

学位論文題名

銅酸化物 $\text{Bi}_{2+x}\text{Sr}_{2-x}\text{CuO}_y$ 単結晶における金属-絶縁体転移

学位論文内容の要旨

金属と絶縁体の違いが明らかになったのは量子力学が成立して間もない1930年代である。つまりバンド理論によると電子がバンドを埋めているか否かということに帰すことができる。ところが、バンド理論を適用すると金属になるはずのNiOが実は絶縁体であることが1937年に発見された。これは電子間のクーロン力に起因するものである。このような転移はモット転移と呼ばれる。以来、現在まで電子相関の絡んだ金属-絶縁体転移は未解決の物理学上の重要な問題として認識されている。金属-絶縁体転移においては、系の次元が重要な意味をもつ。1979年にAbrahamsらによって発表されたスケーリング理論は相互作用がない電子系において次のことを明らかにした。3次元系では乱れの程度により局在-非局在転移(金属-絶縁体転移)が生ずる。しかし、2次元系ではどんなに小さな乱れでもそれが存在すると絶対零度ですべての状態が局在する。すなわち、相互作用がない場合の金属-絶縁体転移の下部臨界次元は2次元である。一方、量子ゆらぎが引き起こす相転移である量子ホール液体-絶縁体転移、超伝導-絶縁体転移の二者においては2次元にもかかわらず「金属相」が存在していることが近年明らかになった。さらに下部臨界次元が1次元であることがFisherによって提案されている。このような背景のもとで、1電子近似の効かなくなるような電子相関が強い2次元電子系において金属状態が存在するかということに注目が集まっている。このような系を実現する典型物質としては銅酸化物超伝導体あげられる。そこで本研究においては相関の強い2次元電子系において金属-絶縁体転移が存在するか否かを調べることを目的として、キャリア濃度を制御した銅酸化物 $\text{Bi}_{2+x}\text{Sr}_{2-x}\text{CuO}_y$ 単結晶を用いてコンダクタンスとホール係数の温度依存性を測定した。

本論文の構成は以下の通りである。

1章において、本研究の背景と動機について説明した。

2章において、金属-絶縁体転移について、電子間のクーロン力によるモット転移と結晶中の乱れによるアンダーソン転移を説明した。格子に強く束縛された電子系(たとえば3d電子系など)では電子間のクーロン力によってキャリアが格子点に局在することがある。このような系を記述するもっとも簡単なモデルとして、モット-ハバードモデルを紹介し、クーロン力によって金属-絶縁体転移が生じることを説明した。

一方、結晶中の乱れは、電子の波動関数を空間的に局在させる(アンダーソン局在)。アンダーソン局在による金属-絶縁体転移が存在するときには、非局在状態と局在状態を分けるエネルギーが存在し、易動度端(mobility edge)と呼ぶ。アンダーソン転移は、フェルミ準位が局在状態にある場合(絶縁体)と非局在状態にある場合(金属)の転移である。アンダーソン局在において、系の次元によって金属-絶縁体転移が存在する場合と存在しない場合があることをベータ関数を導入することで説明した。ベータ関数によって、磁場および相互作用のない2次元電子系は絶対零度ですべての状態が局在することが示される。

さらに、近年報告された、2次元電子系における新しい「金属相」について紹介した。量子ホール液

体-絶縁体転移の転移点直上と、超伝導-絶縁体転移の転移点直上において金属相が存在することを示す実験結果を引用し、またその理論的な裏付けとして Fisher によるスケーリング理論を紹介した。

3章では本研究で用いた銅酸化物超伝導体について論じた。銅酸化物超伝導体の結晶構造は伝導を担う2次元的な CuO_2 面が積層し、その間にブロック層とよばれる層が存在する。 CuO_2 面は正規組成では3d電子がCu原子にひとつ存在するために、電子相関を考慮しなければ金属であることが予測されるが、実際には電子相関のために絶縁体である。そこでブロック層により CuO_2 面の電子数を制御し、キャリアをドーピングすることで電気伝導が生ずる。銅酸化物超伝導体を用いることにより、 CuO_2 面自体の組成はそのままに CuO_2 面のキャリアを制御した金属-絶縁体転移の研究を行うことが可能である。しかしながら現在までに行われた研究結果は統一的な描像を与えていない。このことを過去の研究結果を引用して概説した。

4章では実験方法について述べた。本研究で用いた $\text{Bi}_{2+x}\text{Sr}_{2-x}\text{CuO}_y$ の特徴として電気伝導度の異方性が大きいこと、2次元性が高いこと、超伝導遷移温度が低いこと、Bi/Srの置換によってキャリア濃度を制御することができることがあげられる。そのために、本研究の目的に最適な物質であると考えられる。試料としては、フラックス法を用いて育成した単結晶を用いた。銅酸化物は伝導に寄与する CuO_2 面が層状に積層した構造をとっているために測定した電気伝導率から2次元面あたりのコンダクタンスを求めるためには試料寸法を精密に求めなければならない。本研究ではエキシマレーザーを用いて試料形状を加工し、試料形状を決定した。また、微小電圧測定に関する問題点を考察した。

5章において実験結果を説明し、考察を行った。コンダクタンスの温度依存性は試料のキャリア濃度に応じてふるまいが異なった。キャリア濃度が小さい試料では可変領域ホッピング型が観測され、キャリア濃度が大きい試料では温度の対数に比例して低温でコンダクタンスが減少することが観測された。この対数依存性を与えるモデルとしてはアンダーソン局在の弱局在、近藤効果、電子間相互作用が知られている。しかし、コンダクタンスに加えてホール係数の温度依存性、磁気抵抗効果、非線形伝導の測定結果を詳細に検討したところ、その3者のいずれのモデルにおいても測定結果を説明できないことを示した。

さらに、電気抵抗率が極小をとる温度 T_{min} とキャリア密度 n との間に $T_{min} \propto (n_c - n)$ なる関係があることを明らかにした。この実験式を説明するために、「易動度端の存在する2次元電子系」のモデルを導入し、このモデルによって T_{min} と n の関係が説明されることを明らかにした。つまり、下部臨界次元が2次元ではないことを明らかにした。これは、2次元電子系では超伝導-絶縁体転移、量子ホール液体-絶縁体転移に次ぐ第3の量子相転移を示唆するものであり、非常に重要な結果であることを意味する。

6章において、本研究の総括を行った。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 谷 和 彦
副 査 教 授 中 山 恒 義
副 査 教 授 田 中 啓 司
副 査 助 教 授 丹 田 聡

学位論文題名

銅酸化物 $\text{Bi}_{2+x}\text{Sr}_{2-x}\text{CuO}_y$ 単結晶における金属-絶縁体転移

電子相関の強い2次元電子系において金属-絶縁体転移が存在するか否か分かっていない。一般に相転移の存在はその系の空間次元に依存しており重要な意味をもつ。相互作用のない2次元不規則電子系では電子局在のスケーリング理論とその実験によって絶縁体相しか存在しない、つまり金属相が存在しないことが明らかにされている。しかしながら、最近、強磁場中の2次元電子系と超伝導薄膜の2種類の2次元電子系において、金属相が存在することが明らかになった。いずれもそれらの系が強い量子ゆらぎのために単に空間次元だけではなく時空を考慮にいった(2+1)次元電子系になっているため、量子ホール液体-絶縁体転移、超伝導-絶縁体転移の量子相転移臨界点において新しい金属相が存在していると考えられている。このような背景のもと、電子相関の強い2次元電子系においても金属-絶縁体転移が存在するか否か重要な問題となっている。

本論文では、電子相関が強い2次元電子系を実現する典型物質として、キャリア濃度を制御した銅酸化物 $\text{Bi}_{2+x}\text{Sr}_{2-x}\text{CuO}_y$ 単結晶を選び、コンダクタンス、ホール係数、磁気抵抗効果、非線形伝導の測定と解析を行い、電子相関が強い2次元電子系における金属-絶縁体転移の存否を明らかにする実験的研究を行っている。その主要な成果は次の点に要約される。

- (1) コンダクタンスの温度依存性はキャリア濃度が小さい試料では可変領域ホッピング型で、キャリア濃度が大きい試料のコンダクタンスは温度の対数に比例して低温で減少することを見出した。
- (2) コンダクタンスの対数型温度依存性に加えて、ホール係数の温度依存性、磁気抵抗効果、非線形伝導の測定結果はアンダーソン局在の弱局在、近藤効果、電子間相互作用の従来モデルでは、矛盾なく説明することができないことを示した。
- (3) 電気抵抗率が極小を示す温度とキャリア密度には比例関係があることを発見し、その関係は「易動度端の存在する2次元電子系」のモデルを導入することによって説明されることを明らかにした。これは、2次元電子系では量子ホール液体-絶縁体転移、超伝導-絶縁体転移に次ぐ第3の量子相転移を示唆し、2次元にもかかわらず「金属相」の存在を意味する重要な結果が得られた。

これを要するに著者は、電子相関が強い2次元電子系において「金属相」の存在に関して新知見を得たものであり、物性物理学および応用物理学に対してその進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。