

半導体メゾスコピック系における非平衡量子雑音

京都大学化学研究所 小林 研介¹

1 はじめに

半導体上に作製されたメゾスコピック系においては、電圧や磁場によって量子力学的な効果を様々に制御することができる。我々は、メゾスコピック系を流れる電流に含まれる量子的な電流揺らぎ（電流雑音）に注目した研究を行っている。ここでは、雑音をプローブすることによって、現象の背後にある普遍的な物理にアプローチできることをお伝えしたい。まず、半導体メゾスコピック系を簡単に紹介し、非平衡電流雑音の研究を概観したのち、非平衡統計力学における新しい潮流を生み出している「揺らぎの定理」と量子系における本定理の検証実験 [1] について議論する。

2 半導体メゾスコピック系と非平衡電流雑音

半導体 GaAs と $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ を接合し、適切なドーピングを施すことによって、接合界面に二次元電子系を作ることができる。このような二次元電子系を微細加工することによって作製される様々なメゾスコピック系（人工量子系）は、量子効果制御の格好の舞台として、1980 年代以降、世界的に盛んに研究が行われてきた [2]。その代表例が図 1 に示す電子干渉計（アハラノフーボームリング）である。リング全体にわたって電子の干渉性が保たれるとき、その電気伝導度はリングを貫く磁場に関して周期的に変動する。これが固体素子におけるアハラノフーボーム（AB）効果と呼ばれる現象であり、電子の波動性が顕著に表れたものである。

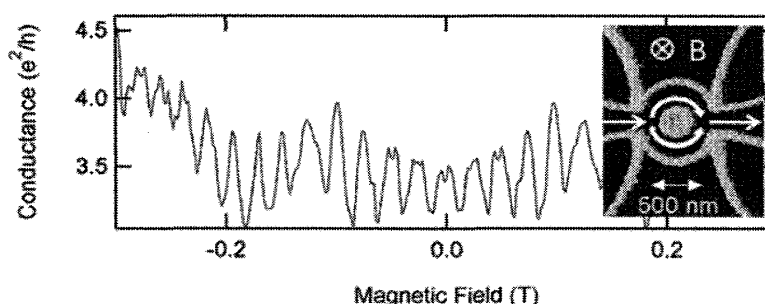


図 1: 電子干渉計における電気伝導度。挿入図は干渉計の原子間力顕微鏡像。

¹E-mail: kensuke@scl.kyoto-u.ac.jp

我々は、様々な量子効果の中でも、特に系を通過する電流に含まれる雑音（揺らぎ）に注目して研究を行っている [3]。系を電圧源に接続しバイアス電圧 V を印加する。流れる電流 I の時間変化を高精度の電流計でモニターする。電流は、その平均値 $\langle I \rangle$ の周りに揺らぎ δI を持つ。そこで、電流揺らぎパワースペクトル密度（電流雑音） $S = \int e^{i2\pi ft} (\delta I)^2 dt$ を定義する。

バイアス電圧 V がゼロの時、電流値 $\langle I \rangle$ はゼロであるが、電流揺らぎ $(\delta I)^2$ はゼロではない。これは導体中に存在する電子の熱的な擾乱に起因する。このような平衡状態にあるときの揺らぎを熱雑音（あるいはジョンソン・ナイキスト雑音）と呼ぶ。熱雑音は、素子の伝導度 G 、素子の温度 T 、ボルツマン定数 k_B を用いて、 $S_{\text{thermal}} = 4k_B T G$ と表される。一方、バイアス電圧 V がゼロではない場合、電子は素子を通過することも反射することもある。このような確率的な分配過程によって、素子を通過する電流には揺らぎが生じる。この揺らぎのことを、非平衡電流揺らぎ（雑音）あるいはショット雑音と呼ぶ。古典的な伝導体においては $S_{\text{shot}} = 2eI$ と表される。

熱雑音の表式とショット雑音の表式は、質的に全く異なる。このことは、非平衡状態が、平衡状態とは全く異なる性質を有していることを端的に表している。特に電荷素量 e が系を非平衡にすることによって初めて現れてくるという事実は重要である。このことを利用した有名な例として、半導体メゾスコピック系におけるショット雑音測定によって分数量子ホール状態における分数電荷の存在を証明した実験が挙げられる [3]。これは 1998 年の分数量子ホール効果に対するノーベル物理学賞の直接の契機となった。

3 揺らぎの定理とその検証実験

ここで、我々の研究の大きな動機となっている「揺らぎの定理」 [4] [5] について述べる。先ほど見た熱雑音の式 $S_{\text{thermal}} = 4k_B T G$ は、系の応答（伝導度）が系の平衡状態における揺らぎ（熱雑音）に比例することを意味し、揺動散逸定理の代表例となっている。このような事実をもとに、1950 年代に線形応答理論が成立した。線形応答理論は平衡点近傍の物理を極めてよく記述するが、その限界を超えて非平衡系をよりよく理解しようという試みが長年行われてきた。その試みの一つが「揺らぎの定理」である。揺らぎの定理によると、熱浴に接続された微小な系におけるエントロピー変化量に関して、正の場合の確率と負の場合の確率が関係式で結ばれる。この定理は、非平衡状態においても厳密に成り立つ、という点が重要である。この揺らぎの定理から、揺動散逸定理やオンサーガーの相反定理など、線形応答理論の根幹をなす関係式を再現することができるため、揺らぎの定理は、その発見以降、統計力学の分野で熱心に研究されてきた [5]。これまで、揺らぎの定理は、流体中の粒子の運動や RNA 分子などを観測することによって実験的に検証されてきたが、量子系において成り立つかどうかは検証されたことがなかった。

我々は、半導体メゾスコピック系における電流揺らぎ測定を行うことにより、揺らぎの定理を検証した。一般に、素子にバイアス電圧 V を印加した際の電流 I は、 V の多項式 $I = G_1 V + \frac{1}{2!} G_2 V^2 + \frac{1}{3!} G_3 V^3 + \dots$ として表せる。電流雑音 S も印加電圧 V の多項式として $S = S_0 + S_1 V + \frac{1}{2} S_2 V^2 + \dots$ と表せる。ここで、 S_0 は熱雑音（ジョンソン・ナイキスト雑音）であるため、上の 2 式の第一項の係数同士には明白な相関関係 $S_0 = 4k_B T G_1$ がある。では、より高次の項についてはどうである

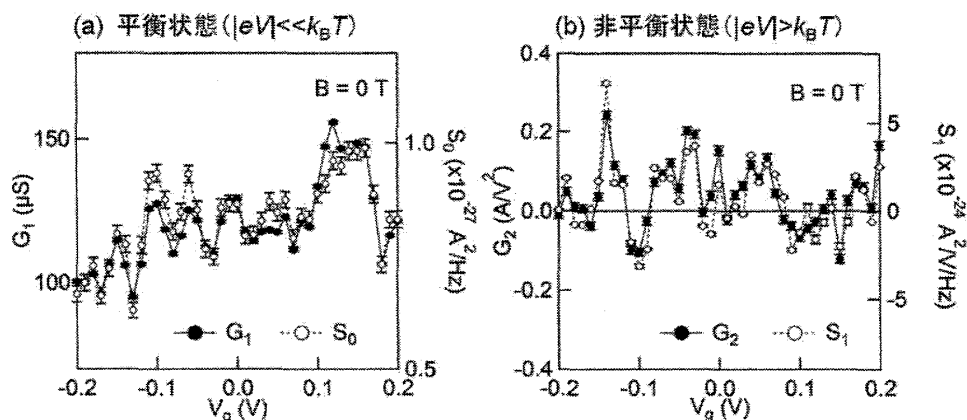


図 2: 平衡状態における雑音（ジョンソン・ナイキスト関係式）（左）と非平衡状態における電流と雑音の高次の関係式（右）。電子干渉計のゲート電圧を連続的に変化させて、相関を測定したものの。

うか？ここで先ほどの揺らぎの定理が登場する。近年の理論 [6] によれば、揺らぎの定理を用いると $S_1 = 2k_B T G_2$ が成立することが示されている。この関係式は非線形非平衡状態に対するものであり、ジョンソン・ナイキスト雑音（揺動散逸関係）を超える新しい関係式である。我々はこの関係式を実証することを目指した。

電流揺らぎの検出には、通常の電流測定とは異なる技術が必要となる。我々は、電流揺らぎ測定技術の開発から研究を開始し、その結果、数年かけて世界最高レベルの感度を持つ電流揺らぎ測定系を構築した [7]。用いた試料は半導体二次元電子系上に作製した電子干渉計（図 1）である。この電子干渉計には、バックゲートが取り付けられており、電子密度の静電的な変化によって伝導度の制御が可能となっている。

まず平衡状態 ($|eV| \ll k_B T$) の時の結果を見てみよう。図 2(a) にバックゲートを変化させた場合の伝導度 G_1 と熱雑音 S_0 の変化を示す。ごらんの通り、両者は比例している。これは、ジョンソン・ナイキストの定理の表れである。この関係から、電子温度は 125 mK と求まる。次に、非平衡成分を見てみよう。電流電圧特性から G_2 を求めることができる。また、電流雑音のバイアス電圧依存性から S_1 を求めることができる。その二つの量のバックゲート依存性を図 2(b) に示す。二つの量の間に明白な比例関係があることが分かる。この比例関係は、前述したように、揺らぎの定理から予想される振る舞いに合致しており、揺動散逸関係式を超える高次の「非平衡揺らぎ関係式」である。

我々は、同様の実験を磁場中でも行っている。磁場によって系に時間反転対称性の破れが導入されるため、 $S_1 = 2k_B T G_2$ （磁場に関する対称成分）だけでなく、さらに別の関係式も成立することも分かっている。しかしながら、定量的には、理論の予想に対して、我々の結果は比例係数に数倍程度のずれがある。このようなずれの理由は現時点では不明であるが、最近行われた別の実験でも、同じ程度の揺らぎの定理の予想とのずれが生じることが指摘されている。我々は量子素子を測定しているので、測定に伴う何らかの反作用が影響を与えている可能性がある。この食い違いを解明することは今後の課題である。

4 まとめ

我々の実験は、量子系における揺らぎの定理を検証するものとしては初めてのものである。我々が示したことは、電流とその揺らぎの間に、揺動散逸関係式を超える高次の相関が存在するという事実である。これは系の非線形性と非平衡性とをつなぐ関係式でもある。このような研究は、量子力学と統計力学の両方に関わる根源的な問題に実験的にアプローチしていく端緒を与え、非平衡統計物理学の新しい展開を生み出すものと期待される。

謝辞

本研究は、中村秀司、山内祥晃、橋坂昌幸、知田健作、小野輝男（以上、京都大学化学研究所）、内海裕洋（東大物性研究所、現三重大学）、齊藤圭司（東京大学理学部）、R. Leturcq (IEMN-CNRS)、K. Ensslin（スイス連邦工科大学）、A. C. Gossard（Univ. California, Santa Barbara）の各氏との共同研究によるものです。また、M. Büttiker、上田正仁、加藤岳生、P. Hänggi、P. Gaspard の各氏との議論は大変有益でした。

科研費若手 (S)・山田財団・松尾学術振興財団・SCAT の研究助成に感謝します。

参考文献

- [1] S. Nakamura, Y. Yamauchi, M. Hashisaka, K. Chida, K. Kobayashi, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, K. Saito, Y. Utsumi, and A. C. Gossard, *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010), 080602.
- [2] 標準的な参考書として、川畑有郷「メゾスコピック系の物理学」（培風館）；勝本信吾「メゾスコピック系」（朝倉書店）など。
- [3] レビューとして Y. M. Blanter and M. Büttiker, *Phys. Rep.* **336** (2000), 1.
- [4] D.J. Evans, E.G.D. Cohen, and G.P. Morriss, *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993), 2401.
- [5] 日本語の文献として、日本物理学会誌 2008 年 10 月号「特集：線形応答理論から 50 年—非線形・非平衡の物理学」；早川尚男「非平衡統計力学」（サイエンス社）。
- [6] K. Saito and Y. Utsumi, *Phys. Rev. B* **78** (2008), 115429.
- [7] M. Hashisaka, Y. Yamauchi, S. Nakamura, S. Kasai, T. Ono, and K. Kobayashi, *Phys. Rev. B* **78** (2008), 241303(R); M. Hashisaka, Y. Yamauchi, K. Chida, S. Nakamura, K. Kobayashi, and T. Ono, *Rev. Sci. Inst.* **80** (2009), 096105.