人工量子系の物理の展開

小林研介（京都大学化学研究所）

はじめに

近年、微細加工技術を用いて作られた小さな電子回路を舞台として、人工量子系の研究が活発に行われています。このような研究の醍醐味は、人間の手で量子力学的な効果を様々に制御できる点にあります。また、実験結果と理論との精密な比較が可能であることも、この分野の大きな特色です。定量的な研究を行うことによって、量子効果を利用した超高感度測定が可能となりますし、逆に、精密測定によって、これまでに思っても見ないような新しい現象が発見される可能性もあります。

本サブゼミでは、人工量子系の研究がどのように始まってきたか、そしてどのような方向をめざしていくのか、ご紹介していきたいと考えています。本稿では、第 1 章で人工量子系の研究について概略を述べます。そして、人工量子系を用いた私たちの研究の例として、第 2 章で量子複合系の研究、第 3 章で「揺らぎの定理」の検証実験について議論します。

第1章 人工量子系の研究

量子力学は、人類が原子や電子や光子を発見し、古典力学では理解できない不思議な現象を解明しようとする試みの中から生まれてきました。歴史をひもといてみると、量子力学が生まれた 19 世紀末から 20 世紀初頭の物理学はまさに霧の中を手探りで進むようなものであったことがよく分かります[1]。その当時の物語が今でも繰り返し語られるのは、量子力学誕生のドラマとそれに立ち会った科学者の道程が私たちの心をひきつけてやまないからでしょう。そして、そのような悪戦苦闘の中で、水素原子がエネルギー準位構造を持つことが導き出されたことは、産声を上げたばかりの量子力学にとって記念すべき成功でした。それ以降、量子力学は、原子物理・核物理・宇宙物理・固体物理などの物理学の諸分野だけではなく、化学や生物学に至るまでその適用範囲を着々と広げ、いまや自然を理解するためには無くてはならない手段となっています。

そして現在、物理の世界では新しい潮流が生まれつつあります。それは、自然を理解するための手段として量子力学を用いるばかりではなく、逆に、人工的に量子系を作り出し、その制御を目指す研究です[2]。その代表例として量子コンピュータの研究を挙げることができます。私たちの身のまわりにある普通のコンピュータは、0 か 1 かで記述される演算単位に基づいて計算が行われて

います。それに対し、0 と 1 という二つの状態間の量子力学的な重ね合わせを用いて演算を行うのが量子コンピュータです。演算を量子力学的に行うことによって、ある種の問題に対しては、普通のコンピュータに比べて圧倒的に早い実行速度が得られます。量子コンピュータの概念そのものは、20 年以上前に提案されたのですが、その当時はただの夢物語と思われていました。そのようなものをどう実現してよいのか、皆、見当もつかなかったのです。しかし、1990 年代後半頃から、その基本となる量子ビットが色々な系で作られるようになってきました[3]。

このような人工量子系は、「メゾスコピック系」と呼ばれることもあります。メゾスコピック系（mesoscopic 系）とは、バルク物質のように巨視的なサイズ（macroscopic）の物質でもなければ、逆に原子レベルのように小さなスケール（microscopic）でもなく、その中間（meso-）の大きさの系を扱う、という意味が込められています。このような人工量子系の研究が盛んになってきた背景には、近年の微細加工技術の発展があります。人工量子系の多くは、半導体や金属薄膜を微細加工して作られる数 nm～数 μm のサイズの小さいものです。しかし、それらはいくつかの外部パラメータによって制御できるようにデザインされており、小さな実験室と呼ぶにふさわしい系となっています。このような系を用いることによって、電子の電荷、スピン、位相情報、電子間相互作用など、多彩な量子効果を人間の手によって自在に制御することが可能となってきています[4]。まさに物性物理における新しく、かつ重要な展開と言えるでしょう。

人工量子系の研究が本格的に始まったのは、工業的に半導体素子の超微細化が進んできた 1980 年代初頭です。その当時は、単純な金属薄膜、超伝導体薄膜や半導体界面に形成される二次元電子系などが主要な舞台でした。しかし、1990 年代半ば以降、カーボンナノチューブを用いた量子伝導の研究が一世を風靡し、さらに 2004 年以降はグラフェン（単層のグラファイト）もそこに加わってきました。それ以外にも、種々の有機分子やフラーレン、ナノウィスカーなどが人工量子系の舞台となっています。また、MEMS（メムス、Micro Electro Mechanical Systems）技術の進展とともに、極小の機械振動子（通常はシリコン基板を切り出して作られる）を、極小の電子回路と組み合わせることによって、力学系－電子系の量子力学的結合系を作る試みも行われるようになってきました。また、近年ではトポロジカル絶縁体として知られる物質群も盛んに研究されています。

私は 1999 年以降、人工量子系の研究を行ってきました。第 2 章、第 3 章では、私の行ってきた研究について簡単にご紹介したいと思います。

第2章 量子複合系の研究

ここでは、人工原子（量子ドット）と電子波干渉計を組み合わせた系を舞台として行った我々の実験を紹介します。この実験は物質の波動－粒子二重性という量子力学の基本原理に関わるものです[5]。

2-1. 人工原子

最初に、人工原子（量子ドット）について簡単に御紹介しましょう。量子ドットとは電子が電荷 e を持つ粒子であるという粒子性に基づく系です。その本質は単電子効果と閉じ込め効果の二つにあります。

単電子効果から説明しましょう。図 1(a)のように、電子を小さな領域（ドット）に閉じ込めたとします。ドットはトンネル障壁を介して外部とリード線でつながっていると同時に、ゲート電極と静電的に結合しているとします。ドットとリード線やゲート電極を含む周囲との間の静電容量を C としましょう。ドットはコンデンサーとみなすことができ、ここに余分な電子を一個付け加えるためには e^2/C だけの静電エネルギーが必要となります。ドットが非常に小さく（すなわち C が非常に小さくなる）、かつ、ドットが十分低温にある場合、e^2/C が系の温度を上回るような状況が生み出されます。すると、ドットとリード線との間に電子のトンネルが起きず、ドット内の電子数は固定されてしまいます。これをクーロン閉塞状態と呼びます。このときの電子数を N 個としましょう。この状態でゲート電極に電圧を印加すると、ゲートや近傍のリード線を含むドット系全体の静電エネルギーが、電子が N 個の場合と N+1 個の場合とで等しくなるように調整できます。この時、ドット内の電子数は N と N+1 の間を揺らぐことが可能となり、リード線にいた電子はこれを利用してドットを通過できるようになります。この現象が単電子効果あるいは単電子トンネリングと呼ばれるものです。

電子密度の小さい半導体量子ドットでは、さらに閉じ込め効果も重

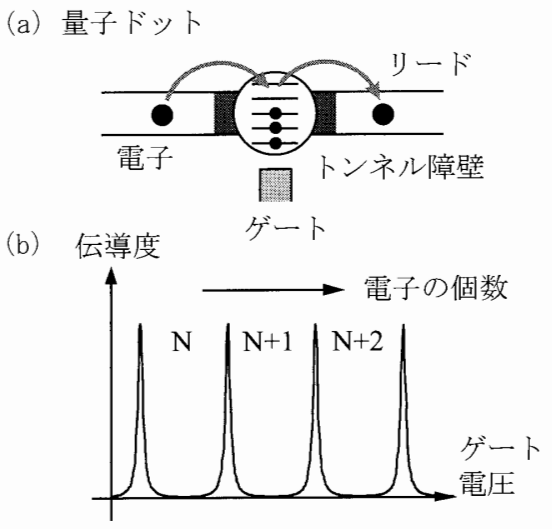


図 1(a) 量子ドット。電子を小さい領域に閉じ込め、トンネル障壁を介してリード線とつなげることで量子ドットを作ることが出来る。単電子効果と閉じ込め効果によって、ドット内の電子数は固定される。ただし、ゲート電圧によって電子数を制御することもでき、ゲート電圧の掃引によって量子ドットの伝導度は(b)のようにクーロン振動を起す。

要になってきます。すなわち、閉じ込めによってドット内のエネルギー準位が離散化します（量子力学を習い始めたころに、一次元箱型ポテンシャルを持つシュレーディンガー方程式を解いたことを思い出して下さい)。準位間の間隔が温度のエネルギーを上回る場合、電子のトンネルがただ一つの離散準位を介して行われることになります。この状況は、原子に導線をつなぎ、特定の原子軌道のみを通過する伝導現象を観測することに他なりません。

以上の現象は、実験では図 1(b)のように観測されます。ゲート電圧を変化させると、単電子トンネルが起こるようなゲート電圧のところでスパイク的な伝導度のピークが見られます。ピークとピークの間がクーロン閉塞状態です。ドット内の電子数は一個ずつ変化していくので、全体としてはピークがほぼ周期的に連なったような伝導度特性（クーロン振動）が得られることになります。

このような量子ドットは人工量子系の代表選手であり 1990 年代初頭から多くの研究が蓄積されています。例えば、量子ドットのエネルギー準位に殻構造が現れたり、電子の充填の仕方にフント則が現れたりするなど、原子物理でよく知られた現象が起こることが知られています。しかし、天然の原子とは異なり、量子ドットは数桁も大きいサイズ（数百 nm）を持つ系であり、関与するエネルギースケールは天然原子のものよりもずっと小さくなるため（典型的には meV 程度)、静電的あるいは磁気的に原子軌道やスピン状態を変化させたり、系を非平衡状態において原子準位の励起スペクトルを測定したりすることなど、天然の原子では簡単には出来ないような制御性の高い実験を行うことができます。近年では、近藤効果などの多電子間相互作用の制御を可能とする系として、あるいは高い将来性を持つ量子コンピュータの基本素子として、量子ドットはますます大きな注目を集めています。

2-2. 電子波干渉計

人工量子系の別の代表例に、電子波干渉計（アハラノフ・ボームリング、AB リング）があります。図 2 (a)のようなリング状の伝導体を考えます。リング全体に渡って電子の干渉性が保たれるとき、その電気伝導度は図 2 (b) のようにリングを貫く磁場に関して周期的に変動します。これが AB 効果であり、電子の波動性が劇的に現れる例の一つです。振動（AB 振動）が起きる理由は、電子波がリングの上側を通る場合と下側を通る場合とで、リングを貫く磁場の大きさに応じて異なる位相の変化をうけるためです。光の波動性を明らかにした実験にヤングの二重スリットの実験がありますが、 AB リングはその電子版といえるでしょう。 AB リングは 1980 年代に実現され人工量子系研究の先駆けとなったものですが、いまやハンバリー・ブラウン-トアイス干渉計やマッハツェンダ干渉計など、量子光学でおなじみの干渉計の電子版が次々と実現されています。

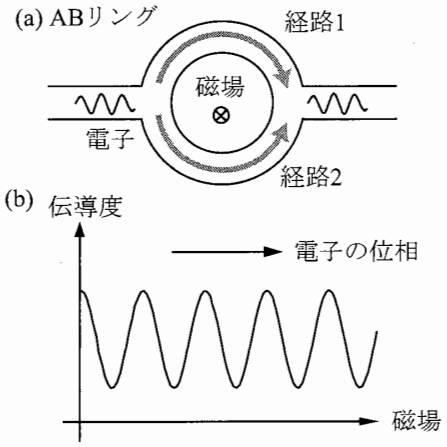


図2 (a) ABリング。入射した電子は矢印の経路を通り右へ通り抜ける。このとき、それぞれの経路を通る電子は、リングを貫く磁場に応じて異なる位相を得るため伝導度は磁場の掃引に対して図(b)のようにAB振動を起こす。

2-3. 量子ドット-ABリング複合系

ここまで見てきたように、量子ドットとABリングは、それぞれ電子の粒子性と波動性を明瞭に示す特色ある人工量子系であることがわかります。それでは、次にこの二つを組み合わせたABリング・量子ドット複合系を考えてみましょう。図3(a)のようにABリングの下側に量子ドットを埋め込んだとします。電子は、リングの下側を通過する際には電荷 e を持った粒子として単電子トンネリングするはずです。このとき果たして電子の波としての性質は現れるのでしょうか？

実験に用いた複合系の概念図を図 3 (a)に示します。実際の試料はAlGaAs/GaAs 界面に形成される二次元電子系上に作製されています（図 3(b)）。上側の量子ドットの無い方（以後、便宜上「アーム」と呼ぶ）は、静電的に遮断したり開いたり出来るようになっています。下側の3本のうち2本（RとL）は、二次元電子系を区切ることで量子ドットを形成するための電極で、適当な負電圧をかけるとトンネルバリアを作ることができます。真ん中の一本（G）は量子ドットのポテンシャルを静電的に外部から制御するゲート電極です。

まず、上側の経路を遮断しておき、電子が下側の量子ドットだけを通れるような状況を考えてみましょう。このときの伝導度は図 3 (c)の下のデータに示すような典型的なクーロン振動になっています。ピークの間は電子数固定であり、伝導度は完全にゼロです。次に、リングの上側も電子が通れるようにしてみましょう（図3 (c)上）。このとき複合系全体の伝導度はもちろん増加しますが、それだけでなくクーロン振動のピークが非対称な形になり、一方に裾を引いた特徴的な形になります。もともとピークだったものが完全にディップになってしまっている場所さえあります。それでも、クーロン振動の場所自体は上下のデータで良い一対一対応をしていることから、上側を電子が通過できるようにしたことによって量子ドット自体の性質が変わったわけではないことが分かります。

2-4. ファノ効果

温度変化や電流電圧特性などの測定を行った結果、この特徴的なラインシェープの起源がファノ効果であることが分かりました。ファノ効果とは、1935年に発見された原子スペクトルの非対称なピーク[6]を説明するために、1961年にファノ（U. Fano、1912-2001）が定式化したものです[7]。詳細は省きますが、一言でいえば、連続状態と離散状態との間の共鳴干渉効果です。この効果自体は、分光学においては極めて有名な現象です。たとえば、ラマン散乱、光電子放出、原子の光電離、光吸収、中性子散乱などで知られています。我々の結果は、もともとは原子分光で確立されたファノ効果が、人工原子系でも観測されるようになったという点にまず意義があります。しかし、このような系を人工量子系で実現することには、系が制御可能である点で、これまでにない利点があるのです。実際、例えば、連続状態を結合したり切り離したり出来る点（図3(c)）や、昇温によって系の干渉性（コヒーレンス）が減少しファノ効果が消失すること等が観測されています。最もユニークな点は、離散準位と連続状態が空間的に分離しており両者の位相差を制御できる点にあります。我々の実験では、磁場や電場によって、電子波の位相が制御可能であり、それにともなってファノ効果の現れ方が変更を受ける様子が得られています。

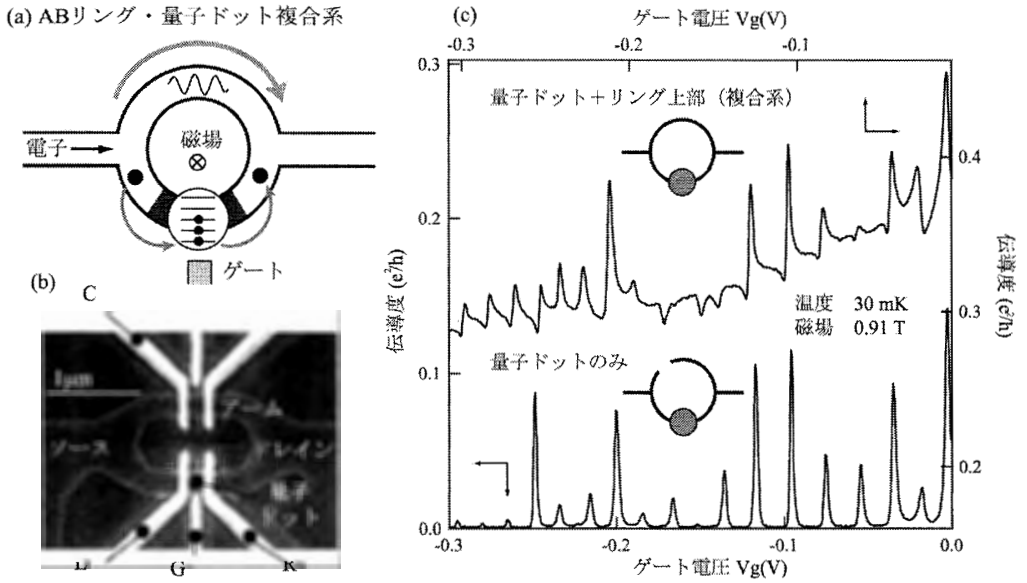


図 3 (a) AB リングと量子ドットの複合系。 (b) サンプルの走査型電子顕微鏡写真。AlGaAs/GaAs 二次元電子系上につくられている。(c) AB リング・量子ドット複合系の伝導度。下のデータは、リング上部の伝導を禁止し、電子が量子ドットのみを通過するようにしたもので、通常のクーロン振動である。上のデータは量子ドットもリング上部も同時に通過できるようにした際の伝導度。上下の伝導度のピーク位置はある程度対応しているが上のデータは非対称な特徴的なピーク構造を示す。これがファノ効果である。

2-5. その後の展開

先に述べたようにファノ効果は分光学においては何十年もの歴史があります。しかし、電気伝導現象においてその重要性が理論的に認識され始めたのは、1990 年代半ば以降であり、我々の実験は、その効果を初めて明瞭に実現したものです。その後の我々の実験により、単一の量子ドットにおけるファノ効果[8]、量子細線－量子ドット複合系におけるファノ効果[9]、ファノ効果と近藤効果の共存[10]など、様々な人工量子系でファノ効果が出現することが分かりました。また、半導体量子ドットに限らず、カーボンナノチューブにおけるファノ効果についても複数のグループから報告されています[11]。理論面での進展としては、ファノ効果と量子カオスとの関係[12]や、ファノ効果から見た電子波の位相発展の問題などに注目が集まっています。このように、ファノ効果は電気伝導現象の多くの局面に本質的な役割を果たす現象として、広く認知されるようになりました。

第 3 章 「揺らぎの定理」の検証実験

第 2 章では、人工量子系を通過する電子の伝導度に注目して行った実験についてお話ししました。現在、私たちは、系を通過する電流に含まれる揺らぎ（雑音）に注目して研究を行っています。このような電流揺らぎそのものを対象とする研究は、国内では、ほとんど行われていません。しかし、人工量子系における電流揺らぎは、世界的には長年にわたって大きな注目を集め、重要な研究分野となっています。その理由は、他の実験手法では得られないユニークで決定的な情報が得られることがあるからです。ここでは、電流揺らぎと、それを用いた「揺らぎの定理」の検証実験について簡単にご紹介しましょう。

3-1. 電流揺らぎとは

素子を電圧源に接続しバイアス電圧 V を印加したとします。流れる電流 I の時間変化を高精度の電流計でモニターします。もちろん、電流はある平均値 $\langle I \rangle$ を持っていますが、それだけではなく、その周りに必ず揺らぎ δI が生じます。そこで、次式で定義されるようなパワースペクトル密度 S を考えます。

$$S = \int e^{i2\pi ft} (\delta I)^2 dt \qquad \text{(式 1)}$$

これが電流雑音であり、その単位は定義式から明らかなように（[Hz]=[1/s]であることに注意）A^2/Hz となります。バイアス電圧 V がゼロ（すなわち素子が平衡状態にあるとき）の時、当然、平均電流値 $\langle I \rangle$ はゼロであすが、実は、電流揺らぎ $(\delta I)^2$ の平均値はゼロではありません。これは導体中に存在する電子の熱的な擾乱に起因します。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

はジョンソンーナイキスト雑音）と呼びます[13]。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、

$$S = 4k_BTG \qquad (式2)$$

と表されます。伝導度とは、$I=GV$ という風にオームの法則を満たす量であるので、この（式2）は素子にバイアス電圧 V を印加したときの応答を表す係数（G）が揺らぎ S に比例するという、揺動散逸定理の一例となっています[14]。

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ります。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ます。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（“ショット（shot）”とは“粒”のことです）と呼びます。1918 年、ショットキーは、二つの導体が絶縁体の障壁によって隔てられているような素子を通過する電流におけるショット雑音の表式を与えました[15]。

$$S = 2e\langle I\rangle \qquad (式3)$$

素子を通過する電子の平均個数を$\langle N\rangle$とすると、電流 I は $e\langle N\rangle$と表されます。その個数の揺らぎδNが、（統計学が教えるように）$\sqrt{N}$ に比例すると考えれば、電流揺らぎ$\langle \delta I^2\rangle$が電流に比例することが直感的に理解されます。（ただし、パウリの排他律や多体効果など、電子間に相関があると（式3）が常に成り立つとは限りません）。

（式 2）と（式 3）を比べると分かるように、平衡状態と非平衡状態では、質的に全く異なる式が得られています。このことは、非平衡状態は、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ます。特に電荷素量 e が、（式 3）に含まれており、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す。このことを利用した有名な例として、分数電荷の存在を検証実験が挙げられます[16]。90 年代の後半に、複数のグループによって、半導体量子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伝導担体が分数電荷 e/3 を持つことが示されました。電流を測定してもキャリアの実体は分かりませんが、電流の揺らぎ（電流の反射過程を反映）を見ることにより、キャリアの担体が e なのか、e/3 なのかを知ることができます。この結果は分数電荷というものが素励起として存在することに対する直接の証拠となり、ノーベル物理学賞（1998 年）につながりました。

3-2. 揺らぎの定理

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」について述べましょう。我々が日常的に行っている実験で得られる量（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を表します。例えば、素子に電圧を加えると素子の伝導度に

比例した電流が流れるという「オームの法則」は、その代表例です。しかも、先ほど見たように、その比例係数は、系が平衡状態において持つ揺らぎに対応するものであり、揺動散逸定理の代表例となっています。このような事実のもとに、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しました。この線形応答理論は、現在、物性理論を中心とした多くの理論研究において日常的に使用され、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ています[14]。

このように線形応答理論は非常に強力ですが、残念ながら、それが適用出来るのは系が平衡状態近傍にある時に限られます。しかしながら、我々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ります。例えば、光－物質相互作用や化学反応などはその好例であるし、生命現象はまさにその最たるものです。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（非平衡統計力学）が長年行われてきました。その試みの一つが「揺らぎの定理」なのです [17, 18]。

1993 年にエバンス－コーエン－モリスは揺らぎの定理を提唱しました[19]。熱浴に接続された微小な系におけるエントロピーの増大を考えます。彼らは、正のエントロピー生成と負のエントロピー生成の確率は独立ではなく、両者は簡単な関係式で結ばれていることを指摘しました。具体的には、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

$$\frac{P(\sigma_t = A)}{P(\sigma = -A)} = \exp(At) \qquad \text{(式 4)}$$

が、一般的に成り立つ、というものです。重要なことは、この式が非平衡状態においても厳密に成り立つ、という点にあります。さらに、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ります。一方、右辺で t=0 とおくと明らかであるが、ごく短時間においてはエントロピー増大の確率と減少の確率が同程度となること（すなわち、短時間では熱力学第二法則が破れても良いこと）も示しています。このように、この式は「熱力学第二法則（エントロピー増大の法則）」を定量的に記述するとも言えるでしょう。しかも、この式は、エントロピー増大というありふれた現象の確率(長時間では事実上1に等しい)が、エントロピーが減少するというほぼあり得ない現象が起こる確率と、定量的に厳密に結びついている、ということを意味する驚くべき式です。また、この式から先に述べた揺動散逸定理や、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のです。このように、揺らぎ

の定理は、それが見出されて以降、統計力学の分野で熱心に研究されてきました[17, 18]。

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ました。これらは古典系における実験なのですが、量子力学が支配的な系において成り立つかどうかは、検証されたことがありませんでした。我々の研究は、半導体量子系における電流揺らぎ測定を行うことにより、これを検証したものです。

3-3. 「揺らぎの定理」の検証

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 の多項式として表せます。

$$I = G_1 V + \frac{1}{2!} G_2 V^2 + \frac{1}{3!} G_3 V^3 + \cdots \qquad (式\ 5)$$

ここで、G_1 は伝導度（前述の G と同じ）であり、第一項だけを見ると、これはオームの法則です。つまり素子電流 I が G_1 だけで記述されるとき、系は線形領域にあり、通常の線形応答理論が適用可能です。しかし、印加電圧 V が大きいとき（その目安は $|eV|>k_BT$）、系は非平衡状態になり、一般には線形応答を示さなくなります。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ます。次に、電流雑音 S を考えてみましょう。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でしょう。

$$S = S_0 + S_1 V + \frac{1}{2} S_2 V^2 + \cdots \qquad (式\ 6)$$

ここで、S_0 は、熱雑音（ジョンソン・ナイキスト雑音）です。ここで、次の疑問が浮かぶことでしょう。すなわち、（式 5）と（式 6）の第一項の係数同士には明白な相関関係（式 2）がありますが、より高次の項についてはどうなのでしょうか。ここで先ほどの揺らぎの定理が登場します。近年の理論[20]によれば、揺らぎの定理を用いると、

$$S_1 = 2k_B T G_2 \qquad (式\ 7)$$

が成立することが示されています。この関係式は、明らかに非線形非平衡状態に対するものであり、ジョンソンーナイキスト雑音（揺動散逸関係）を超える、新しい関係式です。我々は、この関係式を実証することを目指しました。

3-4. 実験

実験では、試料の電流電圧特性を測定すると同時に、雑音のバイアス電圧依存性を測定しました[21]。（具体的な雑音測定の方法は、技術的に非常に面

白く、また工夫のしがいのあるところなのですが、ここでは述べません。）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です。この試料はバックゲートという、試料の背面にとりつけた電極によって、静電的に電子密度を制御することが可能です。

まず平衡状態（V=0）の時の結果を見てみましょう。図 4 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 の変化を示します。ごらんの通り、G_1 と S_0 は比例している。これは、ジョンソンーナイキストの定理の表れです。この関係から、電子温度は 125 mK と求まります。次に、非平衡成分を見てみましょう。電流電圧特性から G_2 を求めることができます。また、電流雑音のバイアス電圧依存性から S_1 を求めることできます。その二つの量のバックゲート依存性を図 4 に示します。二つの量の間に明白な比例関係があることが分かります。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、ジョンソンナイキストの定理を超える、高次の「非平衡揺らぎ関係式」です。

ここまでは、簡単のために磁場が無い場合に限って話を進めてきましたが、同様の実験を磁場中でも行うことが可能です。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、磁場中では、（式 7）だけでなく、さらに別の関係式も成立することが分かっています。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話題です。より定量的には、実験で得られた関係式は、定量的には理論の予想からのずれが観測されています。すなわち、理論の予想（式 7）に対して、我々は、

$$S_1 \quad = \quad 2k_BTG_2 \times (7.28 \pm 1.08)$$

を得ています。このように数倍程度のずれが起こる理由は、現時点では不明で

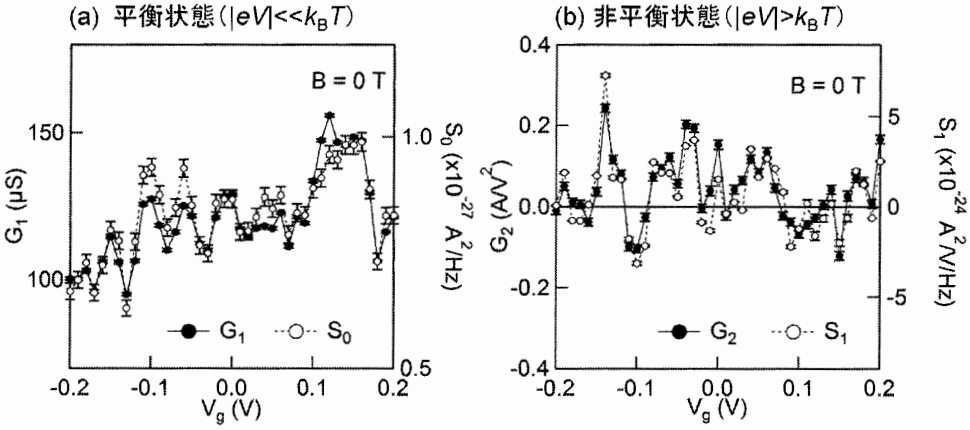


図 4　バックゲート電圧 V_g を変化したときの、応答係数の相関を測定した結果。（左）平衡状態近傍では、ジョンソンーナイキストの比例関係 $S_0 \propto G_1$ が成立。（右）V が大きく、非平衡状態になった場合の振る舞いに非自明な比例関係 $S_1 \propto G_2$ があることを示すデータ。

すが、最近行われた別の実験（量子系ではない）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ます。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ります。この食い違いを解明することは、今後の課題です。

むすび

本稿では、駆け足で人工量子系の研究について述べてきました。ここでは、具体的にどのような研究がおこなわれているかをイメージしていただくために、我々の研究の概略を紹介しましたが、この分野では、現在でも世界中で素晴らしい研究が次々と行われています。この分野の大きな目標は「人類が量子力学をどこまで制御できるか」ということを突き詰める点にあります。少しでも興味をもたれた皆さん、ぜひ、最新の論文誌をご覧になってください。量子力学について初歩的な知識しかなくても、最新の研究の意義を理解し味わうことができると思います。

なお、第 2 章で述べた研究については、私が東大物性研に助手として在職した時（1999-2005）の成果であり、共同研究者である勝本信吾教授、家泰弘教授、相川恒さん（東京大学物性研究所）に感謝します。また、第 3 章の研究は、2005 年に私が京大に着任して以降行ってきたもので、小野輝男教授、中村秀司さん、山内祥晃さん、知田健作さん（以上、京都大学化学研究所）と、橋坂昌幸助教（東京工業大学）、内海裕洋助教（現三重大学）、齊藤圭司助教（東京大学）、Renaud Leturcq 博士（フランス、IEMN-CNRS）、Klaus Ensslin 教授（スイス、ETH Zürich）、Arthur C. Gossard 教授（アメリカ、University of California, Santa Barbara）との共同研究による成果です。共同研究者の皆さんに感謝いたします。

参考文献

本稿では、入門書や教科書を中心に引用しておきます。ここに挙げた文献を参考に人工量子系とそれにまつわる物理への理解を深めて頂ければ幸いです。

[1] 例えば、江沢洋「量子力学　誕生から基礎の再反省まで」、「20 世紀の物理学」、江沢洋編著、サイエンス社 62 -69 (1998) 。

[2] 上田正仁「現代量子物理学　基礎と応用」（培風館、2004）はこのような視点に立って生き生きと書かれた好著です。

[3] 歴史的な視点で面白く書かれた記事として、古田彩「二人の悪魔と多数の宇宙 ： 量子コンピュータの起源」日本物理学会誌 **59,** 512 (2004)

[4] 教科書として、川畑有郷「メゾスコピック系の物理学」（培風館、1997）；勝本信吾「メゾスコピック系」（朝倉書店）。また、勝本信吾・パリティ編集委員

会（編集）「メゾスコピック村のアリス」（丸善）は、優れた研究成果が多数紹介されており、メゾスコピック物理の良い入門書です。
[5]量子ドット、電子干渉計、ファノ効果について、より詳しくは、小林研介、相川恒、勝本信吾、家泰弘、「量子複合系の物理：メゾスコピック Fano 効果」固体物理 **38,** 29 (2003).
[6] H. Beutler, Z. Phys. **93,** 177 (1935); U. Fano, Nuovo Cimento **12,** 156 (1935).
[7] U. Fano, Phys. Rev. **124,** 1866 (1961).
[8] H. Aikawa *et al.* J. Phys. Soc. Japan **73,** L3235 (2004).
[9] K. Kobayashi *et al.* Phys. Rev. B **70,** 035319 (2004).
[10] H. Sato *et al.* Phys. Rev. Lett. **95,** 066801 (2005).
[11] 例えば、J. Kim *et al.* Phys. Rev. Lett. **90,**166403 (2003).
[12] 例えば、V. Uski *et al.,* J. Phys. A: Math. Gen. **38,** 10819 (2005); U. Kuhl *et al.,* J. Phys. A: Math. Gen. **38,** 10433 (2005).
[13] J.B. Johnson, Phys. Rev. **32,** 97 (1928); H. Nyquist, Phys. Rev. **32,** 110 (1928).
[14] 歴史を概観できる記事として、中嶋貞雄「線形応答理論の成立」日本物理学会誌**50,** 699 (1995); 宮下精二「線形応答理論の成立と発展」日本物理学会誌 **63,** 748 (2008).
[15] W. Schottky, Ann. Phys. (Leipzig) **57,** 541 (1918).
[16] R. de-Picciotto, *et al.,* Nature **389,** 162 (1997); L. Saminadayar, *et al.,* Phys. Rev. Lett. **79,** 2526 (1997).
[17] 優れた教科書として、早川尚男「非平衡統計力学」（サイエンス社）
[18] 最近の非平衡統計力学の進展を概観できる記事として、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」
[19] D.J. Evans, E.G.D. Cohen, and G.P. Morriss, Phys. Rev. Lett.**71,** 2401 (1993).
[20] K. Saito and Y. Utsumi, Phys. Rev. B**78,** 115429 (2008).
[21] S. Nakamura, *et al.,* Phys. Rev. Lett. **104,** 080602 (2010).