Pairing symmetries of multiple superconducting phases in UTe2:Competition between ferromagnetic and antiferromagnetic fluctuations (2024)

- 阪大の藤本先生
- ペアリングののりが強磁性揺らぎと反強磁性ゆらぎの両方であると仮定してエリアシュベルグ方程式を分析し、どの状態が安定して実現するかを見た。また圧力パラメーターを導入して、複数の超伝導相の再現を試みた。

モデル

- dHvA(ドハースファンアルフェン)で観測されたフェルミ面を再現するようなミニマルなモデルを作成する。
- 相互作用のないハミルトニアンは

$$H_N(k) = (\epsilon_0(k) - \mu)\sigma_0\tau_0 + f_x(k)\sigma_0\tau_x + f_y(k)\sigma_0\tau_y + g(k)\cdot\sigma\tau_z$$

  で与えている。なお

$$\epsilon_0(k) = 2t_1\cos(ka) + 2t_2\cos(kb)$$

$$f_x(k) = t_3 + t_4\cos\left(\frac{ka}{2}\right)\cos\left(\frac{kb}{2}\right)\cos\left(\frac{kc}{2}\right)$$

$$f_y(k) = t_5\cos\left(\frac{ka}{2}\right)\cos\left(\frac{kb}{2}\right)\sin\left(\frac{kc}{2}\right)$$

$$g_a(k) = R_a\sin(kb)$$

$$g_b(k) = R_b\sin(ka)$$

$$g_c(k) = R_c\sin\left(\frac{ka}{2}\right)\sin\left(\frac{kb}{2}\right)\sin\left(\frac{kc}{2}\right)$$

となる。

- 相互作用はこの場合

\hat{V} = -\sum_{\mu,q} \chi_{\mu}(q) \hat{S}{\mu}(q)\hat{S}{\mu}(-q) で与えられる。 このとき磁気感受率は

$$\chi_\mu(q) = \frac{J_\mu}{\frac{1}{\xi_\mu^2} + (\hat{q} - \hat{Q})^2 + |\Omega_n|\hat{q}^{2-z}/T_{sf}}$$

である。

FM揺らぎの場合は

$$(\hat{q} - \hat{Q})^2 \Rightarrow 8 - 8\cos\left(\frac{q_a}{2}\right)\cos\left(\frac{q_b}{2}\right)\cos\left(\frac{q_c}{2}\right)$$

AFM揺らぎの場合は

$$(\hat{q}-\hat{Q})^2 \Rightarrow 8-8\cos\left(\frac{q_a}{2}\right)\cos\left(\frac{q_b\pm\pi}{2}\right)\cos\left(\frac{q_c}{2}\right)$$

で与える。これは体心周期性を反映させている。またイジング異方性を反映させるためにJ^a, J^b, J^cに異なる値を入れている。

FMとAFMの揺らぎの効果は

$$\chi_a = \chi_a^{\mathrm{FM}} + \chi_a^{\mathrm{AFM}}$$

で取り入れる。そして$p_c = 1.5GPa$の周りに反強磁性の臨界点の存在を仮定して、AFM揺らぎの相関長は平均場指数を持つべき乗則に従うとする。つまり$\xi_a^{\mathrm{AFM}}(p) = \frac{C}{(p_c-p)^{1/2}}$

手法

スピン自由度を考慮したエリアシュベルグ方程式を解く。

$$\epsilon\Delta_{\zeta\zeta'}(k) = -\frac{T}{N}\sum_{k',\zeta_1,\zeta_2,\zeta_3,\zeta_4} V_{\zeta\zeta_1;\zeta'\zeta_2}(k-k')G_{\zeta_1\zeta_3}(k')\Delta_{\zeta_3\zeta_4}(k')G_{\zeta_2\zeta_4}(-k'),$$

$$G(k) = [i\omega_n - H_N(k) - \Sigma(k)]^{-1},$$

$$\Sigma_{\zeta\zeta'}(k) = -\frac{T}{N}\sum_{k',\zeta_1,\zeta_2} V_{\zeta\zeta_1;\zeta'\zeta_2}(k-k')G_{\zeta_1\zeta_2}(k')$$

なおギャップ関数も軌道自由度を持っていて、

$$\Delta = \sum_{j=0,x,y,z} \tau_j \otimes (d_j\cdot\sigma + \psi_j)i\sigma_b$$

となる。スピントリプレットペアリングd及びスピンシングレットペアリングψの混合は、各U原子サイトでの局所反転対称性の破れによって軌道内ペアリングチャネルで発生する。ギャップの全体の反転対称性は、g(u)既約表現に対して {\Delta(k)}*{AA} = \pm {\Delta(-k)}*{BB}

{\Delta(k)}*{AB} = \pm {\Delta(-k)}*{BA} となる。

結果

各既約表現に対応するエリアシュベルグ方程式の最大固有値が示され、低圧力$p < 0.2$では、FMとAFMの揺らぎの共存がほぼ縮退したAuとB3u状態を安定化させた。高圧力ではFMの揺らぎが抑制される一方でAFMの揺らぎが強化されるため、B1u状態が安定化する。

つまりイジング形スピン揺らぎが、FMまたはAFMの起源に関わらず、スピントリプレット超伝導を引き起こすことが示される。またSC1相はAuまたはB3u状態で、SC2相はdベクトルがほぼa軸に平行に配列されるB1u状態と同定される。

補足1 UTe2の特性について

UTe2 重い電子系で、独特の超伝導特性を持つ。

- パウリ限界を超える上部臨界磁場
- 磁場のリエントラント

- 多重相図 これらはスピントリプレットペアリング状態の実現の可能性を強く示唆している。またマヨラナエッジモードの存在も予測されている。

初期の実験ではSTMやKerr効果などで時間反転対称性の破れが見えていた。今はコントロバーシャル。

UTe2の多重相図 圧力が印加されると複数の超伝導相が生じる。常圧での超伝導相であるSC1は圧力の印加に伴い抑制されるが、圧力下で出現し1.5GPa周辺で急激に消失する別の超伝導相SC2がある。

補足2 考察

フェルミ面のネスティングの効果が重要である以上、これらの結論は一般的ではなくモデル依存である。またHund結合や近藤結合を考えた場合にペアリング対称性が変化したり競合する可能性もある。

縦スピンの揺らぎだけでなく横スピンの揺らぎも発達すると、安定したペアリング状態が変更される可能性がある。

補足3

圧力下での磁気感受率の測定によれば、強いイジング型異方性が存在するとされている。スピン軌道相互作用は磁気異方性の起源となり、静的な磁気特性の間でも共通しているべきである。

感想

軌道自由度やスピン自由度が入ってくると一気に計算が難しくなる印象があるが、今回は2軌道のミニマルなモデルを用いてdHvAで得られたフェルミ面を再現し、議論を行うという簡略化がなされていて非常に参考になった。あとdHvAは純度の高いサンプルでようやくみられるらしい。