

論文の内容の要旨

論文題目 マイクロ波によるフラックスフローホール効果の研究

氏名 小川 亮

内容の要旨

第2種超伝導体における磁束量子コア内部には、低エネルギー束縛状態があることが知られている。コア内の準粒子状態は、エネルギー準位間隔と準位幅の比 $\Delta E / \delta E = \omega_0 \tau$ で分類される (ω_0 : コア内のエネルギー準位間隔, τ : コア内の準粒子散乱時間)。その準粒子状態が量子的なときは”clean”, 連続的なときは”dirty”, その中間は”moderately clean”と呼ばれる。一方, 準粒子状態は外部電流による, 磁束量子の定常的な運動状態(フラックスフロー)とも深く関係している。そのため, これまでの研究では, フラックスフローにおける実行粘性抵抗係数の測定から, 磁束量子コア内の準粒子状態が調べられてきた。そこから明らかになったのは, 銅酸化物超伝導体や鉄系超伝導体など様々な物質で, STM での測定や理論からの予想に反して, コア内は一様に”moderately clean”であるということである。しかしながら, この測定結果が意味するものについて, 既存の理論では十分な理解が得られていない。

フラックスフローの性質は粘性抵抗係数によって表現される。すなわち, その性質はフラックスフロー抵抗の測定から調べることができる。そして, 磁束量子の運動は外部電流による駆動力に対してある角度方向に動く。つまり, 粘性抵抗係数はテンソル量であり, それを調べるには, 縦フロー抵抗と横フロー抵抗(フラックスフローHall 効果)の両方の測定が必要となる。その一方で, 縦抵抗とフラックスフローHall 効果の両方の寄与を合わせた物理量である実効粘性抵抗係数は準粒子状態と簡単な関係で結ばれている。そのため,

これまでの研究では、縦フロー抵抗、フラックスフローHall 効果の両方を別々に測定するのではなく、電流が環状に流れる円筒形空洞共振器を用いた測定から、フラックスフローでの実効粘性抵抗係数が調べられ、そこから準粒子状態が評価されてきた。ところが、既述のようにその結果は予想と異なり、様々な超伝導体でコアの状態が”moderately clean”であるという結論が得られていた。したがって、そのメカニズム解明のためには、実効粘性抵抗係数だけではなく、本来の縦方向と横方向の測定、特に、これまで測定に成功しておらず、磁束量子コア内の準粒子状態と一対一に対応しているフラックスフローHall 角($\tan \theta = \omega_0 \tau$)の測定を行うことが必要である。

なお、フラックスフロー測定では、磁束量子が不純物や欠陥によってトラップされる現象、つまり、ピン止めの影響を取り除かなければならない。そのため、マイクロ波以上の周波数を用いた測定が必要不可欠である。よって本研究では、これまで半導体などに対するマイクロ波 Hall 効果測定で使用されてきた2重縮退モード空洞共振器を用いることで、マイクロ波フラックスフローHall 効果測定を行う。しかしながら、従来の手法では、表皮厚さ領域の物質に対するマイクロ波 Hall 効果の解析手法は見当たらず、さらに測定精度を高めるために縮退モードのカップリング調節機構が必要であるなど極低温での測定が容易ではなかった。

そこで本研究では、十字型2重縮退モード空洞共振器内電磁場の解析的計算・数値シミュレーション、さらに測定装置作製等を行うことによって、十字型2重縮退モード空洞共振器による、複雑な機構を必要とせず比較的簡単に極低温で測定可能な、電気伝導度の高い物質に対するマイクロ波 Hall 効果の測定・解析の新たな方法を開発した。

本研究では、新たに開発した十字型二重縮退モード空洞共振器によるマイクロ波 Hall 効果測定方法がフラックスフローHall 効果測定に使用できることを、Bi を対象としたテスト測定を行うことで確認した。そして、銅酸化物超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ と $\text{YBa}_2\text{CaCu}_3\text{O}_y$ という対照的な渦糸相図をもつ2つの物質を対象としてフラックスフローHall 効果の測定を行った。

その結果、フラックスフローHall 角の大きさは温度の低下とともに増加し、フラックスフローHall 角の磁場依存性は、ピン止めの影響により磁束液体状態と磁束固体状態で対照的な振る舞いを示すという理論と一致する結果が得られた。その一方、フラックスフローHall 角の大きさ、つまり、 $\omega_0 \tau$ は $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ と $\text{YBa}_2\text{CaCu}_3\text{O}_y$ のどちらの物質においても、 $T=10\text{ K}$ で、1 から 3 程度であることが分かった。この $\omega_0 \tau$ の値は実効粘性抵抗係数から推定された値より 1 桁程度大きいものである。磁束量子の運動方程式における粘性抵抗係数を η 、Hall 定数を α で表すと、実行粘性抵抗係数は $\eta^* = \eta + \alpha^2 / \eta$ 、Hall 角は $\tan \theta = \alpha / \eta$ で表わされることから、これらの測定結果は η と α が同程度に小さくなっている可能性を意味している。つまり、運動方程式における粘性力の非線形項や粘性抵抗係数の速度依存性、あるいは、既存の理論では考慮されていない運動方程式に現れない隠れた散逸を新たに考える必要がある可能性を示唆している。