

ネオジム系でも 2 チャンネル近藤効果が起こる！？

微量の磁性不純物を含む金属の電気抵抗極小現象は 1930 年代に発見され、長らく謎であったが、1964 年に 1 つのスピンが 1 種類の伝導電子と混成するとして近藤淳が解明し、以来、近藤効果と総称されている。その後、スピンの 2 種類の伝導電子と混成する場合の異常金属状態が 2 チャンネル近藤効果として注目されたが、1987 年にスピン（双極子）のかわりに軌道（四極子）を用いる機構が U 系で提案され、Pr 系も含めて研究が行われた。それから新たな系の提案はなかったが、今般、本論文において、Nd 系でも 2 チャンネル近藤効果が起こることが理論的にはじめて示された。

金、銀、銅などの電気をよく通す金属に、マンガンや鉄などの磁性不純物を 0.01 から 0.1% 程度の極微量混ぜると、低温で電気抵抗が極小を示すことは 1930 年代には既に知られていたが、その原因は長らく謎であった。1964 年、近藤淳は、局在電子の持つ磁石としての性質、すなわち、上向きと下向きの 2 つの状態をとるスピンの自由度に注目し、1 つのスピンが 1 種類の伝導電子と混成しているモデルを解析した。そして、スピンの自由度が伝導電子との混成によって打ち消される過程で、電気抵抗極小現象が現れることを鮮やかに示した。そのため、現在では、金属中の磁性不純物に関する現象は、近藤効果あるいは近藤問題と総称されている。

その後、局在電子と混成する伝導電子の種類が増えた場合に興味に移った。1 つのスピンが 2 種類の伝導電子と混成しているとき、通常の金属状態（フェルミ液体）とは質的に異なる異常な金属状態（非フェルミ液体）が現れることが、1980 年にノジュールとブランダンによって示された。その異常性は、たとえば、 $\log\sqrt{2}$ という中途半端な残留エントロピーに現れている。これは 2 チャンネル近藤効果と呼ばれ、非フェルミ液体状態が現れる好例として注目を集めた。特に、さまざまな物理量に通常とは異なる温度依存性が現れるので、非フェルミ液体状態の実際の検証が期待された。

実際の物質系で 1 つのスピンが 2 種類の伝導電子と混成する状況を作り出すことは難しいと考えられていたが、1987 年にコックスは、イオンあたり f 電子が 2 個の U^{4+} の場合に、スピン（双極子）ではなく、電子の軌道（四極子）の自由度が擬スピンとして 2 種類の伝導電子と混成する場合があることに気づいた。コックスは、これを四極子近藤効果と名付け、これにより、2 チャンネル近藤効果の実験的研究が大きく進展することとなった。その後、 Pr^{3+} の場合も含めて、30 年の長きに亘って、四極子近藤効果として 2 チャンネル近藤問題の研究が行われた。

四極子近藤効果を実現するには、立方対称の U あるいは Pr 化合物が非クラマース縮退（非磁性の 2 重縮退）のある基底状態を持つ必要がある。一方、時間反転対称性に起因するスピンの二重縮退はクラマース縮退と呼ばれ、オリジナルの 2 チャンネル近藤効果はこちらを利用する。コックスのアイデアは秀逸であったが、クラマース縮退を利用する 2 チャンネル近藤効果が実現する系は本当に存在しないのだろうか。U 系や Pr 系以外では 2 チャンネル近藤効果は起きないのだろうか。

この長年の疑問に答えるために、首都大学東京の堀田貴嗣教授は、7 軌道の局在 f 電子が 2 軌道の伝導電子と混成するモデルを解析し、イオンあたり f 電子が 3 個の Nd^{3+} の場合に 2 チャンネル近藤効果が起こることを示した。U 系や Pr 系以外で 2 チャンネル近藤効果が起こる可能性を具体的に示した初めての例である。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2017 年 8 月号に掲載された。

その結果を簡単に紹介する。図 1(a)は、局在 f 電子数が 3 のときのエントロピーの計算結果をカラーマップで示したものである。横軸の x は電子状態を変えるあるパラメーター、縦軸は温度である。図中の U は f 軌道のフント則エネルギー、 λ はスピン・軌道相互作用、 W は結晶場ポテンシャル、 V は混成の強さであり、エネルギー単位は eV である。伝導電子バンド幅は 1eV としている。黄色の領域ではエントロピーがほぼ $\log\sqrt{2}$ になっており、2 チャンネル近藤効果が起こっていることを示唆している。

図 1(b)は、 Nd^{3+} において 2 チャンネル近藤効果が起こる場合の局所電子状態を模式図で表したものである。関係の深い軌道は 7 つのうち 3 つであり、それらを丸で示し、電子の「スピン」(磁気モーメント) を矢印で表している。3 つの軌道のうち 2 つは同じ対称性を持つ軌道なので同じ緑色に、残る 1 つの軌道は異なる対称性を持つので黄色にしてある。軌道内クーロン相互作用が強いため、1 つの軌道には 1 つの電子が入り、3 つのスピンからなる状態が生じる。オレンジの楕円は、緑色と黄色の軌道のスピンの打ち消し合っている状態を表しており、残りのもう一つの緑色の軌道を占めるスピンの状態を決める。緑色の 2 つの軌道は同じ対称性の 2 種類の伝導電子と混成するので、結局、黄色の軌道のスピンを緑色の軌道のスピンの伝導電子で打ち消すことになり、ノジエールとブランダンが考えた磁気的な 2 チャンネル近藤効果の状況が実現していると考えられる。

Nd 化合物で 2 チャンネル近藤効果が観測されているわけではないが、今後、たとえば、 $\text{NdIr}_2\text{Zn}_{20}$ などのいわゆる Nd1-2-20 系において実際に見つけることが期待される。常圧で反強磁性状態でも、圧力を印可して金属状態に変化させたとき、非フェルミ液体状態になる面白い可能性がある。

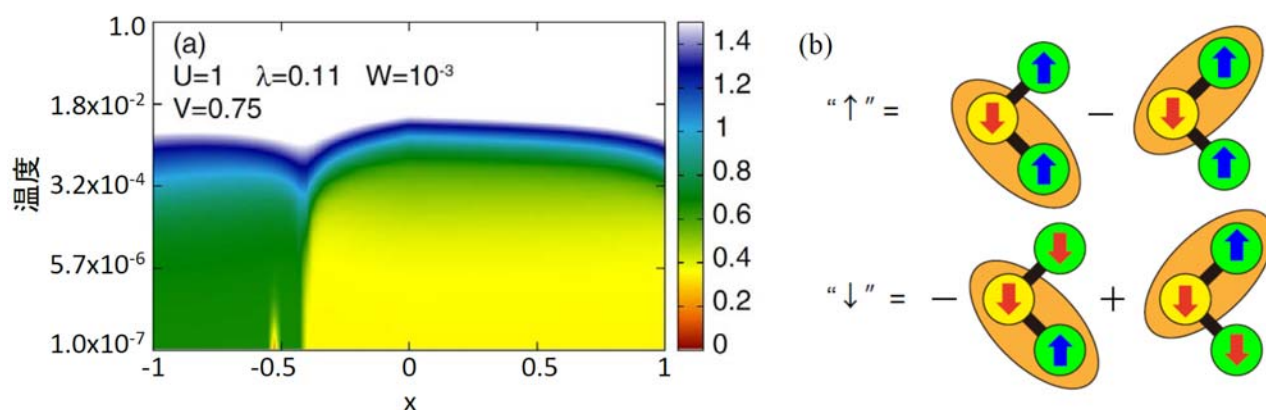


図 1(a) : f 電子のエントロピー。横軸の x は電子状態を変化させるあるパラメーター、縦軸は温度。黄色の領域が、 $\log\sqrt{2}$ を表している。(b) : Nd^{3+} の局所 f 電子状態の模式図。丸は電子の軌道を表し、同じ色は同じ対称性であることを示す。矢印はスピン (磁気モーメント) の向きを表す。

原論文

[Two-Channel Kondo Effect Emerging from Nd Ions](#)

Takashi Hotta : J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 083704 (2017).

問合せ先：堀田貴嗣（首都大学東京大学院理工学研究科物理学専攻）