

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。

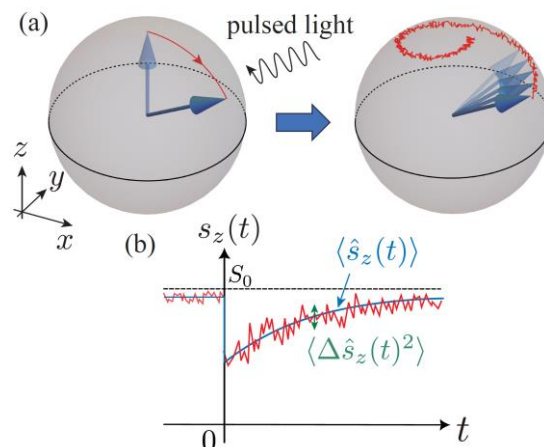


図1 (a) 提案するセットアップにおける磁化の運動の様子。静磁場のもとで熱平衡状態にある磁化に対して、光を瞬間的に照射し磁化の向きを傾けます。その後、磁化は歳差運動を始め、非平衡ショットノイズを伴いながら、熱平衡状態に向かって緩和していきます。(b) 磁化の時間発展の様子。 $\langle s_z(t) \rangle$ は磁化の期待値、 $\langle \Delta s_z(t)^2 \rangle$ は磁化ノイズの期待値。 $t = 0$ で光が照射されたあと、磁化の期待値は熱平衡状態に緩和していき、その期待値のまわりで、磁化が揺らぎます。

非平衡開放系の基礎方程式である Lindblad 方程式

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

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、

$$D_{\text{re}}^0(t) = \hbar^2 (\Gamma + \Gamma') |\beta_0|^2 e^{-(\Gamma + \Gamma')t}.$$

$$\mathcal{F} = \frac{\Gamma + \Gamma'}{\Gamma - \Gamma'} \hbar = \coth\left(\frac{\hbar\omega_0}{2k_{\text{B}}T}\right) \hbar.$$

Figure 1 consists of two parts. Part (a) is a schematic of the energy level structure. It shows a vertical axis labeled dN and a horizontal axis labeled t . There are three discrete energy levels: a blue bar at $\hbar$, a blue bar at $-\hbar$, and a red bar at $-\hbar$. Part (b) is a plot of the dimensionless free energy $F/\hbar$ versus temperature T [K]. The y-axis ranges from 0 to 3, and the x-axis ranges from 0 to 5. A red curve starts at $F/\hbar = 1$ for $T = 0$ and increases monotonically, reaching approximately 2.4 at $T = 5$.

物性研だより第 65 巻第 2 号 6