

学 位 論 文 題 名

銅酸化物 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ($x = 1/8$) における
ストライプ秩序のスピン置換効果

学位論文内容の要旨

高温超伝導体を始めとして、ウィグナー結晶、重い電子系などの強相関電子系は物性物理学の重要なテーマである。近年、二次元強相関電子系において観測されたストライプ秩序は新規な量子状態であるため、大きな関心が寄せられている。ストライプ秩序は電荷とスピンの相分離してできた縞状の構造をとり、従来に見られない秩序状態である。このストライプ秩序は新規量子状態というだけでなく、高温超伝導の発現機構と関係している点からも、その形成メカニズムが注目されている。

ストライプ秩序状態においては、二次元電子系において電荷が自発的に一次元的な縞状の配列を成し、その一次元的な電荷配列の縞と縞の間では反強磁性磁気秩序が形成されている。このようにストライプ秩序は電荷秩序と磁気秩序の双方から成る新規な状態である。この状態は多くの二次元強相関電子系において観測されているため、ストライプ秩序は二次元強相関電子系における普遍的な現象と見なされている。特に、ストライプ秩序が高温超伝導の発現機構と密接に関係している可能性が実験的にも理論的にも示され、ストライプ秩序の研究は固体物理学における重要なテーマの一つとなっている。これまで、ストライプ秩序の形成に関する研究は電荷量の変化に対する電子構造や超伝導転移温度などの変化を中心に調べられ、ストライプ秩序の形成に最適な電荷量が明らかにされてきた。一方、磁気秩序を変化させた実験的研究はほとんどない。ストライプ秩序は磁気秩序と電荷秩序の両方から形成されているため、磁気秩序の変化に対するストライプ秩序がどのように変化するか見極める研究が重要である。

ストライプ秩序が形成されると、磁気秩序と関連して低温における磁化率の上昇が現れ、又、

電荷秩序に関連して電子比熱係数の減少が観測されることが知られている。本研究ではこの実験事実に着目して、磁気秩序をスピン $S=1/2$ から $S=0$ または $S=1$ へのスピン置換によって変化させた場合、磁化率と電子比熱がどのように変化するかを調べる。その変化からスピン置換によるストライプ秩序変化を明らかにして、ストライプ秩序の形成機構を解明することを目的とする。

第一章ではストライプ秩序の研究背景について述べた。強相関電子系とフェルミ液体との違いを説明し、また、強相関電子系におけるストライプ秩序の位置づけ、ストライプ秩序と高温超伝導との関連性について述べた。

第二章では、最初にストライプ秩序に関する基本事項となる、高温超伝導の基礎的性質、高温超伝導体の結晶構造と電子構造、高温超伝導とストライプ秩序の関連について述べた。次に、実験事実として、ストライプ秩序形成による物理現象の特異な振る舞い（磁化率の温度依存性、電子比熱係数のホール量依存性など）を説明した。更に、理論モデルによって示されたストライプ秩序形成の機構を説明した。これらの説明によって、ストライプ秩序の研究における問題点を浮き彫りにし、その問題解決への独創的な研究指針を述べ、本研究の目的を示した。

第三章では、実験方法について述べた。用いた試料が少量の不純物によっても磁化率に強い影響を与えるため、高純度の試料を得るための作製方法を詳細に記述した。磁化率の特異な温度依存性を調べるために SQUID を用いた磁化率測定を行った。SQUID の原理と測定条件が記述されている。電子比熱係数を求めるための低温比熱測定においては、特に、高精度で比熱の絶対値を求める必要から、熱緩和法について詳細に述べた。

第四章では、磁化率の実験結果、解析と考察、比熱の実験結果、解析及び考察を述べた。それらをもとにスピン系の変化に対するストライプ秩序の微視的な変化について議論した。その結果、スピン系の変化によってストライプ秩序が完全に壊れる場合と、新しい秩序に変化する場合があることを見出し、それらの場合を用いて示すことが出来た。得られた結果からスピン相互作用がストライプ秩序を形成する上で重要な役割を演じていることを実験的に明らかにした。

最後に第五章では、本研究で得られた知見を概観し、本研究の持つ意味と役割を総括した。

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 武 藤 俊 一

学 位 論 文 題 名

銅酸化物 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ($x = 1/8$) における ストライプ秩序のスピンの置換効果

高温超伝導体を始めとして、ウィグナー結晶、重い電子系などの強相関電子系は物性物理学の重要なテーマである。近年、二次元強相関電子系において観測されたストライプ秩序は新規な量子状態であるため、大きな関心が寄せられている。ストライプ秩序は電荷とスピンの相分離してできた縞状の構造をとり、従来に見られない秩序状態である。このストライプ秩序は新規量子状態というだけでなく、高温超伝導の発現機構と関係している点からも、その形成メカニズムが注目されている。

ストライプ秩序状態においては、二次元電子系において電荷が自発的に一次元的な縞状の配列を成し、その一次元的な電荷配列の縞と縞の間では反強磁性磁気秩序が形成されている。このようにストライプ秩序は電荷秩序と磁気秩序の双方から成る新規な状態である。この状態は多くの二次元強相関電子系において観測されているため、ストライプ秩序は二次元強相関電子系における普遍的な現象と見なされている。特に、ストライプ秩序が高温超伝導の発現機構と密接に関係している可能性が実験的にも理論的にも示され、ストライプ秩序の研究は固体物理学における重要なテーマの一つとなっている。従来のストライプ秩序形成の研究は電荷量の変化に対する電子構造や超伝導転移温度などの変化を中心に調べられ、ストライプ秩序形成に最適な電荷量が明らかにされてきた。一方、磁気秩序を変化させた実験的研究は極めて少ない。ストライプ秩序は磁気秩序と電荷秩序の両方から形成されているため、磁気秩序変化がストライプ秩序をどのように変化させるか見極める研究が重要視される。

ストライプ秩序が形成されると、磁気秩序と関連して低温における磁化率の上昇が現れ、又、電荷秩序に関連して電子比熱係数の減少が観測されることが知られている。本研究ではこの実験事実に着目して、磁気秩序をスピン $S=1/2$ から $S=0$ または $S=1$ へのスピン置換によって変化させた場合、磁化率と電子比熱がどのように変化するかを調べる。その変化からスピン置換によるストライプ秩序変

化を明らかにして、ストライプ秩序の形成機構を解明することを目的とする。

第一章ではストライプ秩序の研究背景について述べた。強相関電子系とフェルミ液体との違いを説明し、また、強相関電子系におけるストライプ秩序の位置づけ、ストライプ秩序と高温超伝導との関連性について述べた。

第二章では、最初にストライプ秩序に関する基本事項となる、高温超伝導の基礎的性質、高温超伝導体の結晶構造と電子構造、高温超伝導とストライプ秩序の関連について述べた。次に、実験事実として、ストライプ秩序形成による物理現象の特異な振る舞い（磁化率の温度依存性、電子比熱係数のホール量依存性など）を説明した。更に、理論モデルによって示されたストライプ秩序形成の機構を説明した。これらの説明によって、ストライプ秩序の研究における問題点を浮き彫りにし、その問題解決への独創的な研究指針を述べ、本研究の目的を示した。

第三章では、実験方法について述べた。高純度の試料を得るための作製方法を詳細に記述した。磁化率の特異な温度依存性を調べるために SQUID を用いた磁化率測定を行った。SQUID の原理と測定条件を詳細に記述した。電子比熱係数を求めるための低温比熱測定においては、特に、高精度で比熱の絶対値を求める必要から、熱緩和法について詳細に述べた。

第四章では、磁化率の実験結果、解析と考察、比熱の実験結果、解析及び考察を述べた。帯磁率の測定からスピン置換によって磁気秩序状態が変化することを実験的に明らかにするとともに、その磁気秩序の変化が電荷秩序の変化へと導いていることを電子比熱の測定から明らかにした。その結果、置換スピンの大きさによってストライプ秩序が完全に破壊される場合と、新しい秩序状態が形成される場合を見出した。それら二つの場合について微視的なモデルを提案し、スピン間相互作用がストライプ秩序を形成する上で重要な役割を担っていることを明らかにした。

最後に第五章では、本研究で得られた知見を概観し、本研究の持つ意味と役割を総括した。

これを要するに著者は、ストライプ秩序形成機構におけるスピン間相互作用の重要性を実験的に明らかにし、量子現象に新知見を得たものであり、応用物理学および量子物理工学の進展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。