

## 準古典的グリーン関数による超伝導近接系の研究

長登 康

広島大学大学院生物圏科学研究科

## Theoretical study of superconducting proximity-contact systems by use of the quasi-classical Green's function

Yasushi NAGATO

Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University  
Higashi-Hiroshima 724, Japan

## 要 旨

不純物の少ない所謂クリーンな超伝導近接系に対する準古典的グリーン関数を定式化し、幾つかの近接系に対しこのグリーン関数を用いて超伝導近接効果を議論した。

超伝導金属に接合した常伝導金属は、超伝導体中のクーパー対が常伝導体中に浸み出す所謂近接効果によって、超伝導的性質を持つことが知られている。近年の微細加工技術の進歩により、平均自由行程に比べて十分小さな系つまりクリーンな系での実験が可能となった。このような系を理論的に扱う場合、接合面での境界条件を正しく取り入れて超伝導体を特徴づける対ポテンシャルの空間変化を考慮しなければならない。これまでのクリーンな近接系に対する理論的研究の多くは理想的な近接系を扱ったものであった。つまり、対ポテンシャルは空間的に一定であると仮定し、接合境界での反射は無視されてきた。しかし、たとえ接合境界で波動関数が滑らかに繋がっていても、電子の有効質量が異なっていれば、この境界は有限の反射率を持つ。現実の系では接合面での電子の反射は重要で無視することはできない。

対ポテンシャルの空間変化の理論的な取り扱いとして、Eilenberger ら(1)(2)によって準古典的グリーン関数法が提案され、境界面での反射は Zaitsev (3) によって得られた境界条件により取り入れることが可能である。しかしながら、この従来の方法では、準古典的グリーン関数の従う方程式を数値的に解くしかなく、境界条件を数値的な段階で考慮する為に計算時間も長く、十分信頼できる結果を得るのは非常に難しいものであった。一方、Ashida ら(4)は、従来の方法とは別の方法で、有限幅の超伝導 2 層膜に対する準古典的グリーン関数を導出した。Ashida らによって導出された準古典的グリーン関数は、既に境界条件を満たしている。このため、従来の方法と違って数値的取り扱いに遥かに優れ、更に解析的な議論も行いやすい利点を持つ。本論文では、まずこの Ashida らによる準古典的グリーン関数を拡張し、無限幅の層を持つ近接系の準古典的グリーン関数の形式解を導出する。この方法によって、様々な接合系における self-consistent な対ポテンシャルを効率

的に求めることが可能となった。この新しい方法を用いて、以下の3つのテーマについて議論する。

さて、常伝導体と超伝導体の接合面では、電子が正孔として反射される所謂アンドレーエフ反射が知られている。このアンドレーエフ反射は超伝導体を特徴づける対ポテンシャルの情報を持つため、これを観測する実験が行われている。その方法のひとつとして、超伝導体に接合された常伝導層に反対側から針状の電極を接合したポイントコンタクト装置での実験が挙げられる。針状電極から常伝導層へ入射された電子は、常伝導-超伝導境界でアンドレーエフ反射された正孔として針状電極へ戻ってくる。正孔は正の電荷を持つため、このアンドレーエフ反射は微分コンダクタンスの増加として観測される。このポイントコンタクト装置に対し、これまでの多くの理論は、self-consistent な対ポテンシャルは用いず、また境界の反射率も部分的にしか考慮されていなかった。現実の系を議論する為には、self-consistent な対ポテンシャルを用いると共に、針状電極と常伝導体間の有限の反射、常伝導体と超伝導体の間の反射を考慮する必要がある。針状電極と常伝導層の間、常伝導層と超伝導体の間に有限の反射率を考慮すると、常伝導層内での多重反射によってアンドレーエフ反射のエネルギー依存性に何らかの構造が現れる可能性がある。これが本論文の第1のテーマである。

超伝導体に接合された有限幅の常伝導層は、超伝導体の対ポテンシャルよりも低いエネルギー領域に束縛状態 (de Gennes-Saint-James 束縛状態) を持つことが知られている。近年、STMによって局所状態密度の測定が可能となった。このSTMによる測定では状態密度の場所依存性についての情報も得られる。超伝導-常伝導-超伝導の系に対してこのSTMを用いた測定がなされており、常伝導層の状態密度が、エネルギーギャップ的なものを持ち、場所に依存している結果が報告されている。この問題が本論文の第2のテーマである。

重い電子系の超伝導体は従来の超伝導体とは対ポテンシャルの対称性が異なると考えられている。このため対称性の異なる超伝導の接合系が実現可能である。この時、異種超伝導間の近接効果はどうなるのか、また超伝導電流を流した時、従来のジョセフソン効果と同様な効果が見られるのかも興味のある問題であり、3番目のテーマとして論じる。

本論文では、以上の様な近接系を理論的に議論する為、両側の層が無限の幅を持ちその間に有限幅の層を持つ3層膜の系に対する準古典的グリーン関数の形式解を求めた。まず、Ashidaらの方法に従い有限幅の3層膜の準古典的グリーン関数の形式解を導出した。その形式解に対し、両側の層の膜厚を無限にする極限操作を行い、求めるべき両側無限の3層膜系に対する準古典的グリーン関数を導出した(5)。この形式解は、既に境界条件を満たしており、従来の準古典的グリーン関数法に比べ数値計算を行う上で取り扱いやすく計算精度も高い。また、数値計算によらずに、一般的な性質を議論することが出来る。

この準古典的グリーン関数を用い第1のテーマであるポイントコンタクト装置に対応した常伝導-常伝導-超伝導の系におけるアンドレーエフ反射を議論した。常伝導-常伝導の境界、常伝導-超伝導の境界に有限の反射率を考慮し、準古典的グリーン関数を用い数値計算によって自己無撞着な対ポテンシャルを求め、その対ポテンシャルを用いてアンドレーエフ反射係数を計算した。有限の反射率を考慮したことで、これまでに議論されてきた常伝導-超伝導両無限2層系には見られない2つの peak を持つアンドレーエフ反射が見出された。これは常伝導層での電子と正孔の多重反射によって現れたもので、ここで考えられた系と同様な実験系に於いて2つの peak を持つアンドレーエフ反射が検出され得ることが示された。

次に2つ目のテーマの超伝導体に挟まれた常伝導層の状態密度を議論した。STMに於いて測定

される状態密度は、フェルミ運動量の全ての方向について平均された状態密度 (total density of states) と考えられている。そこで準古典的グリーン関数によって自己無撞着な対ポテンシャルを求め、これを用い total density of states を計算した。常伝導-超伝導の境界に有限の反射率を考慮したことにより de Gennes-Saint-James 束縛状態が幅を持ち、又、常伝導層に対相互作用を考慮することにより常伝導層の状態密度が場所に依存することが示された。また、常伝導層に考慮した対相互作用が何であれ零エネルギーでの状態密度は零であることが一般的に示された。

最後に、対称性の異なる s-wave と d-wave 超伝導体の両無限 2 層系を議論した。d-wave 超伝導体が s-wave 対振幅を持つと、片側が常伝導層である時に比べ浸み出しが抑えられることが示された。更に、超伝導電流の流れている時の対ポテンシャルを自己無撞着に求めた。よく知られた s-wave 超伝導体間のジョセフソン接合系に於いて、超伝導電流は、転移温度近傍で対ポテンシャルの絶対値の 2 乗に位相の空間微分を乗じたものに比例し、低温での振る舞いもほぼそれで理解される。しかし、s-wave と d-wave 超伝導接合系では境界近傍で、s-wave 超伝導体のジョセフソン接合系と全く異なった振る舞いを示すことが分かった。例えば、境界付近で対ポテンシャルの位相の空間微分の符号が反転する結果が得られた。この結果は対ポテンシャルを self-consistent に扱うことによって初めて得られたものである。

## 参 考 文 献

- (1) G. Eilenberger, Z. Phys. 214, 195 (1968)
- (2) A. I. Larkin and Yu. N. Ovchinnikov, Zh. Eksp. Theo. Fiz. 55, 2262 (1968) [Soviet Phys.-JETP28, 1200 (1969)]
- (3) A. V. Zaitsev, Zh. Eksp, Teor. Fiz. 86, 1742 (1984) [Soviet Phys.-JETP59, 1015 (1984)]
- (4) M. Ashida, S. Aoyama, J. Hara and K. Nagai, Phys. Rev. B40, 8673 (1989)
- (5) Y. Nagato, K. Nagai and J. Hara, J. Low Temp. Phys. 93, 33 (1993)