \frac{\Gamma'}{2} \left\{ \hat{b} \hat{b}^{\dagger}, \, \rho_s(t) \right\}, \end{split}$$

から出発して、磁化の古典方程式として良く知られる Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式と整合するように、 Γ と Γ 'を Gilbert 減衰定数 α から決定しました。その上で、光 パルス印加後の磁化のダイナミクスを解析的に求め、磁化 ノイズ

$$C(t', t) \equiv \hbar^2 \langle \Delta \hat{s}_z(t') \Delta \hat{s}_z(t) \rangle$$
,

を決定しました。ここで $\Delta \hat{s}_z(t) \equiv \hat{s}_z(t) - \langle \hat{s}_z(t) \rangle$ です。それに基づいて、磁化から環境へと移行する角運動流(スピン流)のノイズを $D(t',t) \equiv \partial_t \partial_t C(t',t)$ と定義することができます。この量を具体的に計算すると、

$$D(t', t) = D^{0}(t) \delta(t' - t) + D^{c}(t', t).$$

$$D^{0}(t) = D_{\text{th}}^{0} + D_{\text{ne}}^{0}(t)$$

$$D_{\text{th}}^{0} = \frac{2\hbar^{2}\Gamma\Gamma'}{\Gamma - \Gamma'},$$

$$D_{\text{ne}}^{0}(t) = \hbar^{2}(\Gamma + \Gamma') |\beta_{0}|^{2} e^{-(\Gamma - \Gamma')t}.$$

という結果が得られました。 $D_{\rm th}^0$ は熱平衡状態でも存在する熱ノイズ、 $D_{\rm ne}^0(t)$ は非平衡ショットノイズに、それぞれ対応します。このうち非平衡ショットノイズ $D_{\rm ne}^0(t)$ には、磁化緩和に伴う角運動量変化の量子化の情報が含まれます。実際に、非平衡ショットノイズと非平衡な磁化の流れ(スピン流)の平均値 $\partial_t \left\langle \hat{s}_z(t) \right\rangle$ との比であるファノ因子 $F = D_{\rm ne}^0(t)/\partial_t \left\langle \hat{s}_z(t) \right\rangle$ を計算すると、

$$\mathcal{F} = \frac{\Gamma + \Gamma'}{\Gamma - \Gamma'} \; \hbar = \coth \left(\frac{\hbar \omega_0}{2 k_{\mathrm{B}} T} \right) \; \hbar. \label{eq:fitting}$$

となり、低温でファノ因子がディラック定数 \hbar に近づくことを示すことができます(図 2)。ここで ω_0 は強磁性体の共鳴周波数、T は温度を表しています。この結果は、磁化の非平衡な緩和過程が、角運動量 \hbar を単位とするポアソン過程で記述できることを示しています。つまり、本研究の手法で非平衡ショットノイズを実験的に測定できれば、一回の緩和過程で放出される角運動量を同定できることを意味します。

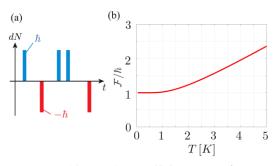


図 2 (a) スピンの緩和の確率過程の模式図。(b) 温度に対するファノ因子の様子。低温では F/\hbar が 1 に漸近する。

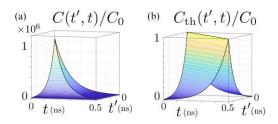


図 3 磁化の自己相関関数 C(t',t) を時刻 t と t' に対してプロットした様子。(a) 自己相関関数 $C(t',t)/C_0$ の様子と、(b) 自己相関関数のうち熱ノイズ $C_{th}(t',t)/C_0$ の様子。ここで、 $C_0 \approx 4.4 \times 10^3 \hbar^2$ は同時刻の熱揺らぎ。

また、非平衡ショットノイズの大きさについても、数値的に見積もりました。その結果、光を照射した直後の非平衡ショットノイズは、熱によって生成される磁化の熱ノイズに比べても、十分に大きいことが分かりました。これによって、本提案は、非平衡ショットノイズの測定を十分に可能にするセットアップであることが分かりました(図3)。

本研究の成果は、磁化の非平衡ショットノイズ、ひいては磁化の緩和の情報を光技術から明らかにする研究の端緒になりうるものです。これまでのスピントロニクス研究において、磁化の緩和は現象論的に取り扱われる場合が多く、その微視的な記述はまだまだ発展途上です。将来、スピントロニクスを精密に調べていくには、磁化の緩和の理解は必須であり、本研究のようなノイズ測定は、今後の研究の進展に大きく貢献すると期待されます。

【謝辞】

本研究は、文部科学省科学・研究費補助金(課題番号 23KJ0702, 23H01839, 24H00322, 24K06951), the National Natural Science Foundation of China (NSFC)(課題番号 12374126)、および中国科学院優先プログラム(課題番号 XDB28000000)の支援のもと遂行されました。ここに感謝申し上げます。

【参考文献】

- [1] L. Saminadayar, D. C. Glattli, Y. Jin, and B. Etienne, Observation of the e/3 fractionally charged laughlin quasiparticle, Phys. Rev. Lett. 79, 2526 (1997).
- [2] R. de Picciotto, M. Reznikov, M. Heiblum, V. Umansky, G. Bunin, and D. Mahalu, Direct observation of a fractional charge, Nature 389, 162 (1997).
- [3] A. Kamra and W. Belzig, Magnon-mediated spin current noise in ferromagnet — nonmagnetic conductor hybrids, Phys. Rev. B 94, 014419 (2016).
- [4] D. Nishikawa, K. Maezawa, S. Fujii, M. Okano, and S. Watanabe, A two-color dual-comb system for timeresolved measurements of ultrafast magnetization dynamics using triggerless asynchronous optical sampling, Rev. Sci. Instrum., 94, 063003 (2023).
- [5] T. Sato, S. Watanabe, M. Matsuo, and T. Kato, Fluctuations in Spin Dynamics Excited by Pulsed Light, Phys. Rev. Lett. 134, 106702 (2025).