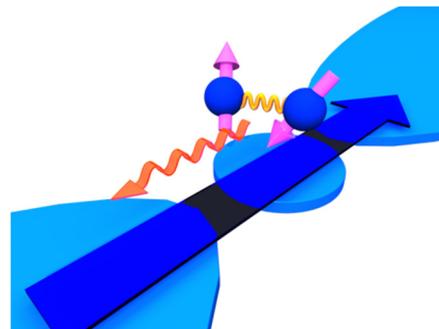
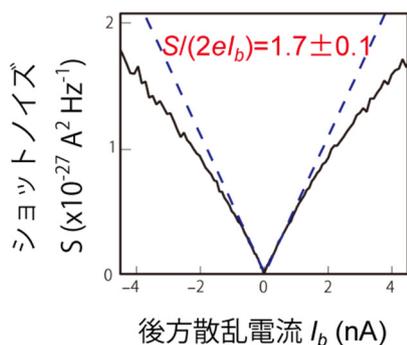


この近藤効果のおこっている量子ドットを横切る電流を詳しく考える。量子ドットのフェルミ準位付近には準粒子の準位が形成し、これを介した電流が流れる。とくに量子ドットに取り付けた電極を制御して、準位がフェルミ面直上に位置すると、準粒子のトンネル効果によって完全透過の電流が発生する。完全透過の電流は絶対零度では全くノイズを持たない。しかし、準粒子準位は寿命幅を持つので非線形応答では僅かに後方散乱され、ショットノイズを発生させる。これは単純な準粒子の反射であるので、有効電荷は素電荷のままである。しかし、さらに励起状態では局所フェルミ流体の残留相互作用によって、前方に流れていた電子の流れの中に、非常に小さな確率で2つの準粒子が励起される。このとき準粒子が1つだけ後方散乱される過程と、対で後方散乱される過程が起こる。特に、この後者の持つ有効電荷は倍電荷となり、近藤効果による非平衡電流の有効電荷を特徴づける(右図)。実際の観測では総電流から線形電流を差し引いたものが後方散乱電流となり、この後方散乱電流のショットノイズと平均電流の比をとって、有効電荷を考える。理論予測によるとスピン近藤効果場合、この値は $5/3$ となり、また、スピンの他に2重の軌道縮退のある場合は $3/2$ になると考えられている[3-6]。ここまでの議論のとおり、この分数値は励起状態素電荷ではないが、1より大きく2以下の値をとることで、電流中に倍電荷状態が形成されていることを示していて、局所フェルミ流体の相互作用が作用し励起対を形成したことの直接的な結果である。

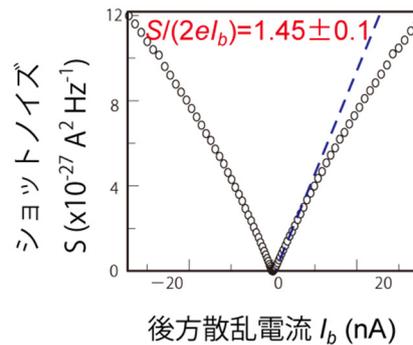


近藤効果のショットノイズの観測 実験では、カーボンナノチューブ量子ドットに伝導電子としてアルミニウムを蒸着した素子を用い、温度 16mK の希釈冷凍機中で電流ノイズの観測を行った。アルミニウムの超伝導状態を壊すために 0.08T 磁場が印加されている。この素子の多体効果のエネルギー・スケールである近藤温度は数 K であり、温度、磁場は十分に小さい。このエネルギー・スケールより十分に小さなバイアス電圧で発生するごく微小な電流を観測するため、世界最高水準のノイズ測定技術を用いている。観測によって得られたショットノイズと電流の比はスピン近藤効果で、 1.70 ± 0.1 [図(a)]、スピンと2重の縮退のある場合は 1.45 ± 0.1 [図(b)]となり理論予測と大変良く一致している。さらにバイアス線型ノイズや非平衡の平均電流の観測データと相補的に比較することで、ショットノイズの観測精度を保証している。

(a) スピン近藤効果



(b) 2重軌道とスピンによる近藤効果



実は 2011 年発表された論文でも、同じように小林グループで行われた、2次元量子井戸に電極を貼り付けて作られた横型量子ドットでの近藤効果によるショットノイズの実験観測[7]が行われ、理論部門の藤井達也氏とともに参加した。そのときは、低温で近藤効果の発生に伴った、ショットノイズの増幅は確認されたが、横型量子ドットが外部制御に対して不安定であることや、近藤温度に対し十分に温度が下がりきらなかったことなどがあり、決定的と言えるまでの結果には至らなかった。今回の成功の要因には、ノイズ測定技術を向上させたことの他に、カーボンナノチューブ量子ドットを用いたことがあげられる。クーロン相互作用が大きく、近藤温度を大きくできたため、有効的に温度が下げられた。また、

外部制御に対して非常に安定である。その分、幾つかの特性は制御しにくいので、加工の段階で多くの素子を準備し、狙った特性が出るものを探すという努力が必要になった。

この実験によって近藤効果の局所フェルミ流体特性を、残留相互作用によって発生した準粒子対によるショットノイズの増幅を通して直接的に検証された。本研究はショットノイズを利用した多体効果の研究に道筋をつけるものである。

謝辞 本稿の内容は、荒川智紀氏、小栗章氏、小林研介氏、秦徳郎氏、Meydi Ferrier 氏、藤原亮氏との共同研究にもとづいています。論文の共著者の他にも、本研究に関連した議論を行ってきた、大阪市立大学の西川裕規氏、寺谷義道氏、物性研究所の藤井達也氏、三重大学の内海裕洋氏に感謝いたします。本研究遂行に関しては、加藤研究室秘書の江口浩子氏には何度も急な出張手続きなど、お願いをしてきましたが、滞り無く研究が進めることができるようにして下さったこと、感謝しております。最後に実験グループとの共同研究に理解を示し、後押しをして下さった加藤岳生准教授に感謝いたします。

- [1] Y. M. Blanter and M. Buttiker, *Phys. Rep.* **336**, 1 (2000).
- [2] Meydi Ferrier, Tomonori Arakawa, Tokuro Hata, Ryo Fujiwara, Raphaëlle Delagrangé, Raphaël Weil, Richard Deblock, Rui Sakano, Akira Oguri and Kensuke Kobayashi, *Nat. Phys.* **12**, 230–235 (2016).
- [3] Eran Sela, Yuval Oreg, Felix von Oppen, and Jens Koch, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 086601 (2006).
- [4] A. O. Gogolin and A. Komnik, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 016602 (2006).
- [5] R. Sakano, T. Fujii, and A. Oguri, *Phys. Rev. B* **83**, 075440 (2011); Rui Sakano, Akira Oguri, Takeo Kato, and Seigo Tarucha, *Phys. Rev. B* **83**, 241301(R) (2011).
- [6] Christophe Mora, Pavel Vitushinsky, Xavier Leyronas, Aashish A. Clerk, and Karyn Le Hur, *Phys. Rev. B* **80**, 155322 (2009).
- [7] Yoshiaki Yamauchi, Koji Sekiguchi, Kensaku Chida, Tomonori Arakawa, Shuji Nakamura, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Tatsuya Fujii, and Rui Sakano, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 176601 (2011).