

## 超伝導体・磁性体接合系における伝導現象の理論的研究

日大生産工 ○吉田亘克、山城昌志

## 1 まえがき

近年の微細加工技術の発展に伴い、互いに排他的な状態である超伝導体と強磁性体のハイブリット構造が作成されるようになり、超伝導体や強磁性体の物理だけでなく、次世代デバイスとして大きな期待が寄せられているスピントロニクスの研究も盛んに行われるようになってきた。

本報告では、超伝導体・強磁性体接合系の基本的な伝導特性について報告する。

## 2 超伝導体の対称性

金属の電磁気学的特性を担うのは、金属中を自由に動き回る自由電子達である。自由電子は電荷 $-e$ 、スピン $1/2$ のFermionであることから、電子を最低状態から順に詰めていった状態が金属の基底状態となり、Fermi面を形成する。より厳密には、金属の電磁気学的特性はFermi面近傍の自由電子達によって左右される。Fermi面近傍の互いに逆向きの波数とスピンを持った2電子間に引力相互作用が働いたとき、2つの電子は互いに束縛し合いCooper対という準粒子になる。Cooper対は2つのFermionから成るため統計性がBosonとなり、1つの最低エネルギー状態に“位相”を揃えながら多くのCooper対が落ち込むことで、金属の基底状態よりもエネルギーの低い、超伝導状態へと転移する。超伝導状態はCooper対の位相が揃った秩序状態であり、秩序関数によって記述される。

秩序関数は2電子間の引力相互作用に起因していることから超伝導エネルギーギャップと比例関係にあり、引力相互作用の種類によってその対称性が決定し、一般的に電子間の相対運動量 $p$ の関数で表される。例えば、フォノンを媒介にした引力相互作用によるBCS超伝導体では、秩序関数は電子間の相対運動量に依らない一定値のs波対称性を持つ。代表的な超伝導体の対称性と秩序関数 $\Delta$ を表1にまとめる。

表1 超伝導秩序関数の対称性

超伝導体	対称性	秩序関数
BCS	s波	$\Delta$
銅酸化物	d波	$\Delta(p_x^2 - p_y^2)$
$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$	p波	$\Delta(p_x \pm ip_y)$

## 3 Andreev反射

金属と超伝導体の接合界面では、金属中からの入射電子は逆向きの波数とスピンを持った電子と結合して、Cooper対となって超伝導体に侵入することができる。対形成の結果と

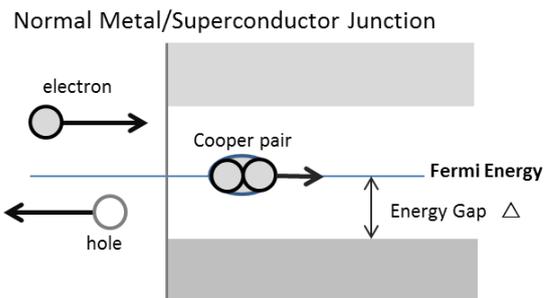


図1：金属／超伝導体接合におけるAndreev反射。接合界面のバリアがない場合の散乱過程の様子。

して生成されるホールは、入射電子の軌道を逆向きに辿る遡及性を持つ。この電子が入射してホールが反射される現象は、Andreev反射<sup>1)</sup>と呼ばれる。強磁性体とシングレット超伝導体の接合系では、強磁性体中の交換ポテンシャルによって、Andreev反射は強く変更を受けることになる<sup>2-4)</sup>。

Theory of Transport Phenomena  
In Superconductor/Ferromagnet Junctions

Nobukatsu Yoshida and Masashi Yamashiro

#### 4 強磁性体・超伝導体接合系

強磁性体中におけるAndreev反射の変更は強磁性体の交換ポテンシャルによる、上向きと下向きスピンの数の違いに起因する。そのため、強磁性体中からのある角度の入射に対しては、Andreev反射粒子は減衰波となり、

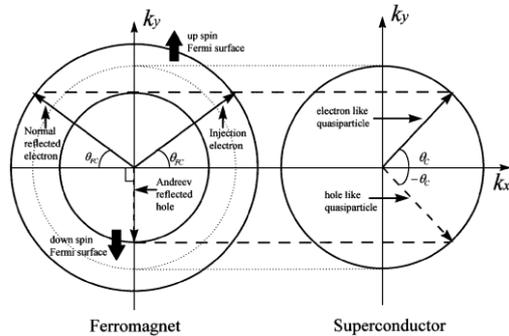


図2: Fermi面効果。強磁性体の交換ポテンシャルによって決定する臨界角以上の入射波に対しては、Andreev反射は減衰波となる。

結果として伝導現象には寄与しない(図2)。他方、超伝導体にはCooper対を構成する電子のスピンの向きが同じ向きのトリプレット超伝導体が存在する。図3に強磁性体・トリプレット超伝導体接合系の微分コンダクタンスの計算結果を示した。トリプレット超伝導体の対称性は、

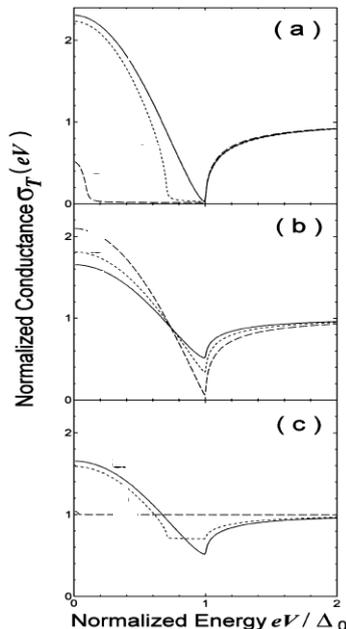


図3: トンネル極限における微分コンダクタンスの交換ポテンシャル依存性; (a):ユニタリー状態, (b):非ユニタリー状態、(c)非ユニタリー状態に対して磁化が反平行の場合。

(a)ユニタリー状態と(b),(c)非ユニタリー状態を選択した。ユニタリー状態では、Cooper対を構成する電子のスピンは互いに反平行であり、非ユニタリー状態では平行となる。ユニタリー状態では、Andreev反射により流れる低エネルギー領域の微分コンダクタンスが交換ポテンシャルの増加に伴い強く抑制されていることが分かる。これに対して、非ユニタリー状態の微分コンダクタンス特性は、強磁性体の磁化方向とCooper対のスピンの向きが平行な場合(b)と(c)反平行で異なる。磁化とCooper対のスピンの向きが平行な場合(b)コンダクタンス特性は交換ポテンシャルの影響をあまり受けない。これはAndreev反射粒子のスピンの向きが磁化方向と同じ方向であるため、強磁性体中に占有可能な状態が存在するからである。逆に磁化とCooper対スピンの向きが反平行な場合(c)、Andreev反射粒子は交換ポテンシャルの増加に伴い減衰波となり消滅してしまい、結果としてコンダクタンス特性は磁化と平行なスピンを持つ電子による常磁性金属のトンネル電流に近づいていく。

#### 5 まとめ

強磁性体・超伝導体接合系のコンダクタンス特性は、磁性体の交換エネルギーや超伝導体対称性を強く反映する。この性質は、強磁性体の磁化率あるいは超伝導体の対称性の測定、新しいタイプのプローブとして利用が期待される。

#### 「参考文献」

- 1) A. F. Andreev: Zh. Eksp.Teor.Fiz. 46 (1964) 1823 [Sov. Phys. JETP 19 (1964) 1228].
- 2) M.J. de Jong and C.W.J. Beenakker: Phys. Rev. Lett.74(1995) 1657.
- 3) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, N.Yoshida, and M. R. Beasley: Phys. Rev B 60 3572(1999), I. Zutic and O.T. Valls: Phys. Rev B 60 6320(1999),
- (4) N. Yoshida, Y.Tanaka, J.Inoue and S.Kashiwaya: J.Phys.Soc.Jpn 68 1071(1999)