

審査の結果の要旨

論文提出者氏名

馬場 輝久

ホウ素炭化物 $\text{RNi}_2\text{B}_2\text{C}$ は希土類 R を変えることで磁性と超伝導が複雑に織り成し、超伝導秩序、磁気秩序、そしてそれらの秩序が共存するといった様々な状態をとることが知られている。非磁性ホウ素炭化物超伝導体($\text{R} = \text{Y}, \text{Lu}$)においては、フォノンを媒介として Cooper 対を組むにもかかわらず、超伝導ギャップにノードを持つような非常に大きな異方性があることが様々な実験から示唆されている。また磁性ホウ素炭化物超伝導体においては、超伝導と反強磁性が共存し、様々な相図が存在している。

本論文の目的は、超高分解能光電子分光法を用いて、これらのホウ素炭化物超伝導体のうち、①非磁性ホウ素炭化物超伝導体 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ における超伝導ギャップ異方性、②磁性ホウ素炭化物超伝導体 $\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$ における磁性と超伝導の相関について研究を行うことである。

第1章は実験手法について述べている。使用した2つの光電子分光装置についての概観を述べた後に、論文提出者が主として行ったイオンボンバード・アニーリング・表面の評価が行える装置について述べた。これまでの B や C を含む金属間化合物における表面研究では清浄表面を得るために千数百度 $^{\circ}\text{C}$ 以上まで上げている例が多い。そのためエレクトロンボンバード法による加熱機構を設計し、加熱温度 1800°C を達成した。完成した単結晶清浄試料表面作製装置を用いて、清浄表面作製法の確立していない $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ (001)単結晶の清浄表面作製を行った。その結果、Ar イオンボンバード数時間と約 1200°C のフラッシュアニーリングを繰り返し行うことで、Auger 電子分光(AES)により表面吸着元素の除去、及び低速電子線回折(LEED)によりバルク回折パターンを確認した。これにより $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ (001)単結晶の清浄表面作製法を世界で初めて確立することに成功した。

第2章は超伝導の基礎理論について、第3章は超伝導ギャップ異方性について、第4章は非磁性ホウ素炭化物超伝導体について、概観を述べている。

第5章は $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ の角度分解光電子分光について述べられている。 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ (001)単結晶の清浄表面を用いて ARPES 実験を行った。励起光源には $\text{HeI } \alpha(21.218\text{eV})$ を用い、まず Γ -X 方向に沿って価電子帯の測定を行った。その結果、バンド分散、及びフェルミ面形状の観測に世界で初めて成功した。これらの結果とバンド計算とを比較すると良い一致を示しており、バルク電子状態を反映したスペクトルが得られていることを確認した。次に、超伝導ギャップ異方性の起源を調べるため、 $\text{HeI } \alpha$ の励起光を用いて測定できる Brillouin 域における Fermi 面上の全ての点において低温・超高分解能 ARPES 測定を行った。超伝導状態(6K)における光電子スペクトルを見てみると、全ての測定点において超伝導ギャップが開き、それにともない準粒子ピークが立っているのが観測された。このように波数に分解して $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ の超伝導ギャップを観測したのも世界で初めてである。測定した点全てのスペクトルで超伝導ギャップが開いているということはラインノードがないことを意味している。従ってこの実験により超伝導ギャップ構造がラインノードでないことを直接的に確認することができた。さらに

超伝導ギャップの波数依存性を調べるため、観測した超伝導スペクトルをBCS関数を用いてフィッティングを行った。その結果、一番小さいところで1.5meV、一番大きいところで3.2meVと、2倍強の比を持つ大きな異方性があることを確認した。また超伝導ギャップの大きさは、Fermiシートごとに異なるというより、面内での異方性が顕著であり、2ギャップのモデルと一致しないことが確認された。さらに詳しく見てみると、バンド計算や非弾性中性子散乱で指摘されているネスティングベクトルに極めて近いところで超伝導ギャップが最小値をとることがわかった。従って、Fermi面のネスティングと超伝導ギャップの最小値が何らかの関連があることがわかった。またこの結果は、強電子-フォノン結合と反強磁性揺らぎが共存し、反強磁性揺らぎはネスティングベクトルで結ばれる部分で起こる場合、ネスティングベクトルで結ばれる部分で超伝導ギャップが最小値を取ると指摘する理論と良い一致を示した。これらから $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ における超伝導ギャップ異方性は反強磁性揺らぎに由来するものである可能性を指摘した。

第6章は磁性と超伝導について、第7章 磁性ホウ素炭化物超伝導体 について、概観を述べている。

第8章は $\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$ のレーザー光電子分光について述べている。磁性超伝導体の電子状態を調べるために磁性ホウ素炭化物超伝導体の中で一番高い共存温度を有する $\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$ ($T_c=9.3\text{K}$, $T_N=6.0\text{K}$)のレーザー光電子分光実験を行った。観測したスペクトルは E_F 上に有限の状態密度を持ち準粒子ピークもほとんど立っていない。これは非磁性ホウ素炭化物超伝導体の振る舞いと明らかに異なり、超伝導ギャップの異方性や不純物散乱だけでは説明できない。Abrikosov-Gorkov理論によると、磁性不純物を含む超伝導体は磁気モーメントの散乱によりCooper対が有限の寿命を持ちスペクトルはブロードになるとされるが、実験結果はそれを良く反映していると考えられる。超伝導ギャップの温度依存性において、Neel点直下でBCS理論からの大きな逸脱を観測し、世界で初めて磁性超伝導体のバルク電子状態密度の温度変化の詳細を明らかにすることに成功した。理論的には、反強磁性転移温度でスピン密度波ギャップを生成する反強磁性分子場の急速な発達により超伝導が弱められ超伝導ギャップの値が一度小さくなり、更に温度が下がるにつれ磁化が飽和・超伝導凝集エネルギーが増加するため、超伝導ギャップの値が回復することにより、その温度依存にくぼみができることが予想されていた。実験結果と理論との比較を行ったところ、他の実験結果から得られているパラメータと矛盾しない値で実験結果を再現することができた。これにより反強磁性超伝導体における超伝導ギャップの温度変化における理論的検証を25年の時を経て実験的に証明することに成功した。

以上、 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ と $\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$ について、高分解能光電子分光を行い、超伝導の異方性と磁性の関係についてについて議論し、これにより、ホウ素炭化物 $R\text{Ni}_2\text{B}_2\text{C}$ ($R = \text{rare earth}$)の豊富な物性について理解を得ることができた。この研究は物理工学に大きく寄与するものであり、よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。