

論文審査の結果の要旨

氏名 柴田明徳

本論文は7章からなり、第1章は論文全体の章構成の説明、第2章はこの研究の背景、第3章は研究に用いた実験装置とマイクロ波測定方法、第4章は銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}$ (Bi:2201)に関する実験結果とその解釈、第5章は2ギャップ超伝導体 MgB_2 に関する実験結果とその解釈、第6章に論文全体のまとめ、最後に第7章に謝辞が述べられている。

通常の超伝導体ではフェルミ面近傍の二つの電子間に電子-格子相互作用を媒介とした引力が働き、それらが低温で対凝縮を起こすことで超伝導状態が発生する。このとき準粒子励起のエネルギーギャップは運動量空間で等方的に開く。これは電子対(クーパー対)の対称性がS波スピン1重項状態だからである。ところが、銅酸化物高温超伝導体(d波スピン1重項)、重い電子系、有機超伝導体などS波とは異なるクーパー対の対称性をもつ異方的超伝導体が最近相次いで発見された。そのギャップはフェルミ面の特定の方向で閉じた(ノードをもつ)構造をもつ。しかし、これら異方的超伝導体のクーパー対の対称性の確実な同定や引力機構のマイクロ説明は、まだ十分になされていないのが現状である。

本研究は、異方的超伝導体の磁場中の量子渦糸の動的性質を調べることで渦糸周りの準粒子束縛状態、すなわちギャップ構造に関する実験的知見を得ることを目的に行われた。具体的には、過剰ホール注入(オーバードープ)領域のBi:2201試料にマイクロ波を照射して表面インピーダンスを測定することで磁束フロー抵抗を求め、その磁場依存性を典型的なS波超伝導体や2ギャップ超伝導体 MgB_2 に対する実験結果と比較した。

本研究以前に行われた銅酸化物高温超伝導体の磁束フロー抵抗測定は、不足ホール注入(アンダードープ)領域や最適ホール注入(オプティマムドープ)領域に対するものであった。しかし、モット・ハバード転移に近いアンダードープ領域では反強磁性相関が大きく常伝導相も異常な金属状態であることが知られており、実験結果がd波対称性に特徴的なものであるかどうかは自明でない。そこで、常伝導相がフェルミ流体論でよく記述されることが分かっている、すなわち“典型的な”d波スピン1重項超伝導体と見なせるオーバードープ領域の試料について測定したのが、本研究の大きな特徴の一つである。この試料の場合、オプ

ティマムドープ領域に比べて上部臨界磁場 ($H_{c2} \approx 20$ T) がかなり低いので、相対的に広い磁場範囲にわたって磁束フロー抵抗の磁場変化を調べることができるという利点もある。実験はマイクロ波空洞共鳴摂動法を使って高い周波数 (60 MHz) まで表面インピーダンスの周波数依存性を測定したので、磁束のピン止め効果 (磁束クリープ) をほとんど除去できている。

アンダードープ Bi:2201 試料について得られた磁束フロー抵抗は、低磁場領域 ($H/H_{c2} \leq 0.1$) では磁場に比例して増加し、その比例係数は典型的な S 波超伝導体より約 2 倍大きいことが分かった。これは Kopnin-Volovik による d 波超伝導状態に対する渦芯近傍の Andreev 束縛状態の準粒子スペクトルに基づく理論計算で説明できる。エネルギー散逸に寄与する準粒子数の低下がフロー抵抗の上昇を与えるという考えである。また、異方的 S 波超伝導体 YNi_2B_2C の実験結果とも符合しており、磁束フロー抵抗が超伝導ギャップの大きさの異方性に敏感な測定法であることを示している。一方、高磁場領域 ($0.3 \leq H/H_{c2} \leq 0.8$) では磁束フロー抵抗の変化分が磁場の平方根に比例することが分かった。この振る舞いは上記の理論では説明できないが、キャリアの散乱確率が増加するという考え方をすると、磁場依存性のクロスオーバーも含めて説明可能である。他方、 MgB_2 のデータは磁場を ab 面に平行に印可したとき、2 ギャップ構造を反映してフロー抵抗の磁場依存性に $H/H_{c2} = 0.1$ 付近で明瞭な変化を観測することができた。

以上のように、本研究は異方的超伝導体、特に d 波スピン 1 重項超伝導体の磁束フロー抵抗に関して新しい実験的知見をもたらしたものとして、十分評価できる。

なお、本論文の第 4 章の研究は松田祐司、井澤公一、生田博志、長谷川正、加藤雄介の各氏との、また第 5 章の研究は松田祐司、井澤公一、松本麻里、Sergey Lee、田島節子の各氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の遂行、解析及び解釈を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士 (理学) の学位を授与できると認める。