

“ゆらぎ”を通して物理の本質に迫る



研究室紹介

小林 研介*

Fluctuation Unveils Physics.

Key Words : Fluctuation, Mesoscopic Physics, Quantum Control, Noise

1. はじめに

読者の皆さんは、「雑音（ゆらぎ）」と聞くと何を想像されるだろうか？例えば、テレビやラジオのスピーカーからの「ザー」という音かもしれない。あるいは、アンプの雑音指数を思い浮かべられるかもしれない。いずれにしても、雑音は「望ましくない、できるだけ避けたいもの」ではないだろうか？

実は、私たちの研究室では、雑音そのものを研究している。研究の対象は、半導体を $1\mu\text{m}$ 程度以下のスケールに微細加工して得られる微小な電子回路に発生する電流ゆらぎ（電流雑音）である。私たちが行っているのは、そのような微小な電子回路において発生する「本質的な電流ゆらぎ」から「本質的な情報」を引き出そうとする研究である。

ここでは、物理学において「ゆらぎ」がどのような意味をもっているのかについてお話した後、私たちが最近おこなった量子系における「ゆらぎの定理」の検証実験についてご紹介したい[1, 2]。

2. ゆらぎ [1]

2-1. ゆらぎの持つ意味

通常、物理の実験において得られる量（電気抵抗、磁化率、誘電率など）は、外場（電場や磁場など）に対して、系がどのように応答するかという量であることが多い。例えば、ばねを引っ張ると張力に比

例してばねが伸びる「フックの法則」や、抵抗体に電圧を加えるとそれに応じて電流が流れるという「オームの法則」は、お馴染みであろう。ところで、一般的に、このような系においては、外場がない状態（すなわち平衡状態）においても、熱的なゆらぎが存在する。しかも、そのゆらぎの大きさは、外場に対する系の応答と一対一対応することが知られており、それを揺動散逸定理と呼ぶ。

電子回路において、その例を見てみよう。回路素子に電圧 V を印加したとする。電圧 V がゼロ（平衡状態）の時、平均電流値はゼロであるが、実は、素子内の電子が熱的にゆらいでいるため、電流ゆらぎはゼロではない。それを熱雑音と呼ぶ。熱雑音のスペクトル密度 S 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、

$$S = 4k_B T G \quad (\text{式1})$$

と表される。伝導度 G は、 $I = GV$ という風に、オームの法則に対応する量である。つまり、この式は、素子に電圧 V を印加したときの応答を表す係数（ G ）が、ゆらぎ S に比例することを表している。これが揺動散逸定理の代表的な例である。

歴史的には、揺動散逸定理は、1905年のアインシュタインのブラウン運動の理論において初めて現れた。1909年、その理論に基づいて、ペランがアボガドロ数の精密な測定を行い、その功績によって1926年にノーベル賞を受賞している。彼らの研究は、ゆらぎを観測することによって分子の存在を実証したものであり、ゆらぎが本質的な情報をもたらすことを示した最初の例である。

ここに述べた揺動散逸定理は、その後も様々な系で成り立つことが見出されるようになった。このような事実をもとに、1950年代に日本の久保亮五らを中心として線形応答理論が成立する。これは、現



*Kensuke KOBAYASHI

1971年5月生
 東京大学大学院 理学系研究科 物理学
 専攻 博士課程 中退 (1998年)
 現在、大阪大学大学院理学研究科物理学
 専攻 教授 博士(理学) 量子物性
 TEL: 06-6850-5368
 FAX: 06-6850-5372
 E-mail: kensuke@phys.sci.osaka-u.ac.jp

在、久保公式と呼ばれ、日本の物理学界が世界に誇る不朽の業績の一つとなっている。現在でも、物理の研究において久保公式は日常的に使用され、物質が外場に対してどのように応答するかという問いに対して定量的に答える極めて強力な手段を与える。

2-2. 「ゆらぎの定理」とは

線形応答理論は非常に強力であるが、残念ながら、それが適用できるのは系が平衡状態近傍にある時に限られている。しかしながら、私たちが出会う自然現象の中には、平衡状態ばかりではなく、非平衡状態にあることが本質的であるような現象が数多くある。例えば、化学反応や光-物質相互作用や、生命現象はまさにその最たるものである。そこで、線形応答理論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。その試みの一つの成果が「ゆらぎの定理 (Fluctuation Theorem)」である (Evans-Cohen-Morris, 1993)。

熱浴に接続された微小な系におけるエントロピーの生成率を考えよう。ゆらぎの定理は、単位時間 t におけるエントロピー生成率の時間平均 σ_t を考えると、エントロピーが A だけ増大する確率と A だけ減少する確率との間に

$$\frac{P(\sigma_t=A)}{P(\sigma_t=-A)} = e^{At} \quad (\text{式 } 2)$$

が成り立つことを主張する。この式によれば、長時間 (大きな t) においては、右辺が大きいために、エントロピーが増大する確率 (左辺の分子) が非常に大きいことが分かる。すなわち、この式は「熱力学第二法則」を定量的に記述する。さらに、この式から揺動散逸定理などの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、ゆらぎの定理は、統計力学における新しい指導原理として、熱心に研究されてきた。

実験的には、ゆらぎの定理は、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検証されてきた。これらは古典系における実験である。私たちの研究 [2] は、量子系においてゆらぎの定理を初めて検証したものである。

3. 量子系における「ゆらぎの定理」の検証

3-1. ゆらぎの定理の検証手法

それでは、電流ゆらぎを用いて、私たちが行ったゆらぎの定理の検証実験について述べる。通常、素子に電圧 V を印加した際に電流 I が生じる場合、その電流電圧特性は以下のように V の多項式として書き表すことができる。

$$I = G_1 V + \frac{1}{2!} G_2 V^2 + \frac{1}{3!} G_3 V^3 + \dots \quad (\text{式 } 3)$$

ここで、 G_1 は伝導度であり、第一項だけを見ると、これはオームの法則である。つまり素子電流 I が G_1 だけで記述されるとき、通常の線形応答理論が適用できる。しかし、印加電圧 V が大きいとき、系は非平衡状態になり、線形応答を示さなくなる。その場合、電流には、 V の高次の成分が現れ、それらは応答係数 G_2 、 G_3 などによって特徴付けられる。

次に、電流雑音 S を考えてみる。上の議論と同様、電流雑音も印加電圧 V の多項式によって表すことができる。

$$S = S_0 + S_1 V + \frac{1}{2!} S_2 V^2 + \dots \quad (\text{式 } 4)$$

ここで、 S_0 は、熱雑音である。式1に述べたように、

$$S_0 = 4k_B T G_1 \quad (\text{式 } 5)$$

が成立する。

ここで次の疑問が浮かぶ。式3と式4の第一項の係数同士には明白な相関関係 (式5) があるが、より高次項についてはどうであろうか、という疑問である。ここで先ほどのゆらぎの定理が登場する。近年の理論 [1] によれば、ゆらぎの定理を用いると、

$$S_1 = 2k_B T G_2 \quad (\text{式 } 6)$$

が成立することが示される。この関係式は、非線形非平衡状態に対するものであり、揺動散逸定理を超える新しい関係式である。私たちの実験では、この関係式を実証することを目指した。

3-2. 実験手法

電流ゆらぎの検出には、高度な測定技術が必要となるため、数多くの理論研究が行われている反面、実験研究はそれほど多くない。そこで、私たちは、電流ゆらぎ測定技術の開発から研究を開始し、その

結果、数年かけて世界有数の高感度を持つ電流ゆらぎ測定系を構築することに成功した [1]。

用いた試料は半導体二次元電子系上に作製した極小の電子干渉計 (直径 460nm) である (図 1 上)。この素子の電子状態は、磁場やゲート電圧の印加によって制御することができる。図 1 下に磁場を変化させた場合の電気伝導度を示す。ここで見られる伝導度の振動は、アハラノフーボーム効果と呼ばれる電子波干渉によるものであり、素子が量子系であることを示している。

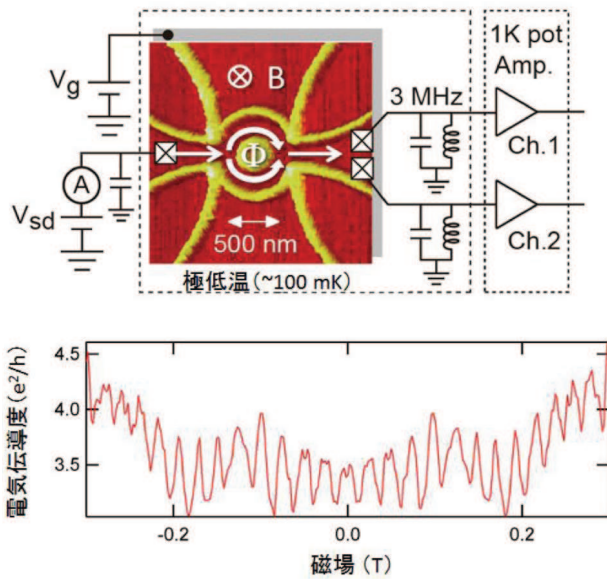


図1：(上) 測定した電子干渉計と測定の概略図。
(下) 電子の干渉を示す、アハラノフーボーム振動。

3-3. 結果と考察 [2]

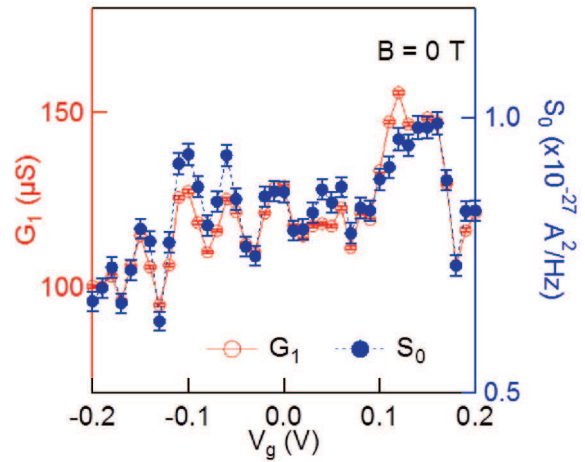
まず平衡状態 ($V = 0$) の時の結果を見てみよう。

図 2(a) にゲート電圧を変化させた時の伝導度 G_1 と熱雑音 S_0 の変化を示す。揺動散逸定理の教えるとおり、 G_1 と S_0 は比例している。

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、電流雑音の電圧依存性から S_1 を求めることできる。その二つの量のゲート電圧依存性を図 2(b) に示す。二つの量の間には明らか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「ゆらぎの定理」から予想される振る舞いに合致しており、線形応答理論を超える、新しい「非平衡ゆらぎ関係式」を実証したことになる。

私たちは、同様の実験を磁場中でも行っている。

(a) 平衡状態 ($|eV| \ll k_B T$)



(b) 非平衡状態 ($|eV| > k_B T$)

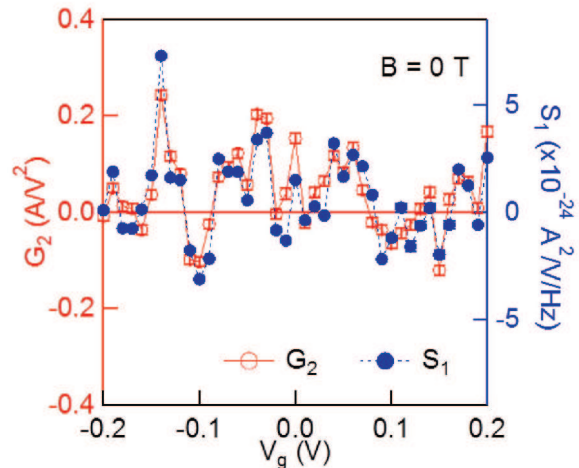


図2：ゲート電圧 V_g を変化したときの、応答係数の相関を測定した結果。

(上) 平衡状態近傍では、揺動散逸関係 $S_0 \propto G_1$ が成立。
(下) 電圧 V が大きく、非平衡状態になった場合に、「ゆらぎの定理」に基づく新しい非平衡ゆらぎ関係 $S_1 \propto G_2$ があることを示すデータ。

磁場は、系に時間反転対称性の破れをもたらすため、さらに別の関係式が成立することが分かっている。この話題は、非平衡系におけるオンサーガーの相反定理の破れとも関わる重要な話題であるが、ここではこれ以上は述べない。

4. まとめと展望

本稿では、ゆらぎの研究がどのような歴史と意義を持っているかを簡単に紹介した。私たちは、ここに紹介した研究以外にも、近藤状態による電子散乱

[3]、電子核スピン散乱 [4]、コヒーレント伝導の実証 [5]、半導体素子におけるシュテルンゲルラッハ実験の実現 [6] などの研究をおこなってきた。これらの研究においては、ゆらぎ測定が決定的な役割を果たしている。本稿によって、「ゆらぎ」を通して様々な現象の背後にある普遍的な物理にアプローチできるという事実の意義と面白さを感じ取って頂ければ幸いである。

謝辞 本研究は、小野輝男、中村秀司、山内祥晃、橋坂昌幸、知田健作（京都大学化学研究所）と、内海裕洋（三重大学）、齊藤圭司（慶應大学）、R. Leturcq (IEMN-CNRS)、K. Ensslin (ETH Zürich)、A. C. Gossard (University of California, Santa Barbara) との共同研究による成果である。本研究の一部は、最先端・次世代研究開発支援プログラムの助成を受けて行われた。

参考文献

1. 本稿の内容についてより詳しくは、小林研介「メゾスコピック系における電流雑音とゆらぎの定理」、*固体物理* Vol. **46**, 519-533 (2011).
2. S. Nakamura, *et al.* *Physical Review Letters* **104**, 080602 (2010); *Physical Review B* **83**, 155431 (2011) [**Editors' Suggestion**].
3. Y. Yamauchi, *et al.*, *Physical Review Letters* **106**, 176601 (2011).
4. K. Chida, *et al.*, *Physical Review B* **85**, 041309 (**Rapid**) (2012) [**Editors' Suggestion**].
5. T. Arakawa, *et al.*, *Applied Physics Letters* **98**, 202103 (2011); Y. Nishihara, *et al.*, *ibid.* **100**, 203111-1-203111-4 (2012); T. Tanaka, *et al.*, *Applied Physics Express* **5**, 053003 (2012).
6. M. Kohda, *et al.*, *Nature Communications* **3**, 1082 (2012).

