

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

理研での所属研究室名 : 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には、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有効である。例えば、フルギャップの超伝導体では電子比熱係数は低温で指数関数的に減少する。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、低温での電子比熱係数はそれぞれ温度の二乗、温度に比例する。

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、ノード近傍の準粒子励起が支配的となる低磁場領域では、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。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。ここで、準粒子

が受けるドップラーシフトの大きさは、フェルミ速度の大きさにも比例しているため、フェルミ面の異方性も比熱振動に影響を与えることに注意する必要がある。

s 波超伝導体以外の異方的超伝導体では、超伝導対称性が完全には明らかになっていない物質が数多くある。カイラル p 波超伝導体と考えられている Sr_2RuO_4 もそのような超伝導体の一つである。熱力学量や輸送特性の低温での温度依存性から Sr_2RuO_4 にはラインノードが存在すると考えられるが、その位置は特定されていない。私は Sr_2RuO_4 のラインノードの位置を決定するため、実験グループとの共同研究を進めてきた。磁場中比熱の測定結果からノード構造を決定することを試みたが、磁場を c 軸方向にかけた場合には、磁束のピン止め効果が強く、ノード構造を議論するのは難しいことが分かった。そこで本研究では、磁場を ab 面内にかけて際の低温比熱の振る舞いを考察することで、 Sr_2RuO_4 のノード構造を同定した。

ab 面内での磁場中比熱を測定すると、磁場方向に対して 4 回対称な振動が観測された。磁場の大きさに関しては、比熱振動の振幅の符号はほとんどの磁場領域で変化せず、上部臨界磁場近傍で急激に振幅が減少して符号を変える様子が観測された。4 回対称な振動の原因としては、垂直ラインノードを持つ 4 回対称なギャップ関数を反映していることが考えられるが、このようなギャップ関数の下では、振動振幅の符号は比較的低磁場で逆転することが知られており、実験結果とは整合しない。

本研究では、水平ラインノードが存在すれば、正方晶である Sr_2RuO_4 のフェルミ面の異方性が、4 回対称な比熱振動として現れることを示した。

2. 具体的な利用内容、計算方法

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、実験結果と整合する振る舞いを示すかどうかを調べた。まずはギャップ関数とフェルミ速度を仮定して準古典 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 と OpenMP を用いた並列化を行い計算時間の短縮を図った。

3. 結果

水平ラインノードの存在と 4 回対称なフェルミ速度の異方性を仮定することで、 ab 面内の磁場方向に対してゼロエネルギー状態密度が 4 回対称な振動を示すことを示した。振動振幅の磁場依存性に関しても、振幅の符号が磁場の増加で逆転せず、実験結果と一致している。4 回振動の定性的な振る舞いが、フェルミ速度の異方性の大きさに依らないことも確認できた。ただし、実験で観測された上部臨界磁場近傍での振動振幅の急激な減少は、これだけでは説明することができない。

振幅の急激な減少は、パウリ常磁性効果を考慮することで再現することができる。このとき、常伝導転移が起こる磁場はパウリ極限となる。この結論は、常伝導転移が一次相転移であるという実験事実とも一致する。

4. まとめ

Sr_2RuO_4 のラインノードの位置を特定するために実験グループとの共同研究を行った。実験で観測された、 ab 面内の磁場方向に対する 4 回対称な比熱振動が、水平ラインノードの存在と正方晶のフェルミ速度の異方性で説明できることを示した。ここで、上部臨界磁場近傍での比熱振動の急激な減少を説明するためには、パウリ常磁性効果を考慮する必要がある。

本研究成果は、論文としてまとめており、学術誌に投稿中である。

5. 今後の計画・展望

ごく最近、 Sr_2RuO_4 での熱伝導率の測定結果から垂直ラインノードの存在を主張する論文が発表された。本研究とは、一見矛盾する結論であるが、熱伝導率は準粒子のゼロエネルギー状態密度そのものではないので、実験結果を水平ラインノードの存在とフェルミ速度の異方性から理解することができないか検討する予定である。

実験で観測された上部臨界磁場近傍における比熱の振動振幅の符号変化は、パウリ極限だけでは説明することができない。振動振幅の符号変化は、パウリ極限近傍での実現が予言されている Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態と関連している可能性があるため、FFLO 状態でのゼロエネルギー状態密度の振動についても調べることを考えている。

平成 29 年度 利用研究成果リスト

【国際会議、学会などでの口頭発表】

橘高俊一郎, 中村翔太, 榊原俊郎, 菊川直樹, 寺嶋太一, 宇治進也, Dmitry Sokolov, Andrew P. Mackenzie, 入江恒輝, 堤康雅, 町田一成, “磁場角度分解比熱測定による Sr_2RuO_4 の超伝導ギャップ構造の再検証”, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学.