

## 量子相転移近傍のまだらな電子状態

神戸 振作 〈日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター〉

酒井 宏典 〈日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター〉

徳永 陽 〈日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター〉

絶対零度で起きる相転移は、量子揺らぎに支配されるため量子相転移と呼ばれる。近年、凝縮系物理学分野では、量子相転移近傍において現れる新規な電子物性（例：非フェルミ液体、異方的超伝導）の研究が精力的に行われている。Ce, U系に代表される $f$ 電子化合物の重い電子系は、量子相転移研究の格好な対象物質である。磁性を相殺させる近藤効果と磁気秩序を安定化させるRKKY (Ruderman-Kittel-槽谷-芳田) 相互作用が拮抗するため、磁気秩序転移温度が低温になりやすいためである。本稿では、その重い電子系物質  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  で見つかった新しい電子状態を紹介する。良い金属である重い電子系の磁気秩序状態は、遍歴的 $f$ 電子が秩序磁気モーメントを構成するスピン密度波 (Spin Density Wave: SDW) に代表される。従って、通常、重い電子系ではSDW転移の量子相転移が起きる。しかし、 $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  においては、SDW型量子相転移ではなく、磁気相転移と同時に電子が局在化し局在磁気モーメントが現れる新しいタイプの“局所量子相転移”ではないかという理論提案がなされ、その真偽を巡って活発な議論がなされてきた。そこで、本研究では核磁気共鳴 (NMR) 法のスピン-格子緩和時間測定により、磁気揺らぎの磁場・温度依存を決定した。その結果、SDW量子相転移いわんや局所相転移描像とも異なり、量子相転移近傍の $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ 電子状態は、フェルミ液体励起と非フェルミ液体励起を示す電子状態が共存する“まだらな電子状態”になっていることがわかった。フェルミ液体状態の電子は遍歴的、非フェルミ液体状態の電子は局在的であるが、そ

れらは同じ励起エネルギースケールを持ち、縮退しているように見えている。興味深いのは、量子相転移に近づくフェルミ液体状態に対する非フェルミ液体状態の占有比率が増大していくことである。一方、これまでのCe, U系の量子相転移では、フェルミ液体状態が非フェルミ液体状態に均一電子状態のままクロスオーバーしていく。

$\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ の場合、量子相転移近傍で非フェルミ液体的になるという点では同様であるが、不均一なまだら電子状態をとって非フェルミ液体状態が支配的になっていく。2つの場合は、一見異なって見える。しかし、従来の場合は2つの状態が非常に速く共鳴している動的極限のため均一に見えており、今回の場合は2つの状態が安定化している静的極限のため独立して観測できたと考えれば、同一の量子相転移現象の2つの極限の場合を見ていることになり興味深い。

2つの場合は何が異なっているのだろうか？ 一般に重い電子系の遍歴状態と局在状態では、磁性原子 (Yb, Ce, U) の価数が異なっていると考えられる。従って今回の結果から、 $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ では異なった価数を持つ局在状態の $\text{Yb}^{3+}$ と遍歴状態の $\text{Yb}^{(3-\delta)+}$ の共存状態が量子相転移近傍で安定化している可能性がある。実際、Yb化合物ではYb価数転移や価数分離の例が報告されている。近藤格子系は遍歴的な価数揺動系と局在的な局在磁気モーメント系に大別され、重い電子系においては量子相転移はその中間領域に現れる。本研究は、量子臨界点近傍では価数 (電荷) と磁気不安定性の両面が現れてくる可能性を示唆している。

## —Keywords—

 $f$ 電子化合物:

ランタノイド (Ce~Yb) 元素の $4f$ 電子はキセノン閉殻を作る $5s$ や $5p$ 電子よりも内側に存在する。このためこれらの元素を含む化合物の磁性は、孤立したイオンの持つ局在磁気モーメントの振る舞いとしての理解が良い出発点を与える。この局在磁気モーメントを伝導電子中におくとき、両者の混成 ( $cf$ 混成) により交換相互作用が生じる。この結果、磁気モーメントを遮蔽する近藤効果とモーメントを安定化させるRKKY相互作用を介した磁気秩序状態、という全く反対の基底状態が実現する。

$f$ 電子化合物系は、ランタノイドやアクチノイド元素の選択や結晶構造により多様な $cf$ 混成とそれに伴う電子状態を議論することを可能とする系として研究されている。