

交替磁性体を用いたトポロジカル超伝導体分光法

[1] 要旨

近年、強磁性体・反強磁性体に続く第3の磁性体として交替磁性体が注目されている。 p 波交替磁性体を用いたトポロジカル超伝導体の新しい分光法が提案された。2次元非従来型超伝導体においては超伝導体表面にトポロジカル起源のエッジ状態が存在することが知られていた。一方、 p 波交替磁性体のスピン状態の分裂によりフェルミ面を平行移動することでコンダクタンスに寄与する波数の領域を制御することができる。 p 波交替磁性体と様々な対称性をもつ非従来型超伝導体との接合の微分コンダクタンスを求めることで、エッジ状態の運動量依存性に関するより詳しい情報が求められ、エッジ状態の特定に有用な役割を果たすことが明らかになった。

[2] 本文

一般にスピンの向きが偏極する磁性状態と従来型超伝導であるスピン1重項超伝導は互いに競合する概念として考えられていたが、強磁性体と超伝導体の接合においては、強磁性体中に浸入した電子対の空間的振動や、バルクでは存在しない新奇な電子対である奇周波数電子対の存在が指摘されるなど強磁性体・超伝導体接合の研究は活発に行われている。さらに、近年のスピントロニクスの研究の発展により、超伝導スピントロニクスという分野も生まれている。

一方、スピン1重項 d 波やスピン3重項 p 波超伝導体のような非従来型超伝導体では、表面にエッジ状態が形成され（表面アンドレーエフ束縛状態とも呼ばれる）、これは常伝導体との接合のトンネル効果においてその存在が確認されている。例えば、 d 波超伝導体である銅酸化物超伝導体では(110)面においては、フラットバンドゼロエネルギー状態が形成され(図1左)、常伝導体との接合で共鳴的に増大するアンドレーエフ反射（電子がホールとして反射される過程）のために、トンネル分光でゼロ電圧ピークとして観測されることが知られている。一方エッジ状態には、カイラル p 波超伝導体のように、線形の分散関係があるタイプも存在する(図1右)。また、強磁性体・非従来型超伝導体接合の研究により磁性体の交換相互作用がスピン1重項超伝導体に対してはアンドレーエフ反射を抑制することも知られている。

近年、強磁性体・反強磁性体に続く第3の磁性体として交替磁性体が注目されている。交替磁性体は、反強磁性体のように交替的なスピン配置を持ちながら逆格子空間では波数に依存した強磁性体的なスピン分極を有する。交替磁性体として d 波対称性をもつ交替磁性体の研究が盛んに行われ、トンネル効果やジョセフソン効果の研究が始まってい

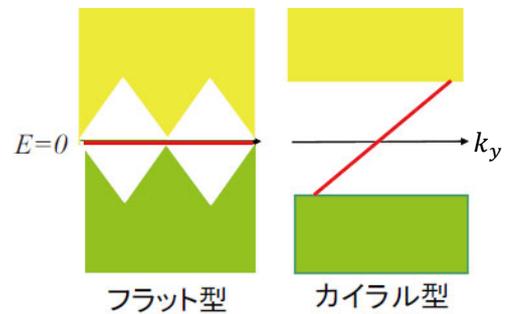


図1 アンドレーエフ束縛状態の典型的な例

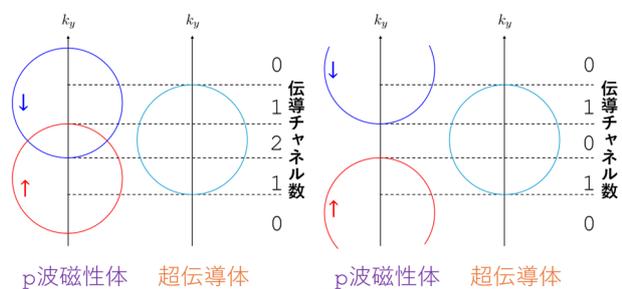


図2 波数ごとの伝導チャネルの数。左がスピン分裂が小さい場合。右が大きい場合。スピン分裂したフェルミ面が完全に分離した場合、 $k_y = 0$ 付近ではアンドレーエフ反射は抑制される。

る。

このような背景の中で、今回、名古屋大学と天津大学の研究グループは、 p 波対称性を持つ交替磁性体と非従来型超伝導体との接合の理論を提案した。 p 波交替磁性体では図2に示すようにフェルミ面がスピン分裂することが期待される。この接合でアンドレーエフ反射(AR)が伝導に寄与するためには、 p 波交替磁性体側と超伝導体側の両方に対応するフェルミ面が存在することが必要である。従って、 p 波磁性体のフェルミ面のスピン分裂が大きい場合は、接合界面に平行な方向(y 方向)の波数 k_y ごとに通常2つずつ存在する伝導チャンネルの数が1つしか存在しない範囲が現れる。特に、 p 波交替磁性体側のスピン分裂したフェルミ面が完全に分離した場合、 $k_y = 0$ 付近ではARが消失する。その結果、線形分散をもつカイラル p 波超伝導体のトンネルコンダクタンスにおける零電圧付近の抑制が顕著に現れる。

図3は常伝導体・カイラル p 波超伝導体接合の微分コンダクタンスを、ボゴリューボフ・ドジャヤン方程式に基づいて散乱問題を解析することで得られた計算結果を示したものである。スピン分裂が大きくなり、 p 波交替磁性体のフェルミ面が完全に分離するようになると、 $k_y = 0$ 近傍のアンドレーエフ反射が存在しなくなり、アンドレーエフ束縛状態がコンダクタンスに寄与しないために、零電圧近傍におけるコンダクタンスが著しく減少する。これは p 波磁性体のトンネル効果に寄与できるチャンネルが制御できることを意味するものである。以上のように交替磁性体を用いることで、従来のトンネル分光よりもアンドレーエフ束縛状態の分散関係の情報をより多く引き出すことができることを示した。これらの結果は、様々な表面アンドレーエフ束縛状態の分散を持つトポロジカル超伝導体の対称性の決定に将来資するものであるといえる。

この成果はJPSJの2024年11月号に掲載された。

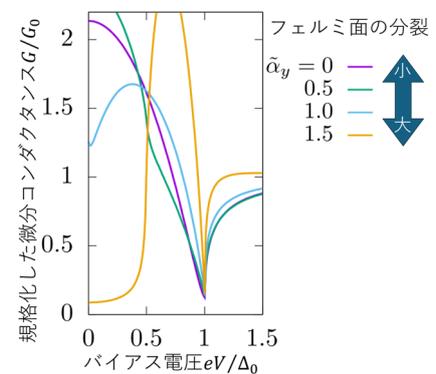


図3 p 波交替磁性体・カイラル p 波超伝導体接合の微分コンダクタンス。 $\tilde{\alpha}_y$ はスピン分裂の強さを表すパラメータ。

原論文 (2024年10月23日公開済)

Theory of Tunneling Spectroscopy in Unconventional p -Wave Magnet-Superconductor Hybrid Structures

K. Maeda, B. Lu, K. Yada, and Y. Tanaka, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 114703 (2024).

<情報提供：前田知輝 (名古屋大学大学院工学研究科)
矢田圭司 (名古屋大学大学院工学研究科)
田仲由喜夫 (名古屋大学大学院工学研究科) >