

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 大橋健良

本論文は6章からなり、第1章では研究の背景と目的が述べられ、第2章では実験方法について記述されている。第3章では、参照試料として測定された従来超伝導体の結果が示され、第4章、第5章では、それぞれホールドーブ系高温超伝導体、電子ドーブ系高温超伝導体に対する結果が示され考察されている。最後に、第6章で研究全体の総括が行われ、結論が述べられているという構成である。

第1章では本研究の対象である銅酸化物高温超伝導体の物性が概説され、擬ギャップの起源が超伝導ゆらぎかどうか、超伝導相の内部に“隠された量子臨界点”が存在するかどうか、ホールドーブ系と電子ドーブ系が対称的かどうか、といった電子相図にかかわる問題が未だ解決しておらず、理論モデルによって異なる見解を持つことが指摘されている。そして、超伝導ゆらぎの測定を行うことでこれらの問題を明らかにし、理論モデルを吟味できる可能性が示されており、これが研究の目的として提示されている。これに加え、高温超伝導体の超伝導ゆらぎの測定を行うことで、これまで明らかでなかった磁場中の超伝導ゆらぎと磁束量子のダイナミクスとの移り変わりを捕らえられる可能性も示され、これも研究目的として提示されている。

また、超伝導ゆらぎに関する基礎的な概念が説明されるとともに、解析に用いられたゆらぎ伝導度の動的スケーリング則と磁束量子の交流応答の平均場モデルについて簡潔にまとめられている。

第2章の実験方法に関する記述では、マイクロ波領域での伝導度スペクトロスコピーであるマイクロ波ブロードバンド法の測定原理、測定装置について述べられており、実際の測定における留意点や問題点が具体例を示して説明されている。また、ブロードバンド法では測定誤差が大きな問題となることを指摘し、誤差の影響の定量的な評価がなされるとともに、誤差較正法の改良について記述されている。

第3章では、従来超伝導体 NbN 薄膜に対する測定、解析結果が示されている。従来超伝導体の超伝導ゆらぎは非常によく研究がなされており、ゆらぎ伝導度の振る舞いもよく確立していることを背景に、NbN 薄膜を用いた測定法・解析法についての検証が試みられている。そして、得られた結果が従来超伝導体に予想されるガウスゆらぎと一致したことから、ブロードバンド法によって伝導度の周波数依存性を測定し動的スケーリング解析を行うという手法が、超伝導ゆらぎの実験的測定に有効であることが確認されている。また、

試料が不均一な場合や次元がクロスオーバーする場合には動的スケージングが破綻することが実際に示されており、この解析法の適用範囲が明らかにされている。

第4章では、ホールドーブ系高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 薄膜に対する測定、解析結果が示されている。まず、不足ドーブ組成で超伝導ゆらぎが観測されたの温度領域が擬ギャップの観測される領域より極めて狭いことから、擬ギャップの起源が超伝導ゆらぎではないと結論づけている。また、幅広いキャリア濃度の試料に対する測定から、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の超伝導ゆらぎが、最適ドーブ組成近傍のみで3次元的、それ以外の組成領域では2次元的となることが示されている。膜厚依存性や磁場効果についても調べられており、観測された次元の変化が本質的なものであることが確認されている。そして、キャリア濃度によって超伝導ゆらぎの次元が変化する振る舞いが様々な理論モデルの立場から考察され、超伝導相のなかに“隠された量子臨界点”を仮定する理論モデルでのみよく説明できると結論されている。

第5章では、電子ドーブ系高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 薄膜に対する測定結果が示されている。やはり幅広いキャリア濃度の試料に対する測定が行われており、 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の超伝導ゆらぎが全組成領域で3次元的となることが示されている。このことから、超伝導ゆらぎという観点ではホールドーブ系と電子ドーブ系が非対照的であることが明らかにされ、やはり“隠された量子臨界点”を仮定する理論モデルが適当であると結論されている。さらに、電子ドーブ系では隠された量子臨界点が存在しないこと、超伝導の対形成の機構がホールドーブ系では2次元的であるのに対し電子ドーブ系では3次元的となり互いに異なることが示され、より詳細な議論が展開されている。このような次元性の違いはこれまで知られておらず、高温超伝導の理解に対して大きな情報を提供したと評価できる。

また、広範囲にわたる磁場中での測定結果も示されており、超伝導ゆらぎと磁束量子のダイナミクスとの移り変わりが定量的に議論されており、従来、“磁束液体相”と呼ばれていた領域の大部分で磁束量子の描像は明確ではなく、超伝導ゆらぎの影響が大きいことを明らかにしている。一方、転移転近傍や、より低温の広い範囲では、磁束量子の交流応答の平均場モデルが非常に有効であることを明確に示している。

最後の第6章では本論文の内容がまとめられ、得られた知見が総括されて結論が述べられている。

以上のように、本研究は、高温超伝導体の超伝導ゆらぎをキャリア濃度の関数として測定した初めての試みであり、古典的な描像では予想され得ないゆらぎの次元の変化を明らかにしたことは、高温超伝導の発現機構の理解に貢献するものであると評価できる。また、超伝導ゆらぎと磁束のダイナミクスの移り変わりを捉えた初めての実験的研究であり、今

後の磁束量子の研究に対して礎となる結果であると評価できる。

なお、本論文中の第2、3、4、5章は前田京剛、北野晴久、藤巻朗、赤池宏之、塚田一郎、内藤方夫、東田昭雄、各氏との共同研究であるが、論文の提出者が主体となって遂行したもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。