

学 位 論 文 題 名

Vortex Dynamics in High- T_c Cuprates

(銅酸化物高温超伝導体の渦糸ダイナミクス)

学位論文内容の要旨

従来の超伝導体では渦糸間の斥力相互作用が支配的であり、その最も安定的な状態としてアブリコソフ格子を組むことが知られている。一方、高温超伝導体においてはこの相互作用に加え、極端に短いコヒーレンス長や結晶構造に起因する強い2次元性のために熱揺らぎの効果が顕著となる。その結果、渦糸格子が融解して液体状態になる現象が知られている。さらに渦糸が凍結した固体状態でも試料中のランダムネスの影響が大きく、それにより準格子状態とみなせるような比較的長距離にわたって秩序が存在する相と、グラス状態と呼ばれるほとんど秩序の無い相が存在することが示されている。

また、渦糸の電子構造自体も極めて特徴的であると考えられる。高温超伝導体のクーパー対波動関数の対称性は異方的であり、その異方性は渦糸構造にも影響を与え、渦糸の内部の電子状態も異方的であることが予想される。さらに極端に短いコヒーレンス長のために量子極限の状態にあり、準古典的に扱うことのできる従来の超伝導体の渦糸とは大きく異なることも指摘されている。また、高温超伝導体は反強磁性相に近接しており、渦糸コア内部の電子間にも強い電子間相互作用が働いており、高温超伝導体の渦糸コアは従来の電子状態とは大きく異なっていることが示されている。

このように高温超伝導体の渦糸状態は、従来超伝導体とは違った新しい物性を示す。渦糸状態における渦糸ダイナミクスは、渦糸相図の問題や渦糸内部の電子構造と準粒子散乱機構の問題と密接に関係している。渦糸ホール効果の大きな問題の一つは、ほとんどの高温超伝導体において観測されている転移温度 T_c 直下でのホール効果の符号逆転現象である。このホール効果の符号逆転は、渦糸が輸送電流に逆らって運動していることを意味し、従来の流体や超流動液体ヘリウムでは観測されない現象である。また超伝導体の古典的な渦糸ホール効果の理論でも、渦糸状態におけるホール効果の符号はノーマル状態での符号と一致しており、高温超伝導体の渦糸状態に見られる符号逆転は極めて奇妙な現象である。符号反転の原因として電子状態の内的な要因とピン止め等の外的な要因に起源を求めるなど様々なモデルが考えられてきたが、解決には至っていない。

本研究では、渦糸ホール効果により高温超伝導体の渦糸状態での渦糸のダイナミクスの研究を行った。La_{2-x}Sr_xCuO₄ (La:214) , Bi₂Sr₂CuO_{6+δ} (Bi:2201) , YBa₂Cu₃O_{7-δ} (Y:123) の三つの系について、低 hole 濃度から高 hole 濃度にわたる異なった電子状態の試料に対してホール効果の研究を行った。そのキャリアドーピング依存性について交流電流を用いて6端子法による精密な測定をした。その結果、

低濃度の La:214 ($T_c = 26.0, 33.3, 29.6$ K), Bi:2201 ($T_c = 21.1$ K), Y:123 ($T_c = 90.3$ K) 試料ではホール効果の符号逆転が観測されたのに対して、高濃度の La:214 ($T_c = 9.5, 18.6$ K), Bi:2201 ($T_c = 6.0, 20.0$ K), Y:123 ($T_c = 62.1, 65.0$ K) 試料では観測されなかった。

我々はこの実験結果について、時間に依存した Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式に基づきホール効果の符号逆転を議論した。TDGL の議論によると、渦糸状態でのホール伝導度 σ_{xy} は、渦糸コア内部とその周辺の準粒子から生じる σ_{xy}^n と、渦糸の運動から生じる σ_{xy}^v の二つの寄与の和として $\sigma_{xy} = \sigma_{xy}^n + \sigma_{xy}^v$ と表される。 σ_{xy}^n は磁場 B に比例し、その符号はノーマル状態における符号と一致している。一方 σ_{xy}^v は $1/B$ に比例しており、低磁場においてホール効果の符号を決定するのに支配的な役割をする。従って、 σ_{xy}^v が σ_{xy}^n と異なる符号を持った場合にホール効果の符号逆転が起きることが理解される。この議論では σ_{xy}^v は秩序変数の複素緩和時間 $\gamma = \gamma_1 + i\gamma_2$ の虚数部によって与えられている ($\sigma_{xy}^v \propto \gamma_2$)。そのため σ_{xy}^v の符号を知るためには、微視的な理論によって γ_2 項についての考察が必要である。BCS 理論の枠組みの中では、 γ_2 がフェルミレベルでの状態密度のエネルギー微分に比例することが指摘された ($\gamma_2 \propto \partial N\mu / \partial \mu |_{\mu = \epsilon_F}$)。さらにゲージ普遍性の議論では、 $\gamma_2 \propto \partial \ln T_c / \partial \mu$ であることも指摘された。

σ_{xy} は、ピンギの影響を受けにくいことが指摘されており、抵抗率に比べてより本質的な解析を可能にするほか、上述の TDGL 理論との比較が行える。そして我々の得たホール効果のドーピング依存性は TDGL 理論と非常によく整合性を持っていることが明らかとなり、低濃度において $\sigma_{xy}^v < 0$ であり高濃度において $\sigma_{xy}^v > 0$ であるものと解釈できた。このような符号逆転の傾向は、他の実験グループによって報告されているさまざまな高温超伝導体においても符合しており、試料のピンギの強さ、異方性、超伝導層の数などとは無関係に唯一ドーピング量だけに依存している。以上のことから、我々は高温超伝導体の渦糸状態におけるホール効果の符号はノーマル状態での電子状態と密接に関係しており、ドーピング量によって普遍的に決定されるものと結論づけた。

TDGL の議論において、ホール効果の符号を決定するのに重要な役割を持つ σ_{xy}^v は electron-hole asymmetry に起因して生じているが、その直接的な意味は渦糸の荷電化として理解されている。最近、超伝導転移に伴い electron-hole asymmetry に関連して化学ポテンシャル μ が変化することが指摘されている。このため、ノーマル状態にある渦糸の内側と超伝導状態にある渦糸の外側で、化学ポテンシャルの差に応じて電荷のやり取りをすることが考えられる。実際、我々のドーピング依存性の結果は、渦糸の荷電化とその遮蔽効果を取り入れた TDGL の議論によってうまく説明することができる。このことから高温超伝導体では渦糸が電荷を帯びていると考えられ、その影響が渦糸の運動においても顕著に現れているものと考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 熊 谷 健 一

副 査 教 授 大 川 房 義

副 査 助 教 授 河 本 充 司

副 査 助 教 授 松 田 祐 司 (東京大学物性研究所)

学 位 論 文 題 名

Vortex Dynamics in High- T_c Cuprates

(銅酸化物高温超伝導体の渦糸ダイナミクス)

高温超伝導体の異方的対波動関数、極端に短いコヒーレンス長、強い電子間相互作用が働くことなどから高温超伝導体の渦糸状態は従来超伝導体とは異なった新しい物性を示す。その一つに、高温超伝導体における転移温度 T_c 直下でのホール効果の符号の逆転現象がある。この符号逆転に関して電子状態の内的な要因とピン止め等の外的な要因に起源を求めるなど様々なモデルが考えられてきたが解決には至っていない。

本論文では、ホール効果の実験により高温超伝導体の渦糸状態での渦糸ダイナミクスを調べ、渦糸相図の問題や渦糸内部の電子構造と準粒子散乱機構を研究した。 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 系の低 hole 濃度から高 hole 濃度の異なった電子状態の試料に対してホール効果のキャリアドーピング量依存性について詳細な研究を行った。その結果、低 hole 濃度の試料ではホール効果の符号逆転が観測されたのに対して、高 hole 濃度の試料では観測されなかった。

論文では、時間に依存した Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式に基づきホール効果の符号逆転を解析した。渦糸状態でのホール伝導度 σ_{xy} は、渦糸コア内部とその周辺の準粒子から生じる σ_{xy}^n と渦糸の運動から生じる σ_{xy}^v の 2 つの寄与の和 $\sigma_x = \sigma_{xy}^n + \sigma_{xy}^v$ として表される。 σ_{xy}^n は磁場 B に比例し、その符号はノーマル状態における符号と一致している。一方、 σ_{xy}^v は $1/B$ に比例しており、低磁場においてホール効果の符号を決定するのに支配的な役割をする。従って、 σ_{xy}^v が σ_{xy}^n と異なる符号を持つ場合にホール効果の符号逆転が起きる。低 hole 濃度試料において $\sigma_{xy}^v < 0$ であり、高濃度において $\sigma_{xy}^v > 0$ である。実験で得られたホール効果のドーピング量依存性は TDGL 理論と非常によい整合性があり、符号逆転は試料のピンニングの強さ、異方性、超伝導層の数などとは無関係に唯一ドーピング量のみ依存して、高温超伝導体の渦糸状態におけるホール効果の符号は電子状

態と密接に関係しており、ドーピング量によって普遍的に決定されるものと結論づけた。

TDGL の議論において、ホール効果の符号を決定するのに重要な役割を持つ σ_{xy}^v は electron-hole asymmetry に起因して生じ、その直接的な意味は渦糸の荷電化として理解されている。超伝導転移に伴い化学ポテンシャル μ が変化する。このため、ノーマル状態にある渦糸の内側と超伝導状態にある渦糸の外側で、化学ポテンシャルの差に応じて電荷の移動がおこると考えられる。実際、ドーピング量依存性の結果は、渦糸の荷電化とその遮蔽効果を取り入れた TDGL の議論によってうまく説明することができる。このことから、高温超伝導体では渦糸が電荷を運び、その影響が渦糸の運動においても顕著に現れていることを示唆した。

このように、高温超伝導体における渦糸状態のダイナミックスを輸送現象の実験手法によって調べ、その特異な電子状態を明らかにした本研究は高く評価される。よって審査員一同は本論文の申請者が北海道大学博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格があるものとして認める。