

論文内容の要旨

論文題目 Persistent Current in the Superconducting Proximity Systems
(超伝導近接系における永久電流)

氏名 佐々木 貴彦

金属と超伝導のきれいな接合面を作ると金属中に超伝導状態がしみだし、金属が超伝導的な性質を示すようになる。これは一般的に超伝導近接効果と呼ばれている。金属が得る超伝導的な性質の代表的な現象のひとつが、マイスナー効果の誘起である。この現象については、理論的にも、実験的にもいろいろな研究がなされてきた。理論的には、誘起されたマイスナー領域の大きさはきれいな金属中では T^{-1} 、汚い金属中では $T^{-1/2}$ の温度依存性を示すことが De-Gennes によってしめされた。なおここでいうきれいな金属とは、金属中の電子の平均自由行程がコヒーレンス長に比べ十分長い金属のことをさし、汚い金属とはそれらの関係が逆になる物質のことである。また誘起されたマイスナー効果の実験としては、シリンダー状の超伝導物質に金属を巻き付け (図 1 参照)、巻き付けた金属の磁場に対する応答を観測するという実験が数多く行われ、上に書いた理論の結果と矛盾しない結論を得ている。これら実験で使われるサンプルの典型的な大きさは、金属の厚さが $\sim 10\mu\text{m}$ のオーダーであり、典型的な温度領域は $\sim \text{mK}$ のオーダーである。これら超伝導により誘起されたマイスナー効果についての実験は従来の理論でよく説明されていた。ところが十年程前に Mota らにより行われた実験は従来の近接効果に対する理解ではまったく説明できなかったのである。彼らは従来用いられたサンプルと同じようなサンプルを用いて磁化率をはかり図 2 のような結果を得た。ただ従来の実験と違う点は、サンプルサイズがより小さく、金属はよりきれいで、より低温領域まで温度を下げて実験をしていたことである。温度 T_c (図 2 中に定義されている。) までは温度を下げるにしたがいマイスナー効果が誘起されている。ところがさらに低い温度ではマイスナー効果が打ち消され常磁性的な振舞が見えてくるのである。この超低温において誘起された常磁性磁化率成分を $\chi_{para}(T)$ と定義する。 $\chi_{para}(T)$ は以下のような特徴を持っている。

- 常磁性成分の出現のしかたにサンプル依存性が非常にあり、ある時は金属に誘起されたマイスナー効果を完全に打ち消したり、またある時は内部の超伝導のマイスナー効果までも打ち消す大きさの常磁性を示すこともある。

- $\chi_{para}(T) \propto e^{-\frac{L}{\xi_N}}$ のような温度依存性を示す。ここで ξ_N はコヒーレンス長、 L はサンプルの外側の円周の長さである。
- 磁場のエネルギースケール、 $\hbar\omega_c$ 、は Fermi エネルギーやギャップエネルギーと比べて十分に小さい

以上3つの事実は、超伝導近接系において、温度のエネルギースケールが各エネルギーベクトルの間隔より小さくなる温度領域においては磁場による“AB-phase”の効果が非常に重要になることを示している。

そこで我々は、この“AB-phase”が超伝導近接系で電子の運動にどのような影響を2次元電子系を用いて調べることにした。モデルとしては、図3のように超伝導領域を有する有限サイズの2次元電子系を考えた。そしてこの系に様な外部磁場を印加することにより誘起される永久電流が金属中において磁場および温度をパラメータとしてどのように変化するかについて調べた。また、この永久電流により作られる磁化およびその磁化を磁場で積分することで得られる熱力学ポテンシャルを計算した。計算された、電流分布・磁化・熱力学ポテンシャルの磁場依存性を解釈するために、エネルギーベクトルの磁場依存性・超伝導ギャップ依存性を調べた。その結果次のような結論を得た。

超伝導近接効果の有無に関わらず、コヒーレンス長がシステムサイズより長くなる様な低温領域において磁化は磁場にたいして振動する。超伝導近接系においては、磁化が磁場にたいして超伝導近接効果のない場合と比べ非常に大きな振幅をもって振動し、またゼロ磁場近傍においては必ず反磁性的な磁化が磁場により誘起されることがわかった。(図4参照)システムに磁場が侵入すると AB-phase の影響で各エネルギーはシフトする。その様子を図5に載せる。絶対零度における話に限定するならば、Fermi 面をエネルギー準位が交差すると占有されていた準位は非占有準位となる。そのため系の全角運動量が急峻な変化がもたらされる結果となる。エネルギー準位が Fermi 面を交差しない限りは、磁場が増加すると反磁性的な磁化が増加するが、Fermi 面をエネルギー準位が交差するとその磁場において常磁性的な磁化が不連続な磁場依存性ととも誘起されるのである。その様子を表したのが、図6である。

以上が磁化が磁場にたいして振動する理由である。これらの話は、吉岡らや石川らによって議論された。では、なぜ超伝導近接系においては、磁化の振動が大きくなり、ゼロ磁場近傍では反磁性になるのかを以下で説明する。

超伝導近接系においては、超伝導系と常伝導系の境界条件により、ゼロ磁場においてはエネルギーベクトルにミニギャップが形成される。(図5参照)磁場の系への侵入により各エネルギー準位はシフトするが、超伝導近接効果によりエネルギーベクトルにミニギャップが開いているためにゼロ磁場近傍においては、エネルギー準位が Fermi 面を交差することができない。その結果反磁性的な磁化がゼロ磁場付近では誘起されるのである。また系全ての量子状態が一斉に反磁性的な磁化を誘起するため、大きな反磁性磁化がゼロ磁場近傍において磁場で誘起され、結果として磁化は大きな振幅とともに振動する結果となるのである。磁場が大きくなりある程度超伝導近接効果によるミニギャップが壊されてしまえば、あとは超伝導近接効果のない場合と同様の振動を磁化はするのである。

次に磁化のゼロ磁場付近での周期についても議論した。磁束がシステムに侵入してくるにつれてエネルギー準位がシフトしミニギャップが閉じていくのである。すなわち、磁化の振動の磁場に対する周期は、磁場が小さいうちはミニギャップを壊すのに必要な磁場の大きさで決まることとなる。ここで z 軸方向の角運動量方向ごとにエネルギーベクトルを観察すると、 z 軸方向の角運動量の大きな状態ほど小さな磁場でミニギャップが閉じ、 z 軸方向の角運動量の小さな状態はミニギャップが大きな磁場が印加されるまで閉じない結果となった。 z 軸方向の角運動量が大きい状態は常伝導領域に波動関数の大きな確率振幅を持つ状態であり、逆に、 z 軸方向の角運動量が小さい状態は超伝導領域に大きな確率振幅を持つ状態である。すなわち常伝導領域に大きな確率振幅を持つ状態はすぐにミニギャップが壊れ、超伝導領域に大きな確率振幅を持つ状態はミニギャップがなかなか壊れないという結果となった。以上のことを考慮すると、

- 常伝導領域の面積が大きくなれば周期は短くなる。

- ギャップエネルギーが大きくなれば周期は長くなる。

となることが予想される。これらの予想は実際に計算により確かめることができた。

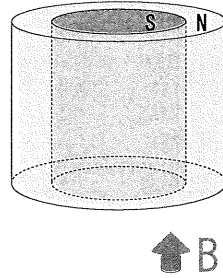


図 1: 近接系の実験で使われる、典型的なサンプル。S、N は超伝導および金属をあらわす。

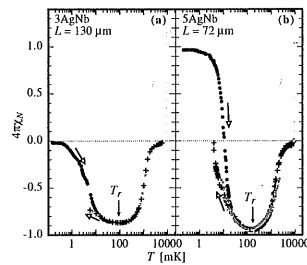


図 2: 図は金属の磁化率 $\chi_N(T)$ の温度依存性を示している。図中の矢印は温度変化の方向をあらわしている。また (+) および (•) はそれぞれ AC 磁化率および DC 磁化率に対する結果である。AgNb の前に付いている数字はサンプルの番号である。(F. Bernd Müller-Allinger and Ana Celia Mota: Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 3161 を引用)

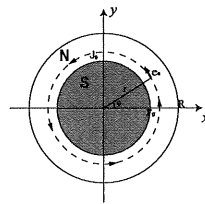


図 3: 内部に超伝導領域を持つ有限サイズの 2 次元電子系。S、N は超伝導および金属をあらわす。R はシステムの半径、 r_g は超伝導体の半径である。

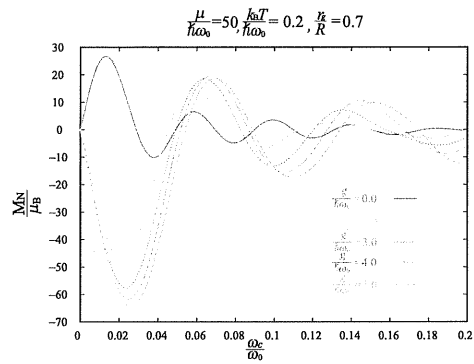


図 4: $k_B T/(\hbar\omega_0) = 0.2$ における常伝導領域の磁化の磁場依存性

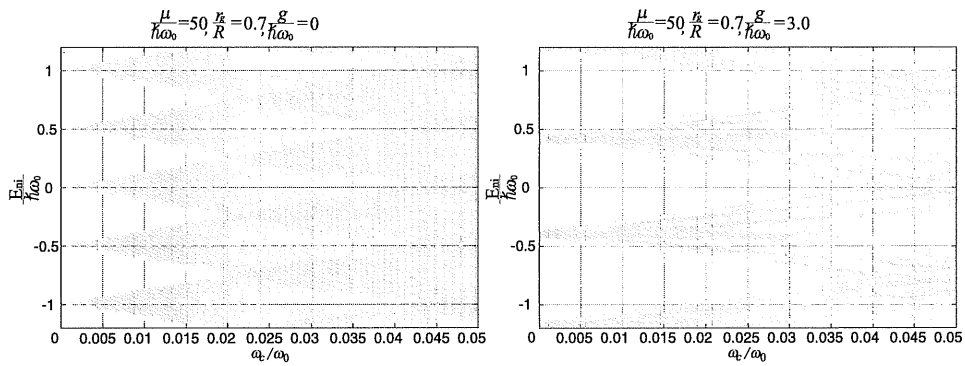


図 5: エネルギースペクトルの磁場依存性。上は超伝導近接効果がない場合で、下は超伝導近接効果がある場合である。超伝導近接効果により Fermi 面ふきんにミニギャップが形成されている。

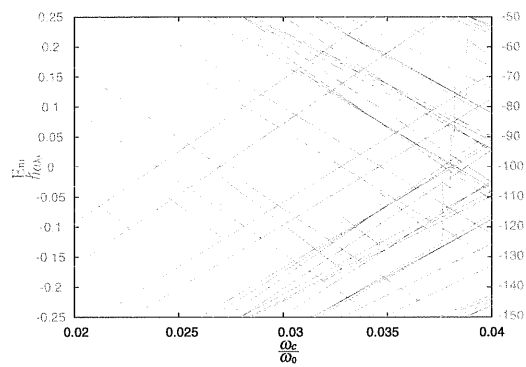


図 6: エネルギースペクトルと磁化の振動の関係。緑はエネルギーゼロの線、赤がエネルギースペクトル、青が磁化を表す。