

点接合分光法を用いた強相関希土類化合物のフェルミ面電子状態に関する微視的研究

志賀, 雅亘

<https://doi.org/10.15017/4060158>

出版情報 : Kyushu University, 2019, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 志賀 雅亘

論 文 名 : 点接合分光法を用いた強相関希土類化合物のフェルミ面電子状態に関する微視的研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

強相関電子物質は、電子間に働くクーロン相互作用に由来して多彩な性質を示す。 s , p 軌道の電子に対して波動関数の局在性が強い f 軌道の電子は、クーロン相互作用による電子相関の影響が顕著に現われる。したがって f 電子が主に物性を担う希土類化合物では、その電子相関を起源として重い電子、異常金属、異方的超伝導など様々な量子状態が出現する。これら強相関希土類化合物の電子物性研究は、新奇量子多体现象の解明だけでなく、強力な永久磁石開発など工学的応用にもつながるため、実験・理論ともに活発に実施されている。強相関物質の電子物性は電荷・スピン・軌道に由来する自由度が、わずかなエネルギー範囲内で拮抗することによって決定されるという特色がある。その物性を実験的に解明する方法として、フェルミ面近傍の電子のエネルギー状態を高精度に直接観測する方法が、近年脚光を浴びている。

以上の背景より本論文は、強相関希土類化合物 EuNi_2P_2 、 YbInCu_4 、 YbPd の価数状態に注目し、それら化合物と金属探針からなるナノメートルスケールの点接合を作製し、その間の微分伝導度を測定することによって、それら化合物におけるフェルミ面近傍の電子状態密度のエネルギー依存性を直接観測することによって電子物性を解明したものであり、以下の6章から構成されている。

第1章では、まず、 f 電子波動関数の局在性について述べた上で近藤効果について説明し、近藤効果を理論的に取り扱う際の基礎となるアンダーソンモデルについて概説した。続いて、近藤効果を直接観測した例としてトンネル分光実験について紹介した。次に、 Ce 、 Yb 、 U 等の f 電子軌道を持つ元素の化合物で観測される重い電子状態について紹介した。まず、局在電子が周期的に配列した周期アンダーソンモデルについて概説し、局在電子が伝導電子と混成することによって近藤格子を形成することを述べた。さらに、このモデルをもとに重い電子や価数揺動状態の発現について説明し、その際のバンド構造の特色について述べた。最後に、分光実験を用いて重い電子状態を観測した際に得られるスペクトルの特色について述べた。

第2章では、まず本研究の実験手法である点接合分光法の測定原理について説明し、微分伝導度 (dI/dV) 信号より試料の電子状態密度を測定できることを示した。次に点接合のサイズや接合部での乱れにより、 dI/dV 信号が電子状態密度を反映しない場合があることを示し、その際の信号の判別法について述べた。続いて、本研究で使用した f 電子波動関数の直接観測に有利な **needle-anvil** 型点接合の作製方法について説明し、本方法の利点や接合サイズの制御法を述べた。最後に本研究で使用した低温装置の構造を概説した。

第3章では、 Eu イオンが非整数の価数値を持ち、先行研究において低温で重い電子状態の形成が指摘されている EuNi_2P_2 の点接合分光実験で得られた結果をまとめた。まず、 W 探針を用いて測定された EuNi_2P_2 の dI/dV 信号のバイアス電圧依存性を示し、ゼロ電圧近傍に非対称なダブルピーク構

造が現れることを示した。次に、Pt 探針による測定、測定時の発熱効果、接合サイズ依存性、などの検討を行い dI/dV 信号が EuNi_2P_2 の電子状態を反映して現れることを示した。さらに、 dI/dV 信号のダブルピーク構造が温度上昇とともに抑制されることを明らかにし、これが探針から近藤格子への電子トンネル過程に関する理論モデルを用いて良く再現できること示し、ダブルピーク構造の起源が伝導電子と f 電子の混成($c-f$ 混成)に起因して出現した混成ギャップであると結論付けた。以上より、本物質が Eu 化合物にもかかわらず $c-f$ 混成によって重い電子状態を形成することを、はじめに明らかにした。

第 4 章では、Yb イオンが非整数の価数値を持ち、低温で典型的な重い電子物質である YbInCu_4 の点接合分光実験で得られた結果をまとめた。まず、W 探針を用いて測定した YbInCu_4 の dI/dV 信号に非対称なダブルピーク構造が現れることを明らかにし、これが電子状態を反映した信号であることを示した。さらに、 dI/dV 信号の温度依存性から、このダブルピーク構造は価数転移温度以下の重い電子状態を形成している相でのみ現れることを明らかにした。以上より、 dI/dV 信号のダブルピーク構造は $c-f$ 混成に起因した混成ギャップを反映しており、重い電子状態を形成する物質で見られる一般的信号であると結論付けた。

第 5 章では、Yb イオンが異なる価数 $\text{Yb}^{2.6+}$ および Yb^{3+} を持ってそれぞれが 2 次元的に配列し、これが交互に積層した価数秩序構造を取る YbPd の点接合分光実験で得られた結果をまとめた。まず、W 探針および Pt 探針を用いて測定した dI/dV 信号は、ともに非対称なバックグラウンドにゼロバイアス近傍のディップ構造が重なった形状を持つことを示した。さらに、この形状は測定による発熱や点接合部の乱れによって生じたものではなく、電子状態に起因するものであることを示した。続いて、この信号形状が単原子近藤効果の解析で用いられるファノ関数の重ね合わせで再現できることを明らかにし、その温度変化測定と合わせることで $\text{Yb}^{2.6+}$ と Yb^{3+} サイトにおいて独立に近藤共鳴状態が形成されることを示した。以上より、本物質中の Yb イオンは局所的には近藤効果が出現するが、価数秩序により三次元的にコヒーレントな状態が成長できないため、コヒーレントな重い電子状態は形成されていないと結論付けた。

最後に、第6章において以上の結果を総括し、今後の展望と課題について述べた。