量子ドットの近藤効果を引き起こす磁気モーメント の探索

カーボンナノチューブ量子ドット中の巻方向の運動自由度 とスピンで構成された磁気モーメントにより発現した近藤 効果を、非線形電流と電流ノイズにより観測した、最近の 実験研究[1]について紹介する。特に磁場下での磁気モー メントの変化に起因した、近藤状態の遷移を観測すること に成功した。

近藤効果は典型的な電子の多体効果として知られていて、 その発現機構は1964年に元物性研助手(1960年-1963年在 籍)の近藤淳氏によって解明され、現象の名には近藤氏の 名前が冠されたことをご存知の方は多いだろう。元々は希 薄磁性金属中の不純物の持つ磁気モーメントとホスト金属 の電子の磁気モーメントが、低温で一重項基底状態を形成 し、磁気モーメントを消失する現象として調べられてきた。

本研究では、図Aのようなカーボンナノチューブの両側に アルミニウムのリード電極(水色部分)を取り付けた素子を 使って近藤効果を調べた。このような素子は、人工的に作 り込まれているため、希薄磁性金属に比べ多くのパラメー ターを制御しながら実験が可能である。さらに電極間の電 圧を制御することで非線形電流を詳しく調べることが可能 である。

この素子では、電極とナノチューブの間にトンネル障壁 が形成され、電極に挟まれたナノチューブ部分に狭い領域 ができる。この領域は量子ドット呼ばれる。特徴的なこと は、この量子ドットにさらに絶縁した電極を取り付け、電

物性理論研究部門 版野 塁

気的ポテンシャルを制御することでドット内に電子を閉じ 込め磁気モーメントを発現させることができることである。 低温で近藤効果が起こると、量子ドット中にフェルミ準位 付近に共鳴準位が形成されリード電極間に電流が発生する。 これまで電流特性に現れる近藤効果が調べられてきた。特 にカーボンナノチューブで作られた量子ドットの場合、ス ピンの自由度のみならず、ナノチューブの巻方向の運動の 自由度(軌道)に起因した磁気モーメントが発生する(図 A の差し込み図)。ここに磁場を任意の方向へ印加すること で、スピンのみならず、軌道の分裂を調整することができ る。例えば、ナノチューブの円筒を貫くように磁場を印加 すると軌道は強く分裂するが、法線方向に磁場を印加する と軌道は全く分裂せず、スピンのみが分裂することになる。

本研究では磁場印加方向を調整することで、カーボンナ ノチューブ量子ドットに2電子 SU(4)近藤状態と SU(2)近 藤状態を発生させ、その間のクロスオーバーの観測に成功 した。軌道分裂とスピン分裂がちょうど同じ大きさになる ように磁場の向きと大きさ調整する。このとき図Bで見ら れるように、ドットの2電子状態の基底状態は縮退が解け ずにのこる。そのため、この準位により大きな磁場状態で は、SU(2)近藤効果が起こる[2]。逆に磁場が小さいところ では、軌道自由度とスピンの縮退により SU(4)近藤効果が 起こる。

問題は、この2つの近藤効果の基底状態はいずれも完全 に磁気モーメントを消失した局所フェルミ流体を示すため、 電流(帯磁率、比熱なども)の電圧や温度依存のべき乗則を



調べても違いがなく、区別することが難しいことである。 エネルギースケールである近藤温度は、SU(4)近藤効果の ほうが大きくなるが、これも外場によって変化する系の詳 細に依存してしてしまうため、実験結果を一概に比較する ことは難しい。また、一般には軌道間のクーロン相互作用 がスピン間のクーロン相互作用に比べて小さいことに起因 して、各軌道で独立に SU(2)の近藤効果が起こる可能性が ある。したがって、磁場がないところで SU(4)近藤効果の 形成を確認する必要もある。

そこで我々は非線形電流ノイズのファノ因子を調べた。 ファノ因子は近藤効果を起こしている量子ドットの磁気 モーメントの構造に応じて固有の値とり、準粒子の量子揺 らぎの大きさを与えるウィルソン比によって決まる。図 c はファノ因子のウィルソン比依存性である。実際の実験で は磁場を変化させることで、ウィルソン比の大きさを制御 している(実験で印加した磁場の大きさに対応するウィル ソン比の大きさは、数値繰り込み群で決めている[2])。 ウィルソン比は、ゼロ磁場の4/3=1.33 …から、磁場の大 きいところでの2まで変化させている。このとき、ファノ 因子 F はゼロ磁場での F=1.4±0.1 から、強磁場下での F=1.7±0.1 へ変化していることがわかる。それぞれ、

SU(4)近藤効果の理論 値の F=3/2 と、SU(2) 近藤効果の F=5/3[3,4] によく一致している。 つまり、この 2 つの 近藤効果のクロスオー バーを磁場により制御 し、電流ノイズの非線 形成分から観測するこ とに成功した。



カーボンナノチューブなどを利用することで、素子中に 様々な近藤効果を形成することができる。しかし、磁気 モーメントが完全に遮蔽されてしまう局所フェルミ流体状 態では、物理量の外場依存性のべき乗則からそれらを区別 することは難しい。しかし、ウィルソン比を決めることで 磁気モーメントの構造の異なる近藤効果を特定することが 可能になる。ウィルソン比を帯磁率と線形比熱係数の比と して直接決めることが難しい場合でも、電流ノイズのファ ノ因子を用いれば精度良く、近藤効果を調べることができ る。 最後に、この実験で用いた非線形の電流や電流ノイズを 用いた手法が、電子相関研究の深淵を探索する新しい手段 となることと期待する。

謝辞 本研究は、荒川智紀氏、小栗章氏、小林研介氏、 寺谷義道氏、秦徳郎氏、Meydi Ferrier 氏を中心とした、 大阪大学、大阪市立大学、フランスのフランス国立科学研 究センター、パリ南大学との共同研究の成果である。また、 本研究は科学研究費(JP26220711, JP16K17723)の助成 を受けて行われた。

- Meydi Ferrier, Tomonori Arakawa, Tokuro Hata, Ryo Fujiwara, Raphaëlle Delagrange, Richard Deblock, Yoshimichi Teratani, Rui Sakano, Akira Oguri, and Kensuke Kobayashi, Phys. Rev. Lett. **118**, 196803 (2017).
- [2] Yoshimichi Teratani, Rui Sakano, Ryo Fujiwara, Tokuro Hata, Tomonori Arakawa, Meydi Ferrier, Kensuke Kobayashi, and Akira Oguri, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 094718 (2016).
- [3] R. Sakano, T. Fujii, and A. Oguri, Phys. Rev. B 83, 075440 (2011).
- [4] Rui Sakano, Akira Oguri, Takeo Kato, and Seigo Tarucha, Phys. Rev. B 83, 241301(R) (2011).