

Feedback Spin Resonance in Superconducting CeCu₂Si₂ and CeCoIn₅

著者: I. Eremin, G. Zwicknagl, P. Thalmeier, and P. Fulde

アブストの翻訳

- 私たちは、重いフェルミオン系超伝導体 CeCoIn₅および CeCu₂Si₂において最近観測されたスピン共鳴モードが、超伝導準粒子に由来する磁気励起子であることを示しました。この共鳴状態の波数ベクトル Q は、非従来型のギャップ関数の対称性およびノード位置を判別するための強力な基準を提供します。磁気励起に対する超伝導のフィードバックを詳細に解析した結果、両化合物において超伝導ギャップの対称性が一重項 dx^2-y^2 状態であることが明らかになりました。特に、この解析により CeCoIn₅ におけるギャップ対称性の長年の曖昧さが解消されます。また、両超伝導体において、共鳴ピークが Q から離れた位置で顕著な分散を示すことを実験的に確認できることを提案します。この解析から、2つの重いフェルミオン系超伝導体と層状銅酸化物における共鳴ピークの類似した起源が明らかになりました。

研究背景・問題意識

- 重いフェルミオン系、遷移金属酸化物では、どちらも短距離反強磁性スピン揺らぎがd波秩序パラメータを持つクーバー対の形成を引き起こすと広く考えられている。
- 非従来型超伝導は磁気スピン励起に強いフィードバック効果を及ぼす。その一例が共鳴ピークである。
- 共鳴の観測は、ギャップ対称性に対して符号反転の条件を課す。最近ではU系(UPd₂Al₃)やCe系(CeCu₂Si₂, CeCoIn)でも、非整合波数ベクトルにおいてスピン共鳴が観測された。これはギャップ対称性の決定に大きく関与した。
- ここではCeCu₂Si₂及びCeCoInの超伝導状態における磁化率を解析する。両ケースで、共鳴ピークが現れることが確認された。

手法

- CeCu₂Si₂の場合、くりこみバンド理論に基づくバンド構造を用いて計算した。なお強い相関は共鳴型の4f位相シフトを選択することで導入される。この共鳴の幅と位置は近藤温度に関連している。
- モデルはフェルミ準位を横切る主な重い準粒子バンドに対してタイトバインディングフィットするのが合理的と言える。具体的にはエネルギー分散を

のように仮定する。パラメータ化された重い準粒子を用いて静的リンドハルト磁化率を計算すると、 $\chi(q)$ は Q_{SDW} でピークを持っていることがわかる。

- 共鳴ピークは、RPAによる動的スピン感受率を考慮することで理解できる。

議論

- 大きな運動量 q に対して、 $Im\chi^0(q, \omega)$ は低周波数でゼロになり、p-h連続体の開始周波数 $\omega_c = \min(|\Delta_k| + |\Delta_{k+q}|)$ で不連続に跳躍する可能性がある。ここで不連続性は $sgn(\Delta_k) = \textcolor{red}{sgn}(\Delta_{k+q})$ が成り立つ場合にのみ生じる。
- $Im\chi_0$ における不連続性は、 $Re\chi_0$ に対して対数的な特性を引き起こす。その結果以下の共鳴条件を満たすことが可能になる。
 1. $URe\chi_0(q, \omega_{res}) = 1$
 2. $Im\chi_0(q, \omega_{res}) = 0$
- 共鳴ピークが現れるのは
 1. $\Delta_k = \Delta_0(\cos k_x a - \cos k_y a)$
 2. $\Delta_k = \Delta_0 \sin k_x a \sin k_z c$
 3. $\Delta_k = \Delta_0(\sin(k_x + k_y))/2a \sin k_z/2c$

であることがわかった。また一番最初の共鳴のほうが他のチャンネルと比べて非常に強い。

- 各対称性における共鳴の強度は、いくつかの要因が絡んでいる。フェルミ面の曲率、超伝導ギャップの絶対値、ギャップのノードでの速度の競合、などである。
- 共鳴が (q_x, q_y) からずれると抑制されてしまう理由: フェルミ面の一部で $sgn(\Delta_k) = sgn(\Delta_{k+q})$ を含む散乱過程が常に存在し、共鳴を抑制するため。
- CeCoIn5における共鳴ピークの形成について。CeCoIn5は複数のfバンドと伝導バンドが含まれ、混成しているために、単一バンド模型を用いてこの構造を再現するのは困難である。二重バンドモデルを導入する方が適切であると言える。
- 共鳴ピークは $\omega_c = \min(\Delta_k + \Delta_{k+q})$ の付近で形成され、これは Δ_0 に近い値となる。これは Q_{AF} によって接続される点が、ギャップ関数が最大値を持つフェルミ面の部分から比較的離れているため。
- d波のときに Q_{AF} での共鳴ピークが形成される。

結論

- 超伝導転移温度以下での動的磁化率を解析する。両ケースにおいて、磁気不安定性の波数ベクトルで共鳴的特徴が現れることが示された。また本研究の結果から、これら2つの重いフェルミオン系超伝導体と高温超伝導銅酸化物が同じ秩序パラメータの対称性を持つことが示された。

感想・メモ

- 一時期RPAの論文を読みまくっていたせいか、非常にさくさくと読めた。
- スピンシングレットだから良かったものの、例えば獅子堂さんのモデルはスピントリプレットをちゃんと考慮しているのでサクッと実装するのは難しいのだろうか。
- 白野君のモデルを使ってスピン共鳴を実現させるのに限界を感じてきた.....