

課題名 (タイトル) :

## 超伝導/超流動における準粒子励起

利用者氏名 : 堤 康雅

所属 : 古崎物性理論研究室

## 1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

超伝導体/超流動体で実現しているギャップ関数を同定する手法として、低エネルギー準粒子励起を熱力学量や輸送特性を通して観測することが非常に有効である。例えば、フルギャップの超伝導体では低温での電子比熱係数の温度依存性は指数関数で記述される。一方で、ポイントノードやラインノードが存在する場合には、電子比熱係数の低温依存性はそれぞれ温度の二乗、温度に線形となる。

また、磁場中では磁束渦糸周りの超伝導電流により、準粒子エネルギーがドップラーシフトし、ノード近傍で準粒子が励起されやすくなる。フルギャップ超伝導体では、電子比熱係数は磁場の大きさに比例するが、ノードがある場合には磁場の平方根に比例しており、低磁場で電子比熱係数の急激な増大が観測される。

さらに、磁場方向を変化させて電子比熱係数を測定することで、ノードの位置も原理的には同定することができる。磁束渦糸周りの超伝導電流は磁場と垂直に流れるので、磁場をノードと垂直にかけた場合には、ノード上の準粒子運動量の向きと超伝導電流の向きが平行になり、ドップラーシフトが大きくなるため、ノード近傍の準粒子が励起されやすい。一方で、磁場とノードの方向が一致しているとノード上の準粒子はドップラーシフトを受けない。このため、低磁場領域ではノード方向に磁場をかけた際に、電子比熱係数が最小値をとると期待される。高磁場領域では、ノード方向が小さな上部臨界磁場を示すため、ノード方向に磁場をかけた際に電子比熱係数が最大値となる。つまり、磁場を増加させるとノード方向の磁場に対して最小値を示していた電子比熱係数が最大値へと変化して、磁場方向に対する比熱振

動の逆転が起こる。

しかし、実際の超伝導体ではフェルミ速度に異方性があるため、観測量からいかにギャップノードの情報を引き出すかが問題となる。正方晶や六方晶の超伝導体では、 $ab$  面内のフェルミ速度の異方性は比較的小さいため、縦ラインノードの位置を同定することには成功している。一方で、 $ac$  面でのフェルミ速度の異方性は大きいので、回転磁場中での比熱測定から、水平ラインノードやポイントノードの位置を同定することは難しいと考えられていた。

本研究では、電子比熱係数に比例する準粒子のゼロエネルギー状態密度の磁場方向依存性を計算し、超伝導体で観測された比熱や熱伝導率と比較することで、未知のギャップ関数を同定することが目的である。特に、これまではほとんど行われてこなかった、磁場を  $c$  軸から  $ab$  面へ傾ける実験を想定し、新たなギャップ関数の決定手法の確立を目指す。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

まずはギャップ関数を仮定して準古典 Eilenberger 方程式を解くことで、渦糸格子状態での秩序変数と松原形式の準古典グリーン関数を自己無撞着に求める。松原グリーン関数を解析接続することで、遅延グリーン関数を導出し、準粒子のゼロエネルギー状態密度を計算する。状態密度の僅かな磁場方向依存性を明らかにする必要があるため、解析接続で用いる収束因子を小さくした精度の高い数値計算が必要である。この計算は、Runge-Kutta 法により Riccati 形式の微分方程式を解くことで実行した。この際、MPI を用いた並列化を行い計算時間の短縮を図った。

## 3. 結果

ゼロエネルギー状態密度の最大値を与える磁場角度がアンチノード方向からノード方向へと移り変わる磁場領域に注目すると、ゼロエネルギー状態密度の磁場角度依存性に以下の 2 点の特徴的な振る舞いが見られることが明らかとなった。

(1)ゼロエネルギー状態密度が最大値を示す磁場角度は、磁場の増加とともにアンチノード方向から連続的に変化し、高磁場領域でのノード方向へと繋がる。

(2)この磁場領域では、ゼロエネルギー状態密度が極小となるのは、ノード方向に磁場をかけたときではなく、磁場をノードから少し傾けたときである。

これらの振る舞いは、フェルミ速度に異方性がある場合や、ポイントノードとラインノードが共存する場合にも現れる。

## 4. まとめ

磁場を c 軸から ab 面へ傾ける際のゼロエネルギー状態密度の角度依存性を様々なギャップ関数について計算した。ゼロエネルギー状態密度の最大値を与える磁場角度は磁場の増加に伴ってアンチノード方向からノード方向へ連続的に変化し、極小を与える磁場角度もノード方向からわずかにずれることが明らかとなった。これらの振る舞いはフェルミ速度に異方性がある場合にも現れるので、ギャップノードの位置を同定するための回転磁場中の比熱測定は、正方晶や六方晶の超伝導体に対しても有効である。

## 5. 今後の計画・展望

現在、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のラインノードの有無を明らかにするため実験グループとの共同研究を行っている。これまで行われてきた熱力学量や輸送特性に関する実験結果の多くは、ラインノードが存在することを示唆しているが、決定的な証拠を与えるまでには到っていない。層状ペロブスカイト構

造である  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  はフェルミ速度の異方性が非常に大きいですが、本研究で明らかにした特徴はフェルミ速度の異方性に依らず現れる。ab 面内、ac 面内の回転磁場中での比熱測定結果と、ゼロエネルギー状態密度の数値計算結果を比較することで、ラインノードの存在を位置も含めて突き止めたいたいと考えている。

平成 28 年度 利用研究成果リスト

**【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】**

Y. Tsutsumi, T. Nomoto, H. Ikeda, and K. Machida, “Nodal gap detection through polar angle-resolved density of states measurements in uniaxial superconductors”, *Physical Review B*, **94**, 224503 (Dec. 2016).