



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Anomalous Hall effect on a vortex of supercurrent in type-II superconductors [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	大内, まり絵
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第14354号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81899
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Marie_Ohuchi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士 (理 学) 氏 名 大内 まり絵

学 位 論 文 題 名

Anomalous Hall effect on a vortex of supercurrent in type-II superconductors
(第二種超伝導体の超伝導渦電流に対する異常 Hall 効果)

第二種超伝導体の渦糸近傍では、磁束だけでなく、電荷が捕捉され非一様な電荷分布を有することが知られている。この渦電荷分布に関して、多くの理論研究者が議論してきた。まず初めに、超伝導電流に働く Lorentz 力によって電荷が生じることを、London が現象論で提唱した。また、Khomskii と Freimuth は、渦内と渦外のペアポテンシャルを階段関数で接続し、常伝導状態と超伝導状態の化学ポテンシャル差によって生じた電荷を計算した。Goryo は Chern-Simons 項を含む Ginzburg-Landau 理論を用いて p 波超伝導体の電荷を求めた。さらに、Matsumoto と Heeb は、超伝導状態における平均場理論である Bogoliubov-de Gennes (BdG) 方程式と Maxwell 方程式を連立して解き、カイラル p 波超伝導体の渦電荷を計算した。その後も、BdG 方程式を用いた単一渦の電荷の計算はいくつか報告されている。しかし、BdG 方程式を用いた渦電荷の計算手法は、その大部分が数値計算によるものであり、渦電荷の起源を解明することが難しい。また、BdG 方程式と Maxwell 方程式を連立させた Abrikosov 格子状態の渦電荷の計算は、未だに報告がない状態である。

一方、渦の解析に非常によく用いられてきた従来の準古典方程式である、Eilenberger 方程式には、渦電荷に寄与する項が全て欠落していたため、平衡状態における電荷を計算することができなかった。そこで、電荷に寄与する力を準古典理論に取り込んだ、拡張準古典方程式が導出された。超伝導渦電荷に寄与する力は(i)超伝導電流に働く Lorentz 力、(ii)ペアポテンシャルの傾きによって生じる力 (PPG 力)、(iii)状態密度の傾きによって生じる圧力 (SDOS 圧力) の三つであることが知られている。なお、本論文では二次元の s 波超伝導体を考えているため、SDOS 圧力は生じない。従来の準古典方程式は、超伝導の平均場理論である Gor'kov 方程式の準古典パラメータ ($\delta=1/k_F \xi_0$: k_F は Fermi 波数、 ξ_0 はコヒーレンス長) で展開したときのゼロ次に対応し、準古典パラメータの一次である三つの力を取り込むことによって拡張準古典方程式が導出される。最近、拡張準古典方程式を用いた電荷の計算が積極的に行われている。s 波超伝導体の単一渦における三つの力による帯電効果が計算され、幅広い領域で PPG 力が主要な寄与であることが示されている。また、Masaki は s 波とカイラル p 波超伝導体で、PPG 力による渦電荷密度を計算した。PPG 力の中には、ペアポテンシャルの空間微分項があるが、その中の角度微分が主要な寄与であると彼は主張した。実際、Cooper 対の角運動量と渦度が反平行である場合、帯電は非常に小さくなる。これは、カイラリティと渦度が反平行で打ち消し合い、角度微分の寄与がなくなったからである。一方、カイラリティと渦度が平行である場合は、渦の位相しか持たない s 波に比べても大きな帯電を持つことを示した。

このように、単一渦における PPG 力の帯電効果について理解が深まっているが、PPG 力の磁場依存性は未だに理解されていない。Kohno は Lorentz 力のみを含んだ拡張準古典方程式を用いて、s 波と d 波の渦電荷の磁場依存性を調べた。その結果、Lorentz 力による渦の帯電は磁場の関数として大きなピークを持つことを示した。したがって、高磁場領域では Lorentz 力の寄与が主要になると予想されるが、PPG 力の磁場依存性も含めた統一的な理解が必要である。

本論文の目的は、s 波二次元超伝導体の渦電荷密度の温度、磁場、準古典パラメータ依存性を調べることであり、帯電のメカニズムを微視的に解明することである。また、より大きな電荷が捕捉される領域を明らかにする。渦電荷の測定は、Kumagai らによる NMR/NQR を用いた実験が行われているが、我々の知る限り、原子間力顕微鏡を用いたような渦電荷の直接観測は行われてい

ない。よって、最も大きな渦電荷が存在するパラメータを知ることが、今後渦電荷の直接観測を行おうとする実験研究者にとって有益な情報となるだろう。PPG 力は、ペアポテンシャルの空間微分が含まれている項と、ベクトルポテンシャルが含まれている項に分けることができ、それらはそれぞれ常磁性(PM)電流と反磁性(DM)電流に対応している。そこで、以下では空間微分が含まれている項を PM 項、ベクトルポテンシャルが含まれている項を DM 項と呼ぶ。

円筒 Fermi 面を持つ s 波超伝導体の、三角 Abrikosov 格子における渦電荷の温度・磁場依存性を、Lorentz 力と PPG 力を含めた拡張準古典方程式を用いて計算した。その結果、Lorentz 力と PPG 力に含まれる DM 項が打ち消し合い、PPG 力に含まれる PM 項のみが残ることを明らかにした。なお、DM 項と PM 項を合わせた PPG 力は、磁場の増加に伴い単調に減少しており、低磁場領域では PPG 力、高磁場領域では Lorentz 力が主要であると見なすこともできる。また、低温かつ上部臨界磁場の半分程度で、電荷密度が最も強く補足されるという結果を得た。

渦電荷では PPG 力が重要であることを明らかにした。一方で、Doppler シフト法を用いて電荷密度を計算した結果、PPG 力は互いに打ち消し合ってしまう、Lorentz 力のみが残ることを解析的に示した。Doppler シフト法は、渦中心の低エネルギー励起を無視する近似であるため、不純物などによって低エネルギー励起が抑制された場合も、PPG 力は消えることが推察される。さらに、Doppler シフトされた Green 関数を超流動速度の一次までで展開すると、Meissner 状態においても Lorentz 力のみが超伝導電流に働くことを示すことができる。また、低磁場領域における熱輸送など、低エネルギー励起を無視できるような輸送現象においても、準粒子電流に働く Lorentz 力のみが寄与することが知られている。

PPG 力による渦電荷の性質について、さらに言及する。弱磁場極限において、PPG 力は次のような性質がある：(i) ペアポテンシャルに作用する角度微分が主要な寄与である、(ii) 渦コア内の超伝導電流にのみ働く、(iii) ゼロ磁場と見なせるような磁場侵入長が非常に長い極限においても、比較的大きな帯電効果を持つ。単一渦において角度微分が主要であるということは、ペアポテンシャルの位相、つまり渦内の超伝導電流が重要である。したがって、PPG 力による帯電は、超伝導渦電流に働く異常 Hall 効果によるものであるという結論を得た。

次に、BdG 方程式と Poisson 方程式を自己無撞着に解くことで、単一渦電荷の準古典パラメータ依存性を計算した。拡張準古典方程式は超伝導平均場理論からの準古典パラメータの展開を用いて導出されており、特に準古典パラメータが 1 に近づく量子極限近傍では拡張準古典方程式を用いて計算することはできない。その結果、幅広い準古典パラメータ領域で、電荷密度は準古典パラメータの増加に伴って線形に増加することを確認した。したがって、より大きな帯電効果を持つ物質は、コヒーレンス長が短く、クリーンな超伝導体であり、観測するためには低温、かつ上部臨界磁場の半分程度の外場をかけた状態が望ましい。