

論文の内容の要旨

論文題目 第二種超伝導体の孤立量子渦のフラックスフローの理論

氏名 須貝 駿貴

1911年に Kamerlingh Onnes によって発見された超伝導は、電気抵抗がゼロになるという特徴的な現象の他にも、完全反磁性や、磁束の量子化、ジョセフソン効果など、常伝導状態では存在しない様々な現象が発現し盛んに研究されてきた。本研究では量子化した磁束すなわち量子渦のフロー状態を対象とする。

量子渦のフローの物理は 1966年に Schmid によって Time-dependent Ginzburg-Landau 方程式 (TDGL 方程式) を用いた解析がなされて以来、Hu-Thompson, Gor'kov-Kopnin, Dorsey [1-3] らによってこの TDGL 方程式やその改良版を用いて様々な物理量が計算されてきた。孤立量子渦のフローに関する先行研究に共通しているのは、輸送電流と量子渦の速度の関係を与える線形非同次微分方程式そのものを解かずに、解の存在条件から輸送電流と量子渦の速度の関係を導出したことと、Ginzburg-Landau パラメータ κ (磁場侵入長 λ とコヒーレンス長 ξ の比) が十分大きい極限を取っているために、量子渦から十分離れた領域では輸送電流が空間的に一様に流れる状況を考えていることである。これらのアプローチは計算量を著しく減らせる利点を持つ一方、量子渦にかかる駆動力に関する問題を解決するには十分ではない。

量子渦にかかる駆動力が磁気的なローレンツ力か流体力学的な力かという論争は 1960年代から続いている。この論争を理論側から解決するには、量子渦に対する駆動力を κ を有限に保ったまま計算する必要がある。磁場中の超伝導体状態は磁気的なエネルギーと物質場 (超伝導体) の運動エネルギーのバランスで決まり、この二つのエネルギースケールの比が κ^2 で与えられるからである。また論争を最終的に解決するには理論的主張の実証方法を提案する必要がある。

上に述べた問題の解決を目的として、本論文では TDGL 方程式の単一量子渦フロー解に対する線形非同次微分方程式を磁場侵入長を有限としたまま全領域に渡って解き、その解を用いて物理量、特に渦芯付近の物理量を空間依存性を求めた。

本研究の主な特徴は、量子渦から離れた領域で磁場侵入長 λ のスケールで変化する輸送電流を持つマイスナー状態に漸近するように境界条件を定めたことにある。この条件下で TDGL 方程式を量子渦フロー速度 v の 1 次までのオーダーで解いた。得られた電流分布から輸送電流を差し引いた際に残るバックフロー流の空間構造は Hu-Thompson [1] が TDGL 方程式が近似的に計算したものと定性的に一致したことは今回計算した解の正確さと Hu-Thompson の近似計算の正しさを示している。また輸送電流が一様な極限 $\kappa \rightarrow \infty$ で、我々の方程式系の解の存在条件が先行研究 [2,3] のそれに一致することを確認した。

本研究の主な成果は次の 3 点にある

- (1) 渦芯を囲む領域に単位時間あたりに流れ込む運動量（ストレステンソルの表面積分）の計算により量子渦にかかる駆動力と、それへの流体力の寄与と磁気的なローレンツ力の寄与を量子渦を囲む全領域で求めたこと
- (2) 量子渦にかかる駆動力の大きさは、従来の研究では輸送電流の大きさと磁束量子の大きさの積とされていたが、それとは異なることを見出したこと
- (3) 実験的検証法の提案。

(1) 先行研究 [4] では渦芯から十分遠方の領域でのみ駆動力、流体力、磁気的ローレンツ力が得られたが本研究ではこれを全領域に拡張した。また同様の計算をピン止めされた量子渦にも適用できることを示した。これらにより駆動力に関する理論結果を実験的に検証する道筋が開けた。

(2) 従来の結果からのずれは $\kappa \rightarrow \infty$ のときに無視できる。有限の κ を持つ超伝導体では駆動力の大きさだけでなく、それが磁気的なローレンツ力そのものではないことが明らかになった。

(3) 渦を囲む領域の局所磁場を測定し、Maxwell 応力を計算することで、渦にかかる駆動力のうち、磁気的なローレンツ力の寄与を実験的に決められることを指摘した。輸送電流の大きさから駆動力の大きさが決められる。両者を比較することにより、磁気的なローレンツ力が駆動力のうちの半分以下の寄与しかないことから、本研究の成果を検証できる。

参考文献

- [1] Chia-Ren Hu and Richard S. Thompson. Dynamic Structure of Vortices in Superconductors. II. $H \ll H_{c2}$. Phys. Rev. B, Vol. 6, pp. 110–120, Jul 1972.
- [2] L. P. Gor'kov, N. B. Kopnin. Vortex motion and resistivity of type-II superconductors in a magnetic field. Phys. Usp., Vol. 18, No. 7, pp. 496–513, 1975.
- [3] Alan T. Dorsey. Vortex motion and the hall effect in type-II superconductors: A time-dependent Ginzburg-Landau theory approach. Phys. Rev. B, Vol. 46, pp. 8376–8392, Oct 1992.
- [4] Yusuke Kato and Chun-Kit Chung. Nature of Driving Force on an Isolated Moving Vortex in Dirty Superconductors. Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 85, No. 3, p. 033703, 2016.