

氏名	なか はらい しゅう 中 拂 周
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2375 号
学位授与の日付	平成 13 年 5 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	Vortex States under Magnetic Fields Nearly Parallel to the Plane of Layered Superconductors (層状超伝導体の面平行近傍磁場下における磁束状態)
論文調査委員	(主 査) 教授 石黒武彦 教授 大見哲巨 教授 山田耕作

論 文 内 容 の 要 旨

層状超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ において、磁場を超伝導面に平行に印加した場合に生じるジョセフソン磁束は、超伝導面に閉じ込められた状態（ロックイン状態）にあるが、超伝導面に沿う方向には自由に運動できる。しかし、磁場の方向を面平行から傾けた場合、ある角度を超えると磁場の超伝導面に垂直な成分によりパンケーキ磁束が生成され、そのピン止めにより、磁束の自由な運動は抑制される。さらに傾けて面垂直な磁場成分が増加するとパンケーキ磁束系は融解転移を起こし、ピン止めされることなく運動出来るようになる。このような磁束状態について、超伝導面にほぼ平行な高周波磁場に対する磁化率を測定することにより新しい知見を得ている。

まず、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ の可逆的な磁化特性を示す高温領域 ($>40\text{K}$) において、超伝導面に面平行な磁場の増加によってパンケーキ磁束の融解転移臨界磁場が減少し、ある面平行磁場以上では融解転移磁場域がロックイン領域に交わることを明らかにした。これは、この臨界面平行磁場 H_{JCR} よりも大きい面平行磁場の存在下では、超伝導面上のパンケーキ磁束系は面垂直磁場成分の大きさによらず常に融解した状態にあることを意味しており、横マイスナー効果が消失していることを示している。この H_{JCR} の温度依存性を、異方性係数の異なる試料について調べ、温度依存性に関する経験則を明らかにし、池田による理論と対比することにより、 H_{JCR} はジョセフソン磁束系のグラス転移磁場に相当すると結論している。

一方、不可逆的な磁化特性を示す低温領域 ($<30\text{K}$) においては、超伝導面に平行な磁場の存在下で面垂直磁場を掃引する際、パンケーキ磁束のクリープ速度よりも磁場掃引速度が十分に早い場合にはロックイン状態が生じなくなる。このロックイン状態を観測できる臨界的な掃引速度を実験的にもとめ、その温度依存性から磁束のピン止めポテンシャルの値を導いている。また、この結果をもとにヒステリシスの顕著な低温域においては超伝導面にほぼ平行な磁束線は、パンケーキ磁束とジョセフソン磁束につながり、階段状磁束構造をとっていることを考察により明らかにしている。

一連の研究を $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ についての異方性係数 γ の異なる結晶について行うとともに同様の研究を層状構造をもつ有機超伝導体 $\kappa\text{-(ET)}_2\text{X}$ ($\text{X}=\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2\text{Br}, \text{Cu}(\text{NCS})_2]$) 単結晶についてもすすめ、その一般性を検証すると共に、比較により各々の特徴を明らかにしている。 T_{C} が低い有機超伝導体の場合には、高温領域では $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ の場合と同様に H_{JCR} が得られるが、その温度依存性が異なることを見だし、その原因として熱ゆらぎの効果が $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ の場合よりも弱いことをあげている。一方、低温領域における磁束のクリープ速度は $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ の場合よりも大きく、 1.5K 以上の温度領域では磁束ロックイン状態の消失はみられていない。これは、不可逆な磁化を与える温度領域が非常に低いことと関連し、ピン止めポテンシャルが低いことを表している。

以上に述べたように、本論文は層状超伝導体における磁束線のロックイン転移、融解転移、クリープとそれに係わるピンニングについて新しい観点から明らかにしている。

論文審査の結果の要旨

高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ は典型的な層状構造を持つ超伝導体であり、著しい2次元性を示す。このため層面に直交する磁場成分は超伝導面内にパンケーキ状の磁束量子を形成し、超伝導面に平行にかけられた成分は層に平行なジョセフソン磁束を形成する。本研究は超伝導面に平行な磁束線を層面に対して傾けたときに生じるピンニング特性を高周波磁化率の測定を通して明らかにし、それをもとに磁束線の構造について考察したものである。

従来、磁束ピンニングの研究は層面にはほぼ直交する磁場をかけた下で、パンケーキ状磁束の特性に着目して展開されてきた。これに対し、本研究はジョセフソン磁束にパンケーキ状磁束が付加されていく過程を捉えるという新しいアプローチをとっている。その結果、高温の可逆磁化領域では、パンケーキ磁束間の相互作用が超伝導面に平行な磁束線によって弱められている、あるいはパンケーキ磁束とジョセフソン磁束の間のつながりが弱い状態に有ることを示している。一方、低温の不可逆磁化領域では、磁束状態の外部磁場の変化に対する時間応答特性から、両者がつながった階段状磁束になっており、磁束の緩和過程はパンケーキ磁束によって決められていることを明らかにしている。

2次元超伝導体における磁束の総体的な特性はパンケーキ磁束の特性に支配されている。2次元超伝導体にとって本質的なもう一方のジョセフソン磁束の特性を捉えるために、本研究では結晶試料の層面の磁場方向からの傾角度を数度以内とし、0.01度以下の分解能で制御しつつ進められた。この条件下では、パンケーキ磁束の形成が少なくジョセフソン磁束の状況を直接的に観測できる。しかし、結果的には面に平行な磁束線の動特性を支配するものとしてのパンケーキ磁束の特性が捉えられていることは興味深い。

本研究では $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ について、酸素のドーピング量が異なり、異方性因子が異なる3種の結晶試料について測定をすすめることにより、得られた結果の普遍性を検証すると共に、低次元性との係わりを明らかにしている。また、低い超伝導転移温度を持つ有機超伝導体 $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu(NCS)}_2$, $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu[N(CN)}_2\text{]Br}$ についても実験的研究を進め、熱ゆらぎの効果、磁束ピン止めポテンシャルとの関連について考察し、磁束線構造の観点から各層状物質における磁束線構造の特徴を明らかにしている。

以上、本論文は層状超伝導体の磁束構造を超伝導面にはほぼ平行な磁束の高周波磁場に対する応答特性を通して、ジョセフソン磁束とパンケーキ磁束の結合状態についての知見を得、またパンケーキ磁束の状態と緩和特性について新しい視点から明らかにしたもので、層状超伝導体における磁束線の理解について重要な貢献をしたものと言える。

よって本論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認める。なお、主論文及び参考論文に報告されている研究業績を中心とし、これに関した研究分野について試問した結果、合格と認めた。