

A01-002 非平衡量子系の輸送ダイナミクス

大阪大学大学院理学研究科 小林研介
慶応義塾大学工学部 齊藤圭司
東京大学大学院総合文化研究科 沙川貴大

近年、微細加工技術が発展したおかげで、我々は、量子的な電気伝導が支配的であるような極小の固体量子素子を作ることができるようになった。このような固体量子素子は、平衡状態から非平衡状態までを連続的に制御できるため、非平衡量子系を定量的に取り扱える理想的な舞台の一つである。

我々の班は、固体量子素子を舞台として、非平衡ダイナミクスを定量的に取り扱う方法論の創出を目指している。本年度の成果は以下の通りである。

1. 高精度電流ゆらぎ測定手法の開発

本研究の中核となるのは、高精度の電流ゆらぎ測定である。本年度、我々は更なる技術開発に取り組み、これまでに開発してきた低温動作可能な増幅器の性能を10倍程度、向上させることに成功した。その結果、世界最高精度のショット雑音測定が可能となった（分解能 $< 10^{-29} \text{ A}^2/\text{Hz}$ ）。図1は、電子温度 20 mK・分解能 $< 10^{-29} \text{ A}^2/\text{Hz}$ でショット雑音測定を行った結果である(1)。この結果は、これまで文献として発表されているショット雑音測定結果の中では、最も電子温度が低く、最も高精度のものである。

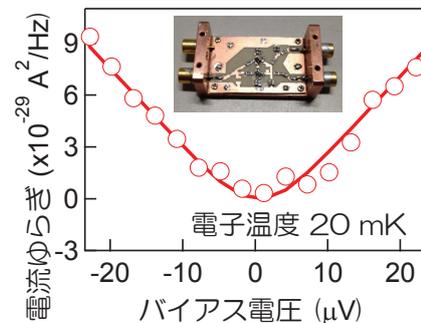


図1. 20 mKにおけるショット雑音測定の結果と低温動作可能な増幅器の写真

2. トポロジカル絶縁体母物質における普遍的伝導度ゆらぎ

近年、トポロジカル絶縁体と呼ばれる物質群が大きな注目を集めている。代表者は、典型的なトポロジカル絶縁体の母物質である Bi_2Se_3 について、弱局在や普遍的伝導度ゆらぎ (Universal Conductance Fluctuation, UCF と呼ばれる) を研究し、量子コヒーレンスに関する基本的なパラメータを得た。トポロジカル絶縁体は、安定化された表面エッジ状態を持ち、この状態の無散逸な伝導過程を利用したデバイス応用が提案されている。我々の得た成果は、このような特異な電子状態を利用した非平衡伝導を扱う上で最も基礎的な情報を与えると同時に、スピン軌道相互作用の強い状況における UCF の理論を定量的に検証した初めての例となっている(2)。

3. スピンショット雑音の観測

強磁性体から常磁性体に電子を注入することによって、スピン流を生成できる。その際、スピン流にともなう「スピンショット雑音」と呼ぶことのできる現象が期待される。このことを実験的に検証し、スピン流の新たな検出手法を確立する実験を行った(3)。

4. 量子系における幾何学的ポンプとエントロピー生成の理論

量子系を外部から周期的に操作した時に、ベリー位相に類似の効果で非平衡カレントが発生することが知られている。沙川らはこれを非平衡定常熱力学に応用し、量子系における非平衡エントロピーの幾何学的な表式を得た(4)。

5. 量子情報を活用した熱機関の理論

量子ディスコートと呼ばれる量子情報量を使って、仕事を取り出すことができる熱機関の理論的提案を、沙川らが行った。これまでも量子ディスコードと熱機関の関係は議論されていたが、本研究は、統計力学に基づいた厳密な表式を得て、かつ具体的なモデルを提案した初めてのものである(5)。

6. 絶縁体での熱輸送に見る近藤効果

近年、微小系を流れる熱を操作する研究が盛んになってきている。齊藤らは、分子ワイヤを介した熱輸送を意識して、近藤効果に相当する現象を研究した。いわゆるスピン-ボゾンモデルを使うことにより正確に低温での熱輸送の振る舞いを評価した。その結果近藤温度で支配される輸送特性が得られた(6)。

参考文献:

- (1) Tomonori Arakawa, Yoshitaka Nishihara, Masahiro Maeda, Shota Norimoto, and Kensuke Kobayashi, “Cryogenic amplifier for shot noise measurement at 20 mK”, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 172104 (2013).
- (2) Sadashige Matsuo, Kensaku Chida, Daichi Chiba, Teruo Ono, Keith Slevin, Kensuke Kobayashi, Tomi Ohtsuki, Cui-Zu Chang, Ke He, Xu-Cun Ma, and Qi-Kun Xue, “Experimental Proof of Universal Conductance Fluctuation in Quasi-1D Epitaxial Bi₂Se₃ Wires”, *Phys. Rev. B* **88**, 155438 (2013).
- (3) T. Arakawa, J. Shiogai, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, M. Kohda, J. Nitta, D. Bougeard, D. Weiss, T. Ono, and K. Kobayashi, “Spin Shot Noise” (submitted).
- (4) Tatsuro Yuge, Takahiro Sagawa, Ayumu Sugita, and Hisao Hayakawa, “Geometrical Excess Entropy Production in Nonequilibrium Quantum Systems”, *J. Stat. Phys.* **153**, 412 (2013).
- (5) Jung Jun Park, Kang-Hwan Kim, Takahiro Sagawa, and Sang Wook Kim, “Heat Engine Driven by Purely Quantum Information”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 230402 (2013).
- (6) Keiji Saito and Takeo Kato, “Kondo signature in heat transfer via a local two-state system”, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 214301 (2013).