

渦糸状態の核磁気緩和率の理論

東京大学総合文化研究科 加藤 雄介¹

1 カイラル P 波超伝導

カイラル P 波超伝導体は、ゲージ対称性だけでなく、時間反転対称性も同時に破れている点で興味深い。ヘリウム 3 の薄膜超流動状態や、ルテニウム系超伝導体における実現が期待されている点でも重要な研究対象である。カイラル P 波超伝導体において時間反転対称性が自発的に破れていることは、大雑把な見方をすれば

外部磁場をかけていないカイラル超伝導体 = 外部磁場の下での普通の超伝導体

という関係がなりたつことを意味する。このような観点から、カイラル P 波におけるゼロ磁場でのホール効果が理論的に予言された [1, 2] が、ロンドンの侵入長がフェルミ波長よりずっと長い、通常の超伝導体ではホール伝導度は非常に小さい値のようである [3]。そこで、上記の関係式を

外部磁場をかけたカイラル超伝導体 = 外部磁場をかけていない普通の超伝導体? (1)

と眺めてみる。これをヒントに、ペアポテンシャル、不純物散乱率を計算すると、たしかに (1) の図式が成り立つことがわかった。すなわち、カイラル P 波超伝導体の渦糸状態では非磁性不純物効果が効かない（ゼロ磁場下での S 波と同じ；アンダーソンの定理）こと [4, 5]、渦糸近傍では局所的に時間反転対称性が回復していること [6] がわかった。

2 局所状態密度と核磁気緩和率

(1) の図式が成立する仕掛けは、渦糸まわりの束縛状態にある。渦糸周辺には、ペアポテンシャルの壁に囲まれた領域にアンドレーエフ束縛状態が実現する。渦糸まわりのペアポテンシャルの構造も、渦糸状態における不純物散乱も、この束縛状態のエネルギー準位と波動関数の性質によって支配されている。この「主役」であるアンドレーエフ束縛状態をプローブするには、十分な空間分解能を持った局所測定が必要である。そのようなものとして STM と NMR が挙げられる。われわれは、前者により局所的な一粒子状態密度を、後者により磁氣的励起の局所状態密度を得ることができる。具体例として、円筒対称のフェルミ面をもった 2 次元超伝導体に、垂直に磁場がかかった場合を考える。ペアリングの対称性として S 波とカイラル P 波を考える。この場合、局

¹ E-mail: yusuke@phys.c.u-tokyo.ac.jp

所的な一粒子状態密度を計算するとS波とカイラルP波で全く同じになる。一方、局所的核磁気緩和率を計算すると、S波の場合は有限値を与えるのに対してカイラルP波の渦糸状態ではゼロになる [7]。核磁気緩和率は、2 粒子状態密度とコヒーレンス因子の積が与えられる。カイラルP波の渦糸状態において、準粒子状態密度は存在するのに、準粒子間の干渉による遷移確率振幅の打ち消しあいのため、磁気緩和が起こらないのである。この結果は、STMとNMRの両方を用いて検証することができる。すなわちカイラルP波超伝導の渦糸状態において、STMで見ると渦糸まわりに状態密度が存在する領域においても、磁気緩和がほとんど（副次的な要素を除くと全く）起こらないはずである。

3 アンドレーエフ束縛状態におけるコヒーレンス効果

磁気緩和率、その他の物理量におけるコヒーレンス効果については、すでにBCS理論で議論されている。上述の現象の新しい点は、BCS理論においてはバルクの準粒子のコヒーレンス効果を考えていたのに対して、ここではアンドレーエフ束縛状態に対するコヒーレンス効果を考える点にある。空間分解能をもつ実験手段の最近の精度向上により、それらの束縛状態における量子効果の研究は今後ますます重要になっていくと期待される。

なお、この研究は、林伸彦氏（岡山大学総合情報処理センター）との共同研究である。

参考文献

- [1] G. Volovik, Sov. Phys. JETP **67** (1988), 1804.
- [2] J. Goryo and K. Ishikawa, Phys. Lett. A **260** (1999), 294.
- [3] A. Furusaki, M. Matsumoto and M. Sigrist, Phys. Rev. B **64** (2001), 054514.
- [4] Y. Kato, J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000), 3378.
- [5] Y. Kato and N. Hayashi, J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002), 1721.
- [6] Y. Kato and N. Hayashi, J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001), 3368.
- [7] N. Hayashi and Y. Kato, The Proceedings of LT23; Y. Kato and N. Hayashi, *ibid.*