

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、最近の磁場方向を制御する技術の進歩により、磁場方向を変えながら比熱を測定することで、ノードの位置も同定できるようになってきた。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、実エネルギー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りますので、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。

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、実エネルギー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りますので、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

フェルミ面の三次元性のため、ノードから磁場を傾けた際のゼロエネルギー状態密度の角度依存性は、ドップラー効果から予想される三角関数では表されないことが明らかとなった。特に、ポイントノードとラインノードが共存するギャップ関数では、磁場を c 軸と ab 面の間の角度にかけた場合にゼロエネルギー状態密度が最大となり、最大を与える角度は磁場の増加につれて ab 面に近づく。このような振る舞いは、 URu_2Si_2 の電子比熱係数としても観測されており、これまでの実験事実を考慮するとカイラル d 波型のギャップ関数を実現していることが強く示唆される。

また、ゼロエネルギー状態密度が最小となるのは、これまで考えられていたように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とも明らかになった。この事実は、水平ラインノードがフェルミ面の赤道から外れた位置にあると予想される UPt_3 のラインノードの位置を決定する上で重要である。

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は、ドップラー効果から予想される単純な角度依存性を示すわけではないが、理論計算の結果と実験結果を比較することで、ギャップ関数を決定する有力な手法となる。実際に、実験グループとの共同研究により、 URu_2Si_2 のギャップ関数の同定に成功している。

5. 今後の計画・展望

現在、 UPd_2Al_3 のギャップ関数の同定へ向けた実験グループとの共同研究を行っている。また、フェルミ面の赤道から外れた位置にラインノードがあるギャップ関数に対して、ゼロエネルギー状態密度の計算を行い、 UPt_3 の水平ラインノードの位置を決定する実験の提案をすることを計画している。

平成 27 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】

S. Kittaka, Y. Shimizu, T. Sakakibara, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki, Y. Tsutsumi, T. Nomoto, H. Ikeda, and K. Machida, “Evidence for Chiral d-Wave Superconductivity in URu₂Si₂ from the Field-Angle Variation of Its Specific Heat”, Journal of the Physical Society of Japan, **85**, 033704 (Feb. 2016).