

大きいフェルミ面と量子臨界点の協奏が生み出す奇妙な超伝導

川崎 慎司 <岡山大学学術研究院自然科学学域 kawasaki@science.okayama-u.ac.jp>

鄭 国慶 <岡山大学学術研究院自然科学学域 zheng@science.okayama-u.ac.jp>

物性物理において電子間のクーロン斥力が顕著な役割を果たす強相関電子系は主要な研究対象の一つである。強相関電子系の中でも、特にCe（セリウム）など f 電子を含む希土類金属化合物に「重い電子系」と呼ばれる物質群がある。その研究の歴史は半世紀を超え、日本人研究者も大きく貢献してきた。

f 電子は「局在」と「遍歴」の二面性をもつ。磁気秩序で「局在」させるのはRuderman-Kittel-槽谷-芳田(RKKY)相互作用である。一方、伝導電子とスピン-重項(近藤-重項)を形成し「遍歴」させるのは近藤効果である。ただし、遍歴電子は強いクーロン斥力のため動きが遅い「重い電子」となる。 f 電子が「重くなる」際「局在-遍歴クロスオーバー」が起き、 f 電子が伝導に寄与するようになるためフェルミ面で囲まれた体積は“大きくなる”。

2000年代に「局在-遍歴クロスオーバー」がどのような状況下で起きるか」は重い電子系の中心課題となった。2001年、絶対零度の磁性-非磁性転移(量子臨界点)が近藤-重項の消滅-形成と一致する「Kondo breakdownモデル」が欧米の研究者らによって提案され流行した。歴史的に量子相転移は大きなフェルミ面の下で起こると考えられてきたためモデルの信憑性を巡って一大論争となり、重い電子系における20年来の問題となっている。

重い電子系の醍醐味は基底状態を「圧力」で制御できることである。 f 電子の磁性は加圧によって抑制され量子臨界点を迎える。特筆すべきことに量子臨界点で重い電子による非従来型超伝導が現れることが経験的に知られている。しかし重い電子系の基底状態と f 電子の「局在」と「遍歴」の関係は明確ではない。なぜなら近藤-重項

の消滅-形成、すなわち局在-遍歴クロスオーバーは物理量の変化が小さく直接観測が難しいからである。言い換えると、半世紀の歴史で未だ重い電子誕生の秘密が明かされないままである。そのため超伝導発現機構も不明である。

我々はこの問題を解決するため**重い電子系反強磁性超伝導体** $\text{CeRh}_{0.5}\text{Ir}_{0.5}\text{In}_5$ (反強磁性転移温度 $T_N=3.0$ K, 超伝導転移温度 $T_c=0.9$ K) に着目し、 ^{115}In 核の**核四重極共鳴(NQR)** 実験を行った。

まず T_N と T_c の圧力依存性から、反強磁性量子臨界点 ($P_c^{\text{AF}}=1.2$ GPa) で最高 $T_c=1.4$ K が実現し、量子臨界点が超伝導に有利に働くことがわかった。

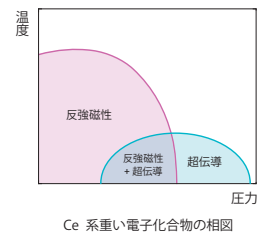
次に我々は遍歴 f 電子がIn核位置に作る電場勾配を通して局在-遍歴クロスオーバーを探知することを試みた。 ^{115}In -NQR周波数 ν_Q の温度、圧力依存性を徹底的に調べた結果、特定の圧力、温度で ν_Q の“跳び”を観測し、局在-遍歴クロスオーバーを捉えることに成功した。結果、圧力相図に反強磁性と超伝導に加え「局在-遍歴クロスオーバー線」を示すことができた。今回得られた結果では絶対零度における局在-遍歴クロスオーバー点は $P^*=0.8$ GPa で P_c^{AF} と一致せず、局在-遍歴クロスオーバーは量子臨界点の手前、反強磁性相内で起きることが明らかとなった。

最後に T_c が高いにもかかわらず異常に大きな残留状態密度をもつギャップレス超伝導が実現していることを見出した。この超伝導は CeRhIn_5 や CeIrIn_5 の d 波スピン-重項超伝導では説明できない特異なもので、大きいフェルミ面と量子臨界点がほどよくバランスし、ユニークな奇周波数 p 波スピン-重項超伝導状態を発現させたと考えられる。

用語解説

Ce系重い電子超伝導体:

Ceは内殻に局在した f 電子をもち、フェルミ準位とのエネルギー差により様々な基底状態を取る。 $4f$ 準位がフェルミ準位近傍にある時は伝導電子と混成し重い電子となって遍歴する。混成は圧力で制御することができ、絶対零度において磁気秩序が消失する「量子臨界点」では、磁性-非磁性両相にまたがって非従来型超伝導が現れる。図のように、Ce系重い電子化合物の圧力相図は多くの強相関電子系の電子相図と共通点をもつが、超伝導発現機構は未解明である。



Ce系重い電子化合物の相図

核四重極共鳴(NQR):

原子核は、核スピン $I \geq 1$ の時、磁気モーメントに加え、電気四重極モーメント Q をもつ。 Q と周辺の電荷が作る電場勾配との相互作用(電気四重極相互作用)は核スピンのエネルギー準位を分裂させ、外部磁場無しでも振動磁場(\sim MHz)による共鳴吸収を起こす。核磁気共鳴(NMR)同様、注目原子核の周囲の電子が作る磁場や電場の静的/動的情報を「ゼロ磁場」で得ることができるので、特にゼロ磁場下の電子相図や超伝導状態の研究に有効である。