

超伝導体の電子状態とトンネル電流

日大生産工（非常勤） ○吉田 亘克 日大生産工 山城 昌志

1 まえがき

超伝導状態は、フェルミエネルギー近傍のマクロな数の電子が対を組み、位相を揃えて1つの量子状態を占めることによって出現する状態である。マクロな数の電子が関与する現象であるが、純粋に量子力学的な状態であることから、1つの状態を占めているマクロな数の電子対の集団は波動性を持ち、巨視的波動関数によって記述される。永久電流やマイスナー効果など超伝導物質の示す特異な電磁気学的現象は、この巨視的波動性の表れなのである。巨視的波動性、すなわち巨視的量子効果は単体の超伝導体だけでなく、超伝導物質と非超伝導物質（金属、半導体、強磁性体など）との接合においても現れる。例えば、超伝導体と金属を接合したとき、超伝導体の巨視的波動関数が金属側へ染み出し、接合界面近傍の金属側も超伝導性を獲得することが知られている。この現象は、超伝導体を担う電子対の観点からは電子対が金属側へ染み出したことに他ならず、超伝導近接効果と呼ばれている。

超伝導近接効果の研究の歴史は長いが、超伝導デバイスなど応用的研究のみならず、基礎物理としても重要な課題の1つとして国内外で活発な研究が続けられている¹⁾。

2 状態密度とトンネル電流

絶対零度における自由電子モデルで記述される金属中の多電子系の基底状態は、1粒子のエネルギーの最も低い状態から、パウリの原理の従って、フェルミエネルギーまで各状態に1つずつ電子が詰まった状態である。多くの場合、金属や超伝導体などの固体が示す電磁気学特性はフェルミエネルギー近傍の電子によって説明することができる。

そのため、電子状態を調べることは固体の物性を解明する上で重要となる。固体の電子状態は、あるエネルギーにおける電子の取りえる状態の数、すなわち状態密度という量で表される。図1に示されるように、金属中の自由電子の状態密度はエネルギーの平方根に比例している。

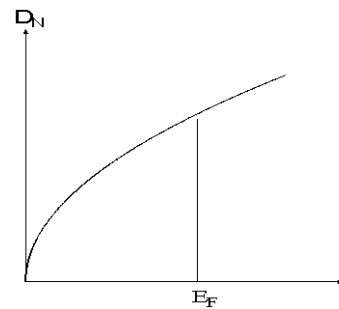


図1 自由電子の状態密度

金属状態の状態密度がエネルギーの連続的な関数であるのに対して、超伝導状態ではフェルミエネルギー近傍にエネルギーギャップ Δ が開くことになる(図2)。これは、フェルミエネルギー近傍の電子が電子対を形成して1つの量子状態を占めている結果である。

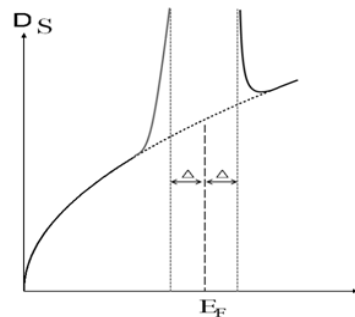


図2 金属の超伝導状態の状態密度

Density of States and Tunneling Current in Superconducting Junctions

Nobukatsu Yoshida and Masashi Ymashiro

超伝導体の状態密度は電子対の対称性を反映しており、電子対の対称性は超伝導発現機構と密接に関係している。この理由から、超伝導体の電子状態すなわち電子の状態密度を調べることは、超伝導体の基礎物理を解明する上で重要な課題となっている。そして超伝導状態の状態密度は、トンネル電流によって測定することができる²⁾。

超伝導体／非超伝導金属接合におけるトンネル電流は、界面バリアポテンシャルの高い極限では接合界面両側のそれぞれの状態密度の積に比例する。例えば、電位 V が印加された金属超伝導体／非超伝導金属接合におけるトンネル電流 $I(eV)$ は、

$$I(eV) \propto \int D_s(\epsilon - eV) D_N(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

と表される。ここで、 $D_s(\epsilon)$, $D_N(\epsilon)$ は金属超伝導体、非超伝導金属の接合界面における状態密度である。トンネル電流の電位差 V による微分は微分コンダクタンスと呼ばれ、図3に示したように超伝導体の状態密度を反映していることが分かる。

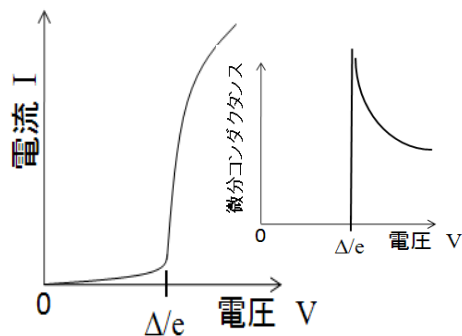


図3 トンネル電流と微分コンダクタンス

3 超伝導近接効果

接合の界面バリアポテンシャルが強い極限では、金属側の状態密度は超伝導体の影響を受けない。しかし、界面バリアポテンシャルが無い金属極限と呼ばれる接合やバリアポテンシャルの低い接合では、超伝導体の電子対が金属側に染み出す超伝導近接効果により、界面近傍の金属側の状態密度は超伝導体の影響を受けるようになる。この染み出しは数十 μm に及ぶことから、トンネル電流も多彩な振る舞いを示すようになる。一方、超伝導側では、電子対の染み出しにより、界面に近づくにつれて超伝導性が失われ、結果として超伝導体の状態密度も変調する。

近年では、微細加工技術の発展に伴い様々な接合系の作成が可能になり、超伝導近接効果は単なる電子対の染み出し現象ではなく、超伝導体に接合する物質に応じて多彩な側面を持つことが明らかになってきている³⁾。

4 モデルと計算方法

本研究では、不純物を含まないクリーンな非超伝導物質（金属あるいは強磁性体）／超伝導体接合における接合界面の電子状態とトンネル電流について、近接効果を考慮して調べる。また、非超伝導体と超伝導体ともに自由電子モデルで取り扱う。単純化したモデルではあるが、近接効果を示す巨視的波動関数の空間変化を定量的に計算することは一般的に困難な問題である。そこで我々は、この問題に最も適した理論的手法として知られる準古典グリーン関数法⁴⁾に基づき計算を行った。

5 結果

近接効果は巨視的波動関数の空間変化によって表される。金属超伝導体／金属接合における巨視的波動関数 Ψ の空間変化と金属界面の状態密度 D_N を図4に示す。

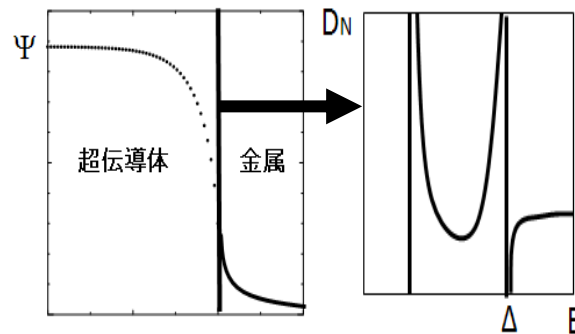


図4 超伝導体・金属接合系における巨視的波動関数の空間変化と金属界面の状態密度。

この結果から、近接効果によって界面近傍の金属は超伝導性を獲得した結果、状態密度にギャップが開いていることが分かる。

本講演では、金属超伝導体だけでなく、銅酸化物高温超伝導体や強磁性体との接合についても紹介する予定である。

「参考文献」

- 1) A.A.Golubov, M.Yu.Kupriyanov and E.I'ichev
Rev.Mod.Phys.76(2004)p.411
- 2) Y.Tanaka and S.Kashiwaya,
Phys.Rev.Lett.Vol.74.No.17(1995)p.3451
- 3) Y.Asano, Y.Tanaka and S.Kashiwaya
Phys.Rev.Lett.96(2006)p.097007
- 4) Serene.J.W and Rainer.D
Phys.Reports 101(1983) p.221