

近藤雲をつかんだ！ スピン遮蔽の空間的な広がり観測

山本 倫久 (理化学研究所創発物性科学研究センター michihisa.yamamoto@riken.jp)

近藤効果は、磁性不純物を含む金属の電気抵抗が低温で増大する現象として知られている。1930年代に発見されたこの現象について、磁性不純物の局在した磁気モーメントと周囲の伝導電子との間の相互作用がその起源であることを1960年代に近藤淳が指摘し、それを契機として理論研究が急速に進んだ。近藤効果に関する基本的な理論は1970年代にほぼ完成し、局在磁気モーメントと伝導電子との相互作用による効果が、より広義で近藤効果とよばれるようになった。この現象や理論の枠組みは、物理学の広い分野に大きな影響を与えており、近藤効果は、今日では超伝導と並んで典型的な電子相関効果として認識されている。また、1990年代末には、局在スピンを人工原子に閉じ込め、周囲の伝導電子との結合によって起こる近藤効果を単一の磁性不純物の単位で電氣的に制御する手法が開発され、その基本的な性質が調べられた。

近藤効果の基底状態は、局在磁気モーメントと伝導電子との間の多体のスピン重項状態である。従って、局在磁気モーメントは多数の伝導電子によって遮蔽される。この反強磁性的な結合のエネルギーを温度に換算したものが近藤温度 T_K であり、これは磁性不純物を含む金属の抵抗の温度依存性が反転する温度と大まかに一致する。近藤温度以下の低温では、局在磁気モーメントを遮蔽する伝導電子が磁性不純物の周りに雲のように広がり、フェルミ面近傍のひとつの量子物体を形成する。このことから、近藤状態は「近藤雲」ともよばれる。この近藤雲による電子散乱によって電気抵抗が増大する。では、近藤雲は、空間的にどのように広がっているのだろうか？

近藤雲の広がり、有限サイズの電子系や複数の磁性不純物が存在する物質の状態を決定する重要なパラメータである。理論的には、近藤温度（結合エネルギー）に対

応する時間スケールにフェルミ速度をかけた単純な値が、近藤雲の典型的な大きさとして知られている。近藤淳によるブレークスルー以降、多くの物理学者が、近藤雲の大きさを実験的に検出して制御することを目標とした研究に取り組んできた。しかし、近藤雲の広がりが正確に検出されたことはなかった。

我々は、人工原子中の局在スピンを遮蔽する近藤雲を大きさ可変の電子波干渉計に埋め込んだ独自の実験系を用いて、近藤雲の広がりを初めて検証した。近藤雲が干渉計全体を覆う程度まで広がっている場合、電子干渉によって近藤温度が変調される。一方、近藤雲が小さく、干渉計の内部にほぼ局在している場合、近藤温度は電子干渉による変調を受けにくい。電子干渉による近藤温度の変調を定量的に評価することにより、近藤雲の大きさ ξ_K と局在スピから干渉計の端までの距離 L の相対的な関係を得ることができる。実験では、半導体の人工原子を用いて形成される近藤雲の広がりが数マイクロメートルに及ぶことが明らかになった。この値は、典型的な半導体量子デバイスのサイズを大きく上回る。

近藤効果の著しい性質のひとつは、物理系の詳細に依らず、物理量が近藤温度という単一のエネルギーにスケールされることである。例えば、人工原子に局在スピンを閉じ込めて行う電気伝導実験では、温度 T における電気伝導度が T/T_K だけで決定される。同様に我々の実験では、近藤温度の変調強度が、物理系の詳細に依らず、 L/ξ_K で決定される。この長さに関するスケリングの存在は、近藤雲が普遍的な形状を有することを意味している。 L/ξ_K の関数として実験的に測定された近藤温度の変調強度は、実空間での近藤雲の普遍的な形状そのものを表している。

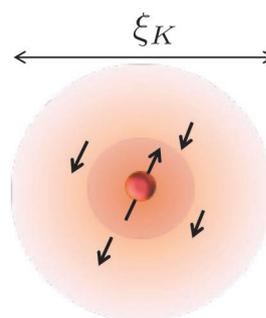
用語解説

近藤効果：

局在磁気モーメントが、周囲の伝導電子によって遮蔽される現象。局在磁気モーメントと伝導電子との間に多体のスピン重項が形成される量子力学的な現象である。

近藤雲：

近藤効果において、局在磁気モーメントと反強磁性的に結合し、これを遮蔽する伝導電子の雲。量子コヒーレンスの広がりに対応した大きさをもつ。



近藤雲の概念図。局在磁気モーメントを周囲の伝導電子が遮蔽する。この伝導電子の雲は、大きさ ξ_K で広がっている。