

論文審査の結果の要旨

氏名 佐野浩孝

本論文は全5章からなる。第1章は序論であり、第2章では超伝導薄膜とメゾスコピックサイズの構造をもつ超伝導ネットワークにおける相転移と渦糸状態が解説されている。第3章および第4章が本論文のオリジナルな研究成果で、第5章は結論である。

超伝導を特徴付ける長さスケールとして、秩序変数の振幅が空間変化するコヒーレンス長 ξ と、磁束密度の侵入が遮蔽される磁場侵入長 λ の二種類ある。例えば、磁場中第2種超伝導体に生成される渦糸周りにもこれらが特徴的に現れる。渦糸間には反発力が働くので、超伝導体が十分大きい場合、その配置は三角格子となり、1本の渦糸が担う磁束は量子化される。一方、厚みが ξ より十分小さい超伝導薄膜や、 ξ や λ と同程度かそれより小さいメゾスコピックサイズの構造をもつ超伝導ネットワークでは、秩序変数の振幅がゼロから有限となる平均場的相転移温度よりも有意に低い温度で、位相が有限となり超伝導転移する。これはBerezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移と呼ばれ、渦糸-反渦糸からなる渦対の束縛・乖離が協力的に起こるトポロジカル相転移である。特に、渦糸充填率 α (単位胞あたりの渦糸本数) が $1/2$ のネットワークの相転移は興味深く、渦糸配置は基底状態で2重縮退しているためFully Frustrated XY (FFXY) モデルと呼ばれる。そこでは渦対励起 (XYスピン型自由度) と反位相ドメイン励起 (イジングスピン型自由度) が拮抗し、ドメイン境界に発生した渦対 (キルク対) が位相の相転移温度 (T_{ph}) を決めることが理論的に提唱されている (キルク誘起BKT転移)。

第3章に詳述されているように、本研究では、メゾスコピック超伝導ネットワークに空間変調磁場を導入して、FFXYモデルにおける反位相ドメインの役割を調べた。試料は、Si基盤上に $500 \times 500 \text{ nm}^2$ の大きさの単位胞を 300×300 個配列したAlの細線ネットワークで、その上にCo強磁性体ドットが交替配置されている。横磁場で強磁性体ドットを磁化してその漏れ磁場でネットワークにチェッカーボード型の空間変調磁場 (β) を導入し、その大きさを試料を回転することで自在にコントロールしている。具体的には、 $\alpha = 1/2$ に固定して β を変化させ、電流電圧特性のべき指数 a ($V \propto I^a$) の温度変化を精密に測定した。その結果、 $0 < \beta < 1/4$ の範囲で、反位相ドメイン励起が抑制されることに対応した T_{ph} の上昇が見出された。ただし、転移点における a のジャンプ量などキルク誘起転移の描像とは一見異なる部分も見られ、その理由について渦糸-ドメイン対の形成を仮定して議論している。一方、 $1/4 < \beta <$

1/2の範囲では T_{ph} は変化せず、 T_{ph} 以下の a の温度変化は徐々に緩やかになった。これは、導入されたドメイン励起が渦対励起を抑制する描像でよく説明される。 $\alpha = \beta = 1/2$ では $\alpha = \beta = 0$ と同じく通常のBKT転移が期待されるが、得られた結果はこれを良く再現する。以上は、FFXYモデルに対する反位相ドメインの役割を半定量的ではあるが初めて実験的に明らかにしたもので、メゾスコピック超伝導体の相転移の物理に重要な知見をもたらしたものとして高く評価できる。キルク誘起相転移モデルに対しても、これを間接的に支持する結果であり、興味深い。

第4章では、メゾスコピック超伝導体の形状が離散的な回転対称性を持つ場合、その対称性と渦糸本数との折り合いがつかない状況下で、渦糸-反渦糸対が形成される可能性を検証しようとした実験について述べられている。作成した試料は、膜厚260 nm、一辺の長さが3.1 μm の正方形をしたAlの微小超伝導体で、一辺450 nmの微細孔を四隅に配置することで反渦糸の安定化を計っている。ここでは、渦糸の空間配置を決定するために、微小超伝導試料の直下にバリスティック伝導領域の半導体2次元電子気体を利用した多端子Hall crossを置くという独創的な方法が開発されている。その結果、磁場の増加と共に、まず四隅の微細孔に渦糸が入り、その後中央付近に入ってゆく様子が明瞭に観測された。また、渦糸本数が3と7のときには渦糸の配置変更も観測された。微小超伝導体への個々の渦糸の侵入を磁束密度の空間分布から捉えた例はこれまでほとんどなく、反渦糸の生成こそ観測されなかったものの、この成果と多端子Hall crossの新規考案は独創性と今後の発展性の点で高く評価される。

なお、本論文の第3章および第4章は、遠藤彰氏、勝本信吾氏、家泰弘氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の遂行と解析および考察を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。