

## ゆらぎで探る量子液体

小林研介 (大阪大学 大学院理学研究科)

### 当たって砕けろ

当たって砕けろという言葉がある。うまくいくかどうか分からないけれど、思い切ってやっつけてごらん、と自分や他人を鼓舞するための言葉である。誤解を恐れずに言えば、さしずめ、物理学における「当たって砕けろ」は衝突実験であろう。歴史的に、原子核・素粒子分野の研究者は、工夫をこらした様々な衝突実験によって新現象や新粒子を見出してきた。

本稿では、多数の粒子が集合して形成される「量子液体」と呼ばれる状態に対して、衝突実験を行った私たちの研究<sup>1,2)</sup>を紹介したい。私たちの衝突実験は、巨大な加速器ではなく、1  $\mu\text{m}$  程度の大きさしかない微小な電子回路を使って行われたものであり、関与するエネルギーも桁違いに小さい。私たちは、高感度な電流ゆらぎ測定によって、電子が量子液体に衝突する際に飛び出してくる「しぶき」を電気信号として検出した。このような、文字通り「当たって砕けろ」式の実験によって、量子液体の中で何が起きているのか、垣間見ることができる。このことを紹介するのが本稿の目的である。

### 量子液体

電子や原子などの粒子が一個だけある場合、シュレーディンガー方程式を解くことによって、その挙動を精密に理解できる (図 1a)。しかし、粒子が多数ある場合には、とたんに方程式を厳密に解くことはできなくなる。厳密に解けなくなる、というだけでなく、そのような粒子の集団が、粒子一個の性質からは全く予想もできないような挙動をすることがある。多数の同種粒子が量子的にゆらぎながら、お互いに相関を持って運動することによって、その集団が一体となって、あたかも液体であるかのように振る舞うようになることがあるのだ。このような粒子集団を「量子液体」と呼ぶ (図 1b)。超伝導は、量子液体の示す著しい性質の代表例である。

長年、いろいろな量子液体について数多くの研究が行われてきた。その結果、現在では、量子液体が平衡状態 (流れや変化のない状態) にあるときの振る舞いについては、相当程度まで定量的に理解できるようになってきた。しかしながら、量子液体が非平衡状態にある場合 (すなわち、流れや変化がある場合) の振る舞いを研究することは難しく、統一的に取り扱う方法は確立していない。

さらに一般的に、非平衡状態を理解することは現代物理学の最大の難問の 1 つである。身の回りを見渡してみると、非平衡であることが本質であるような現象には、枚挙に暇がない。光と物質の相互作用、トランジスタに代表されるエレクトロニクス、化

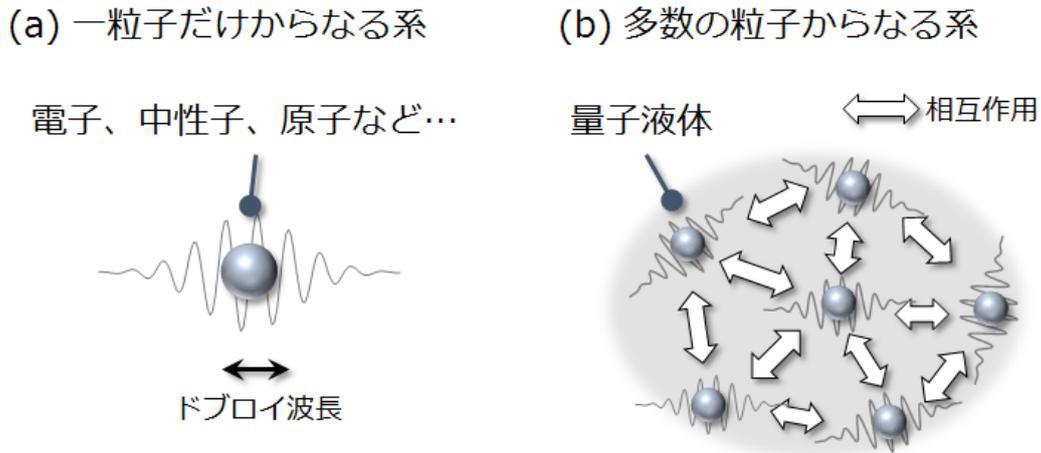


図1 (a) 粒子が一個だけある場合を示す。粒子は、粒子性だけでなく、ドブロイ波長で特徴づけられる波動性を持ち、量子力学的にゆらいでいる（図中の表現は概念的なものであることに注意）。粒子の振る舞いは、シュレーディンガー方程式を解くことによって完全に理解される。(b) 粒子が多数集合した状態。この時、粒子が量子力学的にゆらぎながら影響を及ぼし合うことによって、量子液体を形成することがある。その振る舞いは、粒子がただ一個ある場合とは質的に異なるものとなる。

学反応全般、さらには、生命そのものも、非平衡現象である。このような非平衡現象は、様々な個性を持つ構成要素が複雑に影響を及ぼし合うことによって起きており、本質的に難しい問題である。それに比べれば、量子液体を構成する粒子は単純であるし、相互作用の性質もよく分かっているので、問題設定としては明快である。したがって、量子液体の非平衡状態における振る舞いを理解することは、非平衡現象を定量的に理解するための良い試金石となっている。

### 人工原子と近藤効果

量子液体には様々な種類があるが、本研究で私たちが対象としたのは、電子回路上の微小な人工原子が近藤効果を示す際に生じる量子液体である<sup>3)</sup>。

まず、人工原子について説明する<sup>4)</sup>。図2aのように、2本の導線LとRの間に非常に小さい領域（ここでは「ドット（点）」と呼ぼう）を設けて、そこに電子を閉じ込めたとする。すると、条件さえととのえば、その近くにあるゲート電極の電圧を制御することで、ドットに含まれる電子数を1個ずつ変化させることができる。その時、ドットのことを人工原子（あるいは量子ドット）と呼ぶ。

なぜこのようなことが可能なのか。ドットに電子が一個だけある状態がエネルギー的に安定であるとしよう。このような状況は、ドットと導線との間の静電容量(C)が小さく、一電子あたりの帯電エネルギー $\sim e^2/C$ が温度のスケールよりも大きくなる

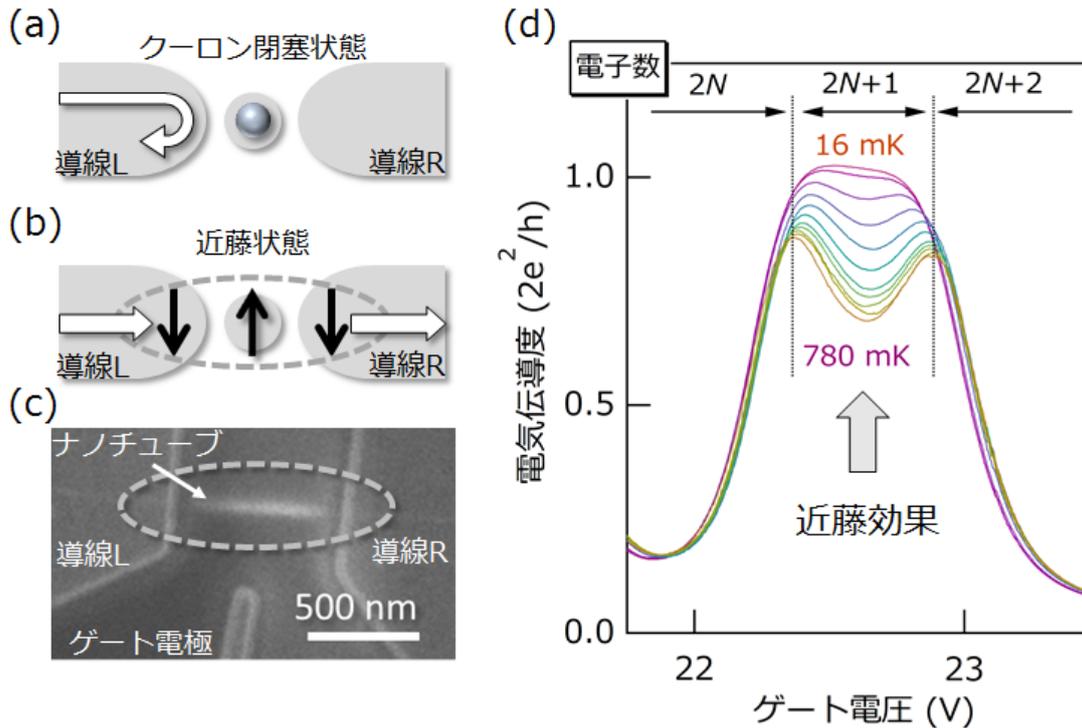


図 2 (a) 2本の導線 L と R の間に小さなドットがあり、電子が閉じ込められている様子。ドット内の電子数を一個ずつ制御することが可能な場合、ドットを人工原子と呼ぶ。図では電子が一個の場合を表示した。クーロン閉塞状態では、電子は人工原子を通過することができず、反射される（白抜き矢印）。(b) 電子はスピン自由度を持っている（黒色矢印）。スピン自由度によって、近藤効果が生じて、人工原子の周りに近藤状態が生成されているとき、クーロン閉塞状態にあるにも関わらず、電子は人工原子を通過する。(c) 実験に用いた試料の電子顕微鏡写真。点線で囲まれた領域の中央に見える白い筋が、カーボンナノチューブからなる人工原子。ここに生じる近藤効果を、電流と電流ゆらぎ測定によって調べた。(d) ゲート電圧を変化させ、人工原子内の電子数を  $2N$  (偶数)  $\rightarrow$   $2N+1$  (奇数)  $\rightarrow$   $2N+2$  (偶数) と変えた場合の電気伝導度。電子数が  $2N+1$  (奇数) の場合、近藤効果によって、温度を低下させると伝導度が増大する。

と起こる、微小な電子回路特有の現象である ( $e$ : 電気素量)。このとき、他の電子は、クーロンエネルギーを損するため、ドットに入ることができなくなる。この状況を「クーロン閉塞 (へいそく)」状態と呼ぶ。このとき、電子数を一個ずつ制御することが可能になる。さらに、ドットが小さいために、それを形作るポテンシャルの井戸に閉じ込められた電子が離散的なエネルギー準位を占有する、という「量子閉じ込め効果」も起きる。この状況でドットの電気伝導度を測定するという事は、「原子に導線をつなぎ、特定の準位のみを電子が通過するような伝導を観測する」とことと等価である。そこで、このようなドットのことを、人工原子と呼ぶわけである。なお、通常、人工原子の大きさは  $10\text{nm}$ ~数  $100\text{nm}$  程度であり、クーロン閉塞が起こるのは  $1\text{K}$  以下である。

近藤効果とは、このような状況で生じる典型的な量子多体现象である。しかも、近藤効果によって生み出される量子多体状態（近藤状態）は、量子液体の一種であることが確立している<sup>3)</sup>。このことを説明しよう。

さきほど、図 2a のようなクーロン閉塞状態では、他の電子が人工原子に入れない、と述べた。しかし、スピン自由度を考えると、近藤効果によって、全く異なった状況が出現する。電子は、上向き／下向きというスピンの自由度を持っている。図 2b のように、上向きスピンの電子が人工原子にいた場合、導線 L あるいは R から下向きスピンの電子が人工原子内に入り込んできて、人工原子の中で二つの電子が共存することが可能になる。もちろん、この状態はエネルギー的に不安定であるが、時間とエネルギーに関するハイゼンベルグの不確定性関係が許すような時間の間だけは、二電子の共存が許される。低温になればなるほど、このような量子ゆらぎに基づく仮想過程の頻度が増し、その結果として、クーロン閉塞状態にあるにも関わらず、人工原子を介して、左右の導線の間を橋渡しする状態が形成される。これを近藤状態と呼ぶ。近藤状態の形成にともなって、人工原子の電気伝導度は、温度が下がるにつれて(対数的に)増大する<sup>注1</sup>。これが人工原子における近藤効果であり、1998年に初めて報告された<sup>5)</sup>。

近藤効果は1963年の近藤淳の研究以来、様々な文脈で研究されてきた。1970年代には、近藤状態が「局所フェルミ液体」と呼ばれる量子液体であることが確立した<sup>3)</sup>。電子からは、この量子液体はどのように「見える」のであろうか。図 2b において、導線 L にいる電子が人工原子を通過して右側の導線 R に移動する、というイベントを考えよう。電子は、人工原子から遠く離れている場合、自由電子として(文字通り)自由に振る舞っている。しかし、電子は、人工原子に近づいていくにつれ、近藤状態の形成に参加することになり、次第に周りの電子の存在を「感じる」ようになるであろう。これは、電子が量子液体に組み込まれたことの反映である。そして電子は人工原子を通過して導線 R 内を移動しているうちに、またもとの自由電子へと戻っていくであろう。このような電子の移動、すなわち電気伝導を考えることは、量子液体に対する衝突実験とみなすことができる。では、このような衝突実験によって何が分かるのか、これからそれを見てみよう。

## 近藤状態の生成

私たちは、カーボンナノチューブを用いて作製された人工原子において、近藤効果を生じ、衝突実験を行った。図 2c に、カーボンナノチューブ人工原子の電子顕微鏡写真を示す。2本の導線の間、カーボンナノチューブが一本だけ挟み込まれた構造になっている。私たちは、すぐそばにあるゲート電極に印加するゲート電圧を制御することによって、理想的な近藤状態を実現した。図 2d をご覧いただきたい。グラフの横軸はゲート電極の電圧を、縦軸は人工原子の電気伝導度を表している。ここで、電気伝導度は、量子化伝導度と呼ばれる量  $2e^2/h = 77 \mu\text{S} = 1/(12.9 \text{ k}\Omega)$  で規格化している。

この図は、ゲート電圧を変化させると人工原子内の電子が一個ずつ変化し、それに伴って、電気伝導度が変化していることを示している。図の矢印で示すゲート電圧領域では、温度を 780 mK から 16 mK まで下げると、電気伝導度が増加する。これが近藤効果の証拠である<sup>注2</sup>。図に示すように電子数は、 $2N$  (偶数)  $\rightarrow 2N + 1$  (奇数)  $\rightarrow 2N + 2$  (偶数) と変化する ( $N$ は自然数)。近藤効果が起きるのは電子数が奇数個のときである<sup>注3</sup>。また、16 mK における電気伝導度が、ほぼ量子化伝導度  $2e^2/h$  であることにも注目したい。このことは、「ユニタリ極限」と呼ばれる理想的な近藤状態が形成されていることを示している<sup>5)</sup>。

もう一度、図 2c を見て欲しい。中心付近に人工原子の役割を果たすカーボンナノチューブがうっすらと見えている。私たちが相手にしているのは、これを介して両方の導線にまたがる、数ミクロン程度の大きさに広がった量子液体 (近藤状態) である。電子顕微鏡の写真であるとは言え、このような大きい単一の量子多体状態を相手に精密な研究ができるのは、微細加工技術の進展のおかげである。実験家冥利に尽きることである。

### 量子液体における電流ゆらぎ

それでは、この量子液体に、電子をぶつけると何が起こるだろうか。私たちは、人工原子を流れる電流  $I$  だけでなく、電流に含まれる電流ゆらぎ (電流雑音)  $S$  も同時に測定した<sup>1,2)</sup>。電流値  $I$  は、系を通過する電子の単位時間あたりの個数の平均値を表す。一方、電流ゆらぎ  $S$  は、電子の個数の分散 (平均値からのずれの二乗) に対応する<sup>6,7)</sup>。

まず、近藤状態が起こっていない、単純な場合に何が起こるかを示そう。図 3a は、単なるクーロン閉塞状態 (電子数が偶数個) の場合の測定結果を示す。横軸は人工原子を流れる電流  $I$  であり、右縦軸は電気伝導度、左縦軸は電流ゆらぎ  $S$  である。電気伝導度はほとんど電流値によらないが、その一方で、電流ゆらぎが電流  $I$  に比例している ( $S \propto I$ ) ことが分かる。これを理解することは難しくない。クーロン閉塞状態にある人工原子に向かって「電子を発射する」という試行を  $n$  回繰り返すとすると、電子は、通過することもあれば、反射されることもあるだろう。人工原子を電子が通過する確率を  $T$  とすれば、反射される確率は  $1 - T$  である。各過程が独立であれば、通過する電子数の期待値は  $nT$ 、その分散は  $nT(1 - T)$  となる (二項分布)。閉塞状態にあるとき、電子の透過率は小さい ( $T \ll 1$ ) ので、平均値と分散値は等しく  $nT$  となる (ポアソン分布)。両者が等しいことから、上に述べた  $S \propto I$  という関係、より正確には  $S = 2eI$  という関係式が得られる。このような単純な電流ゆらぎは、電子の電荷が  $e$  という離散量であることに基づいており、ショットキー型のショット雑音と呼ばれる<sup>6,7)</sup>。図 3a で得られた電流とそのゆらぎとの関係は、この式に完全に合致している。

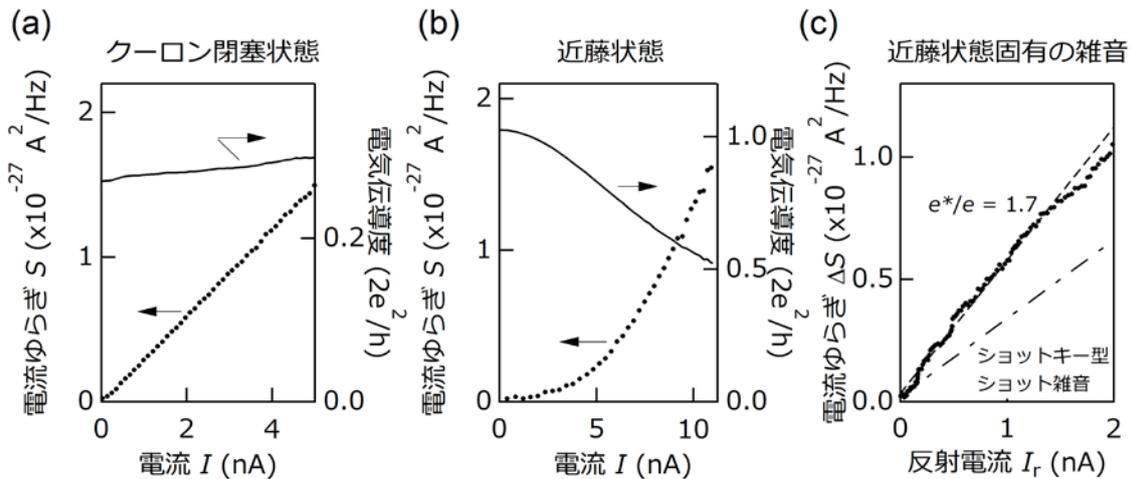


図3 (a) 人工原子がクーロン閉塞状態にある場合の電気伝導度 (右縦軸) および電流ゆらぎ  $S$  (左縦軸) を、電流  $I$  の関数として表示したもの。  $S = 2eI$  (ショットキー型ショット雑音) が成立している。(b) 近藤状態における電気伝導度と電流ゆらぎを示す。電気伝導度は、電流の増大とともに速やかに減少する。電流とゆらぎの関係が(a)とは全く異なるものになっている。電流が小さいときにはゆらぎは小さいが、電流が大きくなるとゆらぎが急激に増大していく。(c) (b)の測定結果をもとに、電流ゆらぎの増大成分を、人工原子から反射される電流値 (電気伝導度の減少分から求まる) をプロットしたもの。ふたたび、ゆらぎが電流に比例する結果が得られる。ただし、その比例係数はショットキー型ショット雑音 (一点鎖線) の場合とは異なる。

それでは、近藤状態では何が起こるだろうか。図3bを見て欲しい。前述したように、電流がほぼ0のとき ( $I \leq 2 \text{ nA}$ )、電気伝導度は  $2e^2/h$  となっており、完全な近藤状態が形成されている。このとき、電流ゆらぎ  $S$  はほぼゼロである。ゆらぎが無い、ということは、電子は、近藤状態で反射されることなく「するする」と通り抜けていくことを表している。完全な近藤状態が生じている結果、電子は、あたかも自由電子のように通り抜けることができるのである。言い換えると、電流がゼロ付近 (つまり平衡状態近傍) では、近藤状態は電子を反射させることのない「さらさらとした」量子液体であるのだ。

ところが、電流を大きくしていくと、電気伝導度が急激に小さくなっていく。例えば図3bでは、 $I = 10 \text{ nA}$  で電気伝導度はほぼ半分  $\sim 0.5(2e^2/h)$  になっている。これは、近藤状態に電子を絶え間なく注入するような、非平衡な状況になると、近藤状態が壊れてきて、電子が流れにくくなることを表している。逆に言えば、近藤状態が電子を跳ね返すようになったことを意味している。それにともなって、ゆらぎが急激に大きくなっていく。反射される電流の増大にともなって、ゆらぎが増大しているのだ。上の議論にならって、雑音の増加分  $\Delta S$  と反射電流  $I_r$  をプロットしてみよう。すると、図3cに示す

ように、 $\Delta S \propto I_T$  が成り立っている。つまり、先程のショットキー型のショット雑音がこのでも実現しているように見える。

もう少し詳しく見てみると、実は、 $\Delta S = 2eI_T$  のように表される単純なショットキー型のショット雑音 (図の一点鎖線) では無いことが分かる。というのも、今度は、 $\Delta S = (1.7 \pm 0.1) \times 2eI_T$  という関係が得られるのである (図に点線で示した)。つまり、単純に、電子が反射されるというだけでは説明できない現象が起こっているのだ。 $e^* = (1.7 \pm 0.1)e$  を有効電荷と呼ぶ。これが電気素量  $e$  よりも大きい、ということは、近藤状態においては、一個だけではなく、二個の電子が跳ね返ってくる場合があることを表している。

電子の立場になってこの現象を考えてみよう。導線 **L** から、絶え間なく注入される電子は、量子液体の中を通過する際に、強い相互作用を感じながら、導線 **R** に抜けていく。あるいは、伝導度の減少から分かるように、反射されて導線 **L** に戻っていく。このとき、電子にとっては、量子液体はもはや「さらさら」の状態ではなく、「粘り気のある」存在として感じられる。この粘り気 (相互作用) のために、量子液体から「しぶき」が飛び散るように、電子が二個反射されるイベントが発生し、電流ゆらぎが増大するのである。この現象は、非平衡状態にある量子液体に特有のものである。もともと、この量子液体は近藤効果によって生じたものであるが、平衡状態においては、その事実が陰に隠れてしまっており、「さらさらとした」量子液体に見えていたことを強調しておきたい。電子を注入する、という非平衡状態にすることによって (本稿の最初に「当たって砕ける」と述べた状況にすることによって)、初めて、ゆらぎの中に量子液体の本性が顔を出してくるのである。

電子系から構成される量子液体を扱う理論としてフェルミ液体論が知られている。この理論を非平衡領域に拡張した最近の理論研究によれば、理想的な近藤状態が実現しているとき、有効電荷  $e^*$  の値は  $5/3e$  である<sup>8)</sup>。これは実験値  $(1.7 \pm 0.1)e$  と極めて近い。私たちの研究によって、非平衡状態における理論の予言が高い精度で検証されたことになる。また、得られた有効電荷の値から、量子液体を特徴づける量であるウィルソン比が 2 であることを示すことができる。このことは、私たちの量子液体が強い電子相関の極限にあることを反映している。

## まとめ

近藤効果に対する実験的研究のほとんどは、多数のスピンを含む巨視的なサイズの試料の性質 (抵抗率や磁化率など) を測定する方法にもとづいている。しかし、人工原子では、電子の数を一個ずつ制御できるため、たった一個のスピンによって引き起こされる近藤効果を、現象に関わるあらゆるパラメータを制御しながら研究することができる。したがって、近藤状態にある人工原子は、非平衡状態も含む量子液体についての理論を、理論に忠実な形で高い精度で検証できる理想的な系である。実際、私たちの研究は、非平衡量子液体に関する理論を、これまでに知られている限り最も精密に検証し

た実験である。また、本稿では述べる余地がなかったが、私たちは、有効電荷が温度に对数的に依存することを見出している。これは、非平衡状態における未知の近藤スケーリングの存在を示唆している。

系を非平衡状態にすることによって、その系を生み出している相互作用の本質がくっきりと浮かび上がってくる、という事実は、非平衡を研究することの重要性の一端を物語っているのではないだろうか。本稿で述べたような固体素子における衝突実験によって、非平衡物理学の新しい展開が生まれてくることを期待している。

## 謝辞

本研究は、荒川智紀、秦徳郎、藤原亮（阪大理物）、M. Ferrier、R. Delagrance、R. Deblock、R. Weil（パリ南大-CNRS）、阪野墨（東大物性研）、寺谷義道、小栗章（大阪市大理）の各氏との共同研究によります。本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(S) (JP26220711)、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「ゆらぎと構造」(JP25103003) および「トポ物質科学」(JP15H05854)、矢崎科学技術振興記念財団の補助を受けて行われました。

=====

注 1：読者の中には、「近藤効果は、低温で抵抗が対数的に増大する現象ではなかったか」といぶかしく思われる方もいらっしゃると思う。確かに磁性不純物を含むような金属での近藤効果は、そのような振る舞いをする。これは、低温になるにつれ、磁性不純物の周りに近藤状態が形成された結果、自由電子の伝導が阻害されることが原因である。人工原子の場合は、逆に、磁性不純物（＝人工原子）を通過する伝導を考えるので、電気伝導度が増大することになる。いずれの場合でも、低温になると近藤状態が自発的に生成されることがポイントである。

注 2：実際には、低温で電気伝導度が増大する、という事実だけでは、近藤効果であることの確証にはならない。伝導度の温度依存性や磁場依存性、バイアス依存性などを定量的に解析することによって、近藤効果であることが確証できる。このような解析によって、近藤効果を生み出している全てのパラメータの正確な値が得られる。

注 3：私たちの人工原子は、カーボンナノチューブ上に作られている。ナノチューブは円筒状をしているため、その周りを右回りに回る電子の軌道と左回りに回る電子の軌道が縮退している。この軌道の自由度と、もともと存在しているスピンの自由度の両方があるために、電子が偶数個でも近藤効果が生じる場合がある<sup>2)</sup>。

## 文献

- 1) M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrance, R. Weil, R. Deblock, R. Sakano, A. Oguri, and K. Kobayashi: *Nature Physics* **12**, 230-235 (2016).
- 2) Y. Teratani, R. Sakano, R. Fujiwara, T. Hata, T. Arakawa, M. Ferrier, K. Kobayashi, and A. Oguri, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 094718 (2016); M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrance, R. Deblock, Y. Teratani, R. Sakano, A. Oguri, and K. Kobayashi: *Phys. Rev. Lett.* (in press).
- 3) 例えば、芳田奎「磁性」(岩波書店)、斯波弘行:「電子相関の物理」(岩波書店)。
- 4) 例えば、勝本信吾「メゾスコピック系」(朝倉書店)。
- 5) 樽茶清悟、佐々木智、W. van der Wiel、*日本物理學會誌* **60**, 110-118 (2005).
- 6) 小林研介: *固体物理* **46**, 519 (2011).
- 7) 小林研介: *数理科学* **600**, 7 (2013).
- 8) 阪野壘、小栗章、小林研介: *固体物理* **47**, 475 (2012).