

学 位 論 文 題 名

Quasiparticles and quantum oscillations
in the vortex state of type-II superconductors

(第 2 種超伝導渦糸状態における準粒子状態と量子振動)

学位論文内容の要旨

De Haas-van Alphen (dHvA) 効果は、磁場強度の関数として現れる磁化の量子振動である。この現象は、磁場中の電子のエネルギーが量子化される (Landau 準位) ことに起因する。正常状態の dHvA 効果は、Fermi 面に関する有力な情報を与えてくれる。しかし、超伝導状態では超伝導ギャップが存在するために明確な Fermi 面が定義できない。実際、絶縁体でこの現象は観測されない。そのため、超伝導状態では dHvA 効果は観測されないのではないかと考えられる。しかし、1976 年 Graebner と Robins によって NbSe₂ における dHvA 効果が超伝導状態においても観測された。近年では、様々な第 2 種超伝導体において、渦糸状態でも dHvA 振動が観測されている。実験結果で共通に見られる点は以下の通りである。(1) 振動の周期は正常状態と渦糸状態で変化がない。(2) 有効質量にもほとんど変化はない。ただし、重い電子系物質でのみ渦糸状態で磁場の減少と共に有効質量が減少している。(3) 渦糸状態では新たな減衰因子 (磁場に依存) が振動の振幅に付加している。

さらに最近では、超伝導ギャップの異方性と dHvA 効果の関係が注目されている。YNi₂B₂C では dHvA 振動が非常に低磁場まで ($\sim 0.2H_{c2}$) 見られるが、一方で比熱が T^3 に比例するという実験結果がある。ここで、 H_{c2} は上部臨界磁場である。これは、この物質のギャップに異方性があることを示唆している。振動がこのような低磁場まで観測されたのは、振動に寄与した Fermi 面上の超伝導ギャップが他の部分に比べ、非常に小さかったためと考えられている。

超伝導状態における dHvA 効果を解明するためには、ギャップの対称性による違いも含め、渦糸状態における準粒子状態を全磁場領域で理解する必要がある。dHvA 振動は高磁場で主に観測されるが、準粒子状態はゼロ磁場においてさえ、ギャップの対称性により異なる。等方的な場合では、Fermi 面に対し超伝導ギャップが全面で開いており、ギャップより小さなエネルギー領域には準粒子状態はない。一方、異方的な超伝導体の場合、超伝導ギャップは Fermi 面上の点、あるいは線上でノードを持つ。したがって、低エネルギー準粒子がノード付近に存在することが可能となり、準粒子状態密度は Fermi エネルギー近傍の領域でも有限となる。これらの準粒子状態は、磁束が超伝導体内に侵入する有限磁場中 (渦糸状態) でも異なっていると予想され、この違いが dHvA 振動の減衰の大きさの違いに関与していると予想される。

そこで、本研究の内容は大きく 2 つに分けられる。(1) 有限磁場中において、等方的な場合と異方的な場合の超伝導体における準粒子状態の類似点、相違点を明らかにする。2 次

元の s 波と $d_{x^2-y^2}$ 波における磁気ブリルアンゾーン内の準粒子エネルギーバンドと状態密度の磁場依存性の数値計算を行い、結果を比較する。(2) dHvA 振動の減衰因子の定量的表式を 3 次元の場合における数値計算、解析的表式導出の両面から決定する。いくつかの異なるギャップの対称性での結果を比較することにより、ギャップの異方性と振動の減衰の関係をも明らかにする。得られた解析的表式を用いることにより、ギャップの方向依存性が超伝導状態での dHvA 効果によって決定できると期待できる。

問題を解くのに用いたモデルは「磁場中の連続体モデル」である。「格子モデル」では渦糸の位置が格子定数の整数倍である必要があるため、磁場の連続的な変化を調べるのは難しい。方程式を解くのに用いた手法は「Landau 準位展開法」である。この方法は、準粒子波動関数やペア・ポテンシャルをある基底関数で展開することで、方程式をその展開係数に対する代数方程式に変換する、というものである。基底となる関数は、渦糸格子の周期性を利用し、平均磁束密度に対する磁気並進群の固有関数を用いる。磁化は自由エネルギー汎関数を磁場で数値微分することで求めた。一方、振動の減衰因子の解析的表式の導出にはペア・ポテンシャルに対する摂動論を用いた。

まず、準粒子エネルギーの分散関係と状態密度の数値計算の結果をまとめる。磁場が H_{c2} から低くなるにつれ、正常状態で離散的だったエネルギー準位がペア・ポテンシャルの有限なエネルギー領域で分散を持つようになる。準粒子エネルギーが分散を持つことにより、状態密度は有限な幅を持つことになる。このように、状態密度が有限な幅を持つことが超伝導状態における dHvA 振動の減衰の原因となる。高磁場領域では s 波と d 波の場合で大きな違いは見られない。両者の違いは低磁場領域で顕著に現れる。 s 波では磁場の低下につれ、束縛状態が徐々に形成されていくが、 d 波ではそのような振る舞いは見られない。つまり、 d 波の場合には孤立渦糸の状況においても束縛状態はない。

次に、dHvA 効果の減衰因子についての結果を述べる。3 次元での磁化の数値計算の結果、実験結果と同様に振動の周期は正常状態と超伝導状態で変化しなかった。振動の減衰については、全面でギャップが開いた場合と極値軌道の上にポイントノードがある場合では大きな違いが見られず、振動は徐々に減衰し、 $0.6 H_{c2}$ 程度まで振動が見られた。ところが、極値軌道の上にラインノードを持つ場合、振動の減衰はほとんど見られなかった。この結果は、振動の減衰に寄与するのが極値軌道上のギャップであることを示している。次に、摂動論から求めた解析的表式を用いて数値計算の結果を詳しく解析してみた。その結果、減衰因子に含まれるのが極値軌道上のギャップの最小値ではなく、「極値軌道上のギャップの平均値」であることが明らかになった。これは、超伝導状態の dHvA 効果の実験により超伝導ギャップの方向(バンド)依存性を決定できる可能性があることを示している。実際にいくつかの物質(NbSe_2 , Nb_3Sn , $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$, V_3Si)について、解析的表式を用いて極値軌道上のギャップの平均値を評価してみた。 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ や V_3Si においては、見積もられた極値軌道上のギャップの平均値が、比熱などから求めたギャップの大きさ(ギャップ全体の平均値)とは大きく異なっていた。これは、これらの物質がバンドに依存した異方的な超伝導ギャップを持つことを意味する。この結果は、ゼロ磁場での比熱が温度のべきとなっている実験結果からも支持される。しかし、超伝導ギャップの形状を完全に決定するためには様々な磁場方向からの dHvA 効果の実験が必要である。

以上、本研究によりギャップの方向依存性が超伝導状態の dHvA 振動によって決定できることが示された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 川 房 義

副 査 教 授 熊 谷 健 一

副 査 助 教 授 北 孝 文

学 位 論 文 題 名

Quasiparticles and quantum oscillations in the vortex state of type-II superconductors

(第2種超伝導渦糸状態における準粒子状態と量子振動)

ド・ハース-ファン・アルフェン効果は、金属の磁化が磁場の関数として振動する現象である。この現象は、鋭いフェルミ面のある場合、すなわち、低温・高純度の試料においてのみ観測され、フェルミ面の形状を決定する有力な手段となっている。1976年にGraebnerとRobbinsは、NbSe₂の超伝導状態において、超伝導状態ギャップが開きフェルミ面が消失しているにもかかわらず、ド・ハース-ファン・アルフェン振動が観測されることを示した。その後、1990年代になって、ド・ハース-ファン・アルフェン振動を示す超伝導物質が数多く見つけられ、現在では、「ド・ハース-ファン・アルフェン効果は超伝導体においても一般的に起こりうる」ことが、研究者の間での共通の認識となっている。この現象は多くの理論家の興味を引き、活発な研究が行われてきた。しかし確立した理論はなく、特に「なぜ鋭いフェルミ面のない超伝導状態においてド・ハース-ファン・アルフェン振動が観測されうるのか」等の基本的な点に関しても、明確な物理的描像のない状況であった。特にYNi₂B₂Cにおいては、振動が上部臨界磁場 H_{c2} の約 $1/5$ という低磁場まで観測されることが報告されている。また、この物質のゼロ磁場における比熱は、低温において T^3 の挙動を示し、超伝導ギャップに異方性のあることが明らかになっている。しかし、超伝導ギャップに異方性がある場合の信頼できる理論もない状態である。

この学位申請論文では、この未解決の問題を、数値的研究と解析的研究を組み合わせ、理論的な解明を試みている。まず、最良の完全系展開であるランダウ準位展開法という新たな手法を用いて詳細な数値計算を実行し、超伝導状態の準粒子スペクトルを求めた。このスペクトルを用い、磁化の磁場依存性、すなわちド・ハース-ファン・アルフェン振動を計算した。この理論結果は、極値軌道上での超伝導ギャップの大きさと振動の減衰との間に密接な関係があることを初めて明確にした。また、振動の減衰に対する解析的表式の導出を行い、その表式が数値計算結果をよく再現することを確認した。この理論結果を用いれば、ド・ハース-ファン・アルフェン振動の実験結果から、超伝導体の極値軌道上でのエネルギーギャップの大きさが評価できる。さらに磁場の方向依存性を観測すれば、超伝導ギャップの異方性に関する情報も得られることを示唆している。特に、フェルミ面が複数枚存在する系においては、正常状態におけるド・ハース-ファン・アルフェン振動がフェルミ面ごとに異なるため、それぞれの振動を別々に解析すれば、それぞれのフェルミ面のギャップの大きさと異方性の情報を与えるのも可能にする。

以上、本論文は、長年の懸案であった超伝導ド・ハース-ファン・アルフェン振動を理論的に解明し、「ド・ハース-ファン・アルフェン振動による超伝導ギャップ・スペクトロスコピー」に道を開いたものとして高く評価できる。審査員一同は博士（理学）の資格が十分にあると判定した。