

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(1)

理研における所属研究室名:

(1)創発物性科学研究センター 計算量子物性研究チーム

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

対する比熱振動の位相の符号に逆転が起こる。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。

Sr_2RuO_4 の 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、比熱振動の位相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、比熱振動の位相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。

2. 結果

本研究では、実験で観測された低温比熱の振る舞いが、水平ラインノードにより説明できることを示した。

水平ラインノードの存在を仮定し、正方晶である Sr_2RuO_4 の 4 回対称なフェルミ速度の異方性をモデル化することで、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。比熱振動の磁場依存性に関しても、位相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、モデルのパラメーターである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。

また、上部臨界磁場近傍での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。

3. 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、実験グループとの共著論文として発表している。また、理論と計算の詳細についての論文も学術雑誌への掲載が決定している。

4. 今後の計画・展望

これまでの研究では、平衡状態の熱力学量から超伝導体の対称性を明らかにする研究を行ってきたが、今後の研究では非平衡状態の輸送特性にも対象を広げて、超伝導対称性の決定や、準粒子励起の性質の解明を行う計画である。非平衡状態を扱うには Keldysh 形式のグリーン関数を計算する必要があり計算量が増加してしまうが、HOKUSAI を利用することで効率的に研究を進めたい。

5. 利用がなかった場合の理由

今年度の研究は、昨年度までに HOKUSAI を利

用して得られた計算データに基づいている。昨年度までの利用で、十分な計算データが得られていたため、今年度は追加の利用が必要なかった。

平成 30 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

S. Kittaka, S. Nakamura, T. Sakakibara, N. Kikugawa, T. Terashima, S. Uji, D. A. Sololov, A. P. Mackenzie, K. Irie, Y. Tsutsumi, K. Suzuki, and K. Machida, “Searching for Gap Zeros in Sr_2RuO_4 via Field-Angle-Dependent Specific-Heat Measurement”, *Journal of the Physical Society of Japan* **87**, 093703 (2018).

K. Machida, K. Irie, K. Suzuki, H. Ikeda, and Y. Tsutsumi, “Theoretical studies for identifying horizontal line nodes via angle-resolved density-of-states measurements: Application to Sr_2RuO_4 ”, *Physical Review B* 掲載決定済.