

超伝導デバイス物理ラボ

(Superconducting Device Physics Lab.)

研究項目：超伝導表面・界面における電子状態と位相接続の研究
研究期間：平成9年度～13年度

1. 研究の背景

電子デバイスにおける情報の伝達は、従来は電流や電圧といったマクロな統計量に基づく手段が用いられる場合が主であった。しかし近年の電子技術の微細化の流れの中で、電子の持つ位相情報の重要性が認識され、位相を利用したメゾスコピックデバイスが多数提案されるに至った。その一方、超伝導体ではマクロな数の電子がボーズ凝縮した状態が実現しており、多数の電子がコヒーレントな運動をするため、マクロな位相が定義される。超伝導体と正常金属の両者を含む系においては、超伝導体のマクロな位相と、準粒子の持つミクロな位相がアンデレーフ反射を介して干渉し合い、界面に全く新しい現象が現れる。さらに近年発見されたd波超伝導体の場合、運動量空間内で位相が符号変化を起こすため、表面では新しい干渉効果が現れる。これらの界面現象の理解が非常に重要であるのは、導電体を情報処理または情報伝達デバイスとして用いる際にはあらゆる信号伝達は界面を介して行われるためであり、これらの現象の裏にユニバーサルに存在する問題は、表面界面における位相の接続条件である。本研究では超伝導体表面、超伝導体・金属または半導体などの表面・界面における位相の接続特性、機構を実験理論両面から明らかにする。また超伝導体表面界面の状態をトンネル効果実験・理論を通して明らかにする事で、高温超伝導体素子の超伝導起源にせまる事を目的としている。

2. 研究経過と現状

酸化物超伝導体のホールドープ側に関しては、すでに1994年のパイ接合の実験によりd波対称性を持つ超伝導が実現していることがかなり確実だと考えられていた。一方トンネル分光で有効な情報を得るためには、Cu-O面内の分光が必要であるという立場から、我々は

YBCOの面内トンネル分光を測定していたが、ゼロバイアスアノマリーが非常に再現性良く、しかも面方位に依存して観察できることを発見した。この結果は従来知られていた、超伝導体ではギャップが観察されるべきであるという常識から大きく外れており、d波超伝導体でのトンネル効果を根幹から考え直す必要性を示唆した。この結果を基に異方的超伝導体のトンネル分光の理論的解析を始めた。具体的にはBTK表式と言われるs波超伝導体への表式にペアポテンシャルの異方性を導入し、d波超伝導体に対するBTK表式を作成した。その結果、従来ペアの位相を感知しないと信じられてきたトンネル分光が、実はペアの位相にセンシティブであることを理論的に証明できた。これは正常金属側から準粒子の入射に対して、超伝導体中で2種類の準粒子が関与するためであり、その2種類の準粒子の感じる実効的なペアポテンシャルとその位相差が、トンネル電流に極めて重要な干渉効果を示すことに対応する。この効果が最も顕著に現れるのは、d波超伝導体においてノード方向に垂直な界面を作った場合のトンネル分光であり、強いゼロピークが現れることが表式から明らかになった。さらにこのピークは表面にできた束縛状態であること、トンネルスペクトルはバリアーの高い極限において、この表面の状態密度に完全に一致することなどを示すことができた。

この理論解析結果を新しい指針として、面内のトンネル分光実験を系統的に開始した。まずYBCOに関しては、薄膜作成および表面処理グループと共同研究を行うことで、高品質なYBCOの(100)(110)(001)面の測定を行い、系統的に膜の品質とスペクトルを比較することで(110)面では空間的に連続したゼロバイアスピークが観察可能であることを確認した。(100)面でのスペクトルを詳細に解析し、確かにdx²-y²対称性とコンシステントな結果を得ることを確認できた。一方エレクトロンドープ超伝導体でもこの手法により面方位を変えながら測定を行い、2000本以上のスペク

トルを測定し、いかなる方向にもゼロバイアス異常が現れないことを示した。この結果は最近のIBMのトリクリスタルの結果と食い違うため、ドープ量を変えた新しい実験を行う準備をしている。

この異方的超伝導体の界面効果は、スピン三重項超伝導体 DC, AC ジョセフソン効果に拡張して、多くの新奇な特性を予言している。現在我々も含めて、世界中の実験グループで、これらの理論と実験の対応を検証中である。

遷移金属酸化物は高温超伝導に加えて、強磁性、強誘電性など様々な電子相を持つことが明らかになっている。これらの電子状態の研究は日本のみならず世界中でなされている。その一方、これらを組み合わせた接合構造で新しい機能実現を行ったり、新しい物理的情報を得ようとする動きも出てきた。我々は基礎応用の両面の観点から、YBCOとLSMO接合の研究を開始した。基礎面ではスピン偏極電子を注入された非平衡状態の超伝導、スピンに依存した輸送現象の検証等であり、応用面では超伝導エレクトロニクスにスピントロニクスの概念を導入し、超伝導エレクトロニクスに新しいブレークスルーをもたらそうというものである。スピン偏極したトンネル分光とジョセフソン接合の理論に引き続き、実際のYBCO/LSMO接合を作成、極低温下での測定を行っている。その結果、界面では磁気ポテンシャルが誘起されていること、酸化物超伝導体では高い精度で時間反転対称性が起こっていないことを確認でき、また印可磁場に対してゼーマン分裂を示さないことがわかった。またスピン偏極準粒子注入に対して J_c が増加するという実験結果を得られており、酸化物超伝導体は非平衡状態も金属超伝導とは異なる性質が有る事を示した。この実験は現在も継続中である。

3. 波及効果

本研究に基づいてd波超伝導体の界面効果が明確になった。現在デバイス構造を作成し、新しい機能実現を図る研究も進められている。特に超伝導と強磁性の接合に関しては、スイッチ、メモリー等の応用も提案されている。

4. 今後の研究展開の方向

電子状態研究において、トンネル分光は他の分光手法と比べて多くの長所が存在する。STMは特に原子オーダーの実空間分解能を持つなど、極めて強力な解析手法である。その一方、酸化物超伝導体のような表面が劣化しやすいサンプルに関しては、表面敏感すぎるため、サンプルプレパレーション等、多くの問題も有る。また真の原子オーダー空間分解能を実現するためには、いまだ技術的に解決すべき問題が多く存在する。現在までに極低温超高真空装置は低温部の粗動が完成するなど、顕著な進展を見たが、酸化物超伝導体の原子オーダーでのトポとの対応や、空間揺らぎを含めたSTS測定を実現するには至っておらず、これらは重要な課題として残っている。さらに、強相関電子系ではいかなる物理量が観測量となっているかが自明でないため、相補的な情報を得る意味でも、薄膜型のトンネル接合、XPS、赤外吸収スペクトル等との密接な比較が必要と考えられる。現在までにこれらの比較実験に関して、実験的な制限に関しては解決のめどが立っているので、今後は実際にエレクトロンドープ系超伝導体等を対象サンプルとして、各種分光データを結び付ける作業を行いたい。これにより強相関系の電子状態研究に新たなページを開けるように願っている。

当該研究担当者等

1) ラボ構成員(総数6名)

職員(2名) 小柳正男(電子基礎部)、柏谷 聡*(基礎計測部)

職員以外(4名) 上野滋弘(筑波大学連携大学院)、田仲由喜夫(名古屋大学助教授)、柏谷裕美、松原礼高

2) その他の研究協力者

澤 彰仁(極限技術部)

*ラボリーダー