



平成 29 年 4 月 28 日

分野:自然科学系 キーワード : 物性 I、ナノ構造物理、カーボンナノチューブ、人工原子、近藤効果、ゆらぎ

## 世界初！近藤効果の内部構造と量子ゆらぎの解明に成功

～物質の新機能開拓に結びつく成果～

### ❖ 研究成果のポイント

- 人工原子<sup>注1</sup>中に、カーボンナノチューブ<sup>注2</sup>の構造を利用した2種類の近藤状態<sup>注3</sup>を生成
- 超高精度で電流雑音<sup>注4</sup>を調査し、近藤状態の種類と量子ゆらぎ<sup>注5</sup>の関係を世界で初めて解明
- 超伝導など量子多体现象<sup>注6</sup>の理解と制御につながり、物質の新機能開拓に結びつく成果

### ❖ 概要

小林研介(大阪大学大学院理学研究科教授)、Meydi Ferrier(元・同理学研究科特任研究員および現・パリ南大講師)、荒川智紀(同理学研究科助教)および秦徳郎・藤原亮(同理学研究科大学院生)らは、小栗章(大阪市立大学大学院理学研究科教授)および阪野壘(東京大学物性研究所助教)らの研究グループとの共同研究において、微細加工技術を用いて作製された人工原子を用いて、カーボンナノチューブの構造を利用した異なる2種類の近藤状態を作りだし、世界最高水準の電流雑音測定によって、近藤状態の種類と量子ゆらぎの関係を解明しました。

近藤効果とは、1つの電子のスピンの周りに沢山の電子が集まり、一体となって新しい状態(近藤状態)を形成する現象です。代表的な量子多体现象であり、電子のスピンの向きがゆらぐこと(量子ゆらぎ)が本質的な要因となっています。また、人工原子に閉じ込められた電子が、スピンだけでなく、運動方向などの自由度も持っているときには、より多彩な近藤状態が生じることが知られています。(図1)

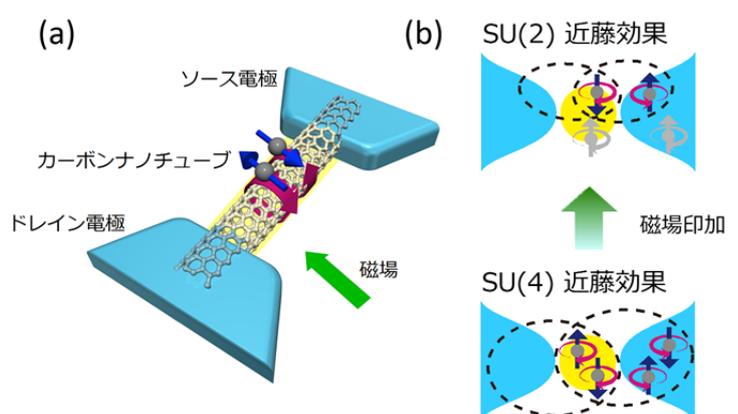
本研究では、近藤状態の種類に応じて、その量子ゆらぎの大きさが異なることを世界で初めて実証しました。近藤効果と量子ゆらぎは、ともに物理学の中心的な課題ですが、本成果は、量子多体现象のより深い理解と量子ゆらぎの制御につながるものであり、物質の新機能開拓など、今後の物質科学の発展に貢献していくものと期待されます。

本研究成果は、2017年5月8日(月)(米国時間)に「Physical Review Letters」のオンライン版に発表される予定です。

図 1:

(a)カーボンナノチューブ人工原子の概念図。人工原子内にある電子の個数は、ゲート電極によって、一個単位で制御できます。電子はスピン自由度(青矢印)と運動の自由度(チューブを取り囲む赤い矢印)を持っています。これらの自由度によって、SU(4)対称性を持った近藤効果が生じます。

(b)近藤状態の概念図。青い部分が電極を表し、黄色い部分が人工原子を表しています。磁場を印加していくとSU(4)近藤効果からSU(2)近藤効果に連続的に移り変わっていきます。



## Press Release

### ❖ 研究の背景

近藤効果とは、固体中にある磁性不純物のスピンの、その周りの電子のスピンの結合した新しい状態(近藤状態)を作ることによって生じる、量子多体現象の 1 つです。微細加工技術によって作製される「人工原子」と呼ばれる微小な電子回路では、電子の数を一個ずつ制御することによって、近藤効果を詳しく研究できます。

通常の近藤効果は、電子の持つスピンの自由度(上向き/下向き)の量子ゆらぎによって生じます。しかし、電子が運動方向などの自由度も持っている場合、異なる量子ゆらぎが発生し、種類の異なる近藤効果が生じます。自由度がスピンだけの場合、「SU(2)近藤効果」と呼びます。これがもっとも基本的な近藤効果です。しかし、自由度が多くなると「SU(4)近藤効果」などが実現します。

このような多彩な近藤効果は、「重い電子系」などの物質科学において盛んに研究されてきましたが、人工原子において自由度の数を人為的に制御できれば、より定量的な理解が可能となります。近藤効果による量子ゆらぎは電流雑音に非常に小さな信号として現れることが知られていましたが、その検出には、世界最高水準の電流雑音測定技術の開発が必要でした。本研究は、近藤効果の種類と量子ゆらぎの関係を世界で初めて解明したものです。

### ❖ 研究成果

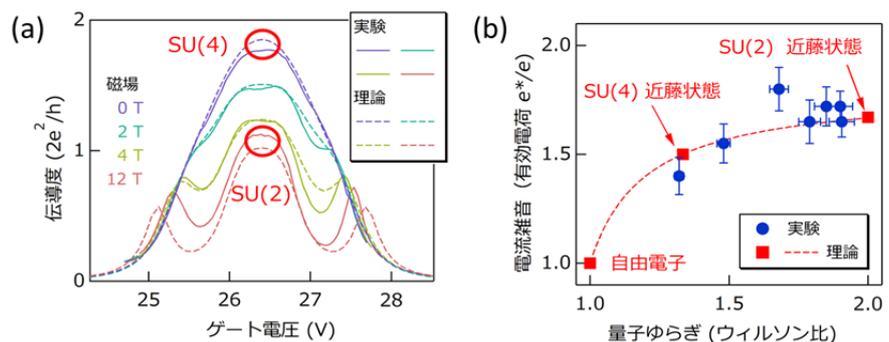
小林教授らの研究グループは、カーボンナノチューブを用いて人工原子を作製し、人工原子を通過する電流を測定することによって、その状態を精密に調査しました。人工原子内の電子は、スピン自由度(上向き/下向き)の他に、チューブを取り囲む運動方向の自由度(右回り/左回り)を持っています(図 1(a))。研究グループは、人工原子を制御することによって、理想的な SU(4)近藤状態を実現しました(図 1(b))。さらに、研究グループは、磁場を加えていくと、スピンと磁場の相互作用によって自由度の数が4から2へと変化し、SU(2)近藤状態に移り変わっていくことを発見しました(図 1(b)、図 2(a))。この変化の様子が理論計算で再現されることを確認し(図 2(a))、量子ゆらぎの指標である「ウィルソン比」を求めました。

研究グループは、電流だけではなく、電流に含まれる電流雑音を世界最高水準の測定技術で調べ、SU(4)近藤状態とSU(2)近藤状態のそれぞれについて、有効電荷<sup>注8</sup>を高精度で検出しました。有効電荷とは、電子が近藤状態によって跳ね返される様子を表す量のことです。近藤状態の場合、二個の電子が関わる伝導過程があり、それによって有効電荷が通常の値よりも増大します。研究グループは、近藤状態の種類が変化するにつれて、有効電荷と量子ゆらぎが連続的に変化することを実証しました(図 2(b))。このことから、量子多体現象において、有効電荷が量子ゆらぎの良い指標になることが確立しました。

図 2:

(a) 人工原子の伝導度のゲート電圧依存性(実線)。ゲート電圧を変化させると人工原子中の電子数が一個ずつ変化します。本研究では、赤丸をつけた領域で行いました。磁場が小さいときにはSU(4)近藤状態が生じており、磁場印加とともにSU(2)近藤状態に変化していくことを見出しました。この結果は、理論(点線)と一致します。

(b) 実験で得られた有効電荷と量子ゆらぎの関係。



### ❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

量子ゆらぎは、量子多体現象の発現に本質的な役割を果たすため、多くの研究が行われてきました。本研究は、電流雑音測定によって量子ゆらぎを検出する新手法を初めて実証したものです。本研究の発展によって、超伝導や超流動などの量子多体現象の理解が深まり、物質の新しい性質や機能を見いだせる可能性が期待されます。



## Press Release

### ❖ 特記事項

本研究成果は、2017年5月8日(月)(米国時間)に米国科学誌「Physical Review Letters」に発表される予定です。

タイトル : “Quantum Fluctuations along Symmetry Crossover in Kondo-correlated Quantum Dot”

著者名 : Meydi Ferrier, Tomonori Arakawa, Tokuro Hata, Ryo Fujiwara, Raphaëlle Delagrangé, Richard Deblock, Yoshimichi Tertani, Rui Sakano, Akira Oguri, and Kensuke Kobayashi

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)・基盤研究(C)(JP26400319)・若手研究(B)(JP15K17680, JP16K17723)、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。また、東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究の一環で行われました。

### ❖ 用語の説明

#### 注 1)人工原子

微細加工技術を使って 2 つの電極の間に極小の領域を作製した場合、取り付けられた電極の電圧を制御することで、領域に含まれる電子数を 1 個ずつ変化させることができますようになります。この領域が原子のような性質を持つため、人工原子と呼ばれます。人工原子を用いると、電気伝導度測定によって、電子一個の性質を調べることができます。

#### 注 2)カーボンナノチューブ

炭素の平面シートがぐるりと管状に丸まった物質。様々な優れた性質を持っており、飯島澄男氏による発見(1991年)以降、数多くの研究が行われています。本研究においても、ナノチューブが円筒状であるために、右回り/左回りという二通りの電子運動が存在するという事実が本質的な役割を果たしています。

#### 注 3)近藤効果と近藤状態

磁性不純物を含む金属において、不純物のスピンと伝導電子のスピンが相互作用を介して組み合うことで、スピン一重項(「近藤状態」)が形成され、低温での抵抗増大を示す現象のことです。1964年に近藤淳氏が初めて解明しました。近藤効果は量子多体現象の典型例であり、強相関電子系(重い電子系や高温超伝導)などの研究において数多くの研究が行われてきました。近年では、人工原子中の単一スピンによって引き起こされる近藤効果が研究されています。本研究は、スピンだけでなく、運動方向の自由度も関わる、二種類の近藤状態について行われました。

#### 注 4)電流雑音

電子回路で発生する電流の時間的な雑音のことを指します。電流雑音は、主に熱的なゆらぎに起因する熱雑音と電荷の離散性に起因するショット雑音からなります。本研究では、近藤状態に特徴的に現れるショット雑音に注目しました。測定では、電流の時間的なゆらぎを高速フーリエ変換によって電流雑音スペクトル密度に変換して評価します。

#### 注 5)量子ゆらぎ

ゆらぎとは、一般に、平均値の周りの時間的な変動を指します。その原因が量子力学に由来するようなゆらぎを、量子ゆらぎと呼びます。不確定性原理として知られているように、量子力学においては、物理量は一定の値ではなく、確率的に変動する量の期待値として表されます。この期待値からの時間的なずれが量子ゆらぎです。量子ゆらぎは量子多体現象の発現に本質的な役割を果たすため、その理解を目指して多くの研究が行われています。



## Press Release

### 注 6)量子多体現象

多数の粒子が量子力学的に相互作用することによって発現する物理現象を指します。超伝導、超流動、近藤効果などは量子多体現象の代表例であり、物理学における中心的なトピックとして長年研究が続けられています。

### 注 7)スピン

電子は、電荷を持っていますが、それ以外に、スピンという量をもっています。スピンがあるために、1つ1つの電子は、小さな磁石のように振る舞います。量子多体現象には、電荷だけでなく、スピンも非常に重要な要因となっています。本研究では、電子が二つ人工原子にある場合を扱っています。ここでは、それぞれの電子の持つスピンの向きと運動方向の組み合わせのことを、内部構造と呼んでいます。

### 注 8)有効電荷

電子が状態によって散乱される状況の特徴づける量。電流雑音測定から得られます。量子多体現象が生じておらず、電子がごく普通の電子一個として振る舞うとき、有効電荷の大きさは 1 のままです。本研究では、電子が SU(4)近藤状態と SU(2)近藤状態によって散乱される場合に、有効電荷の大きさがそれぞれ  $3/2$  と  $5/3$  になる、という理論予測を定量的に実証しました。さらに、量子ゆらぎとの関係を明らかにしました(図 2(b))。