

FFLO 超伝導が創る空間的異方性

物性研究所附属国際超強磁場科学研究施設 今城 周作

超伝導は1911年にOnnesにより発見された量子現象であり、電気抵抗ゼロやマイスナー効果等の性質を示す。超伝導の発現機構を説明するために発見後の約半世紀間で様々な研究が行われ、1957年にBardeen, Cooper, Schriefferによって提案された微視的理論(BCS理論)により大枠が解明された。BCS理論では、電子-格子相互作用を介して電子間に引力が生じて電子対(クーパー対)が形成され、電子対の凝集状態となって超伝導状態が現れる。この際、クーパー対となる2つの電子はそれぞれアップスピンとダウンスピンをもち、お互いに正反対の運動量 \mathbf{k} と $-\mathbf{k}$ を有すると仮定されている。このBCS理論は単体金属で現れるような超伝導状態の振舞いをよく説明するが、高温超伝導体等ではBCS理論の枠から逸脱するため、非従来型超伝導と呼ばれている。

エキゾチックな非従来型超伝導の一つとして、1964年にFuldeとFerrell [1]、LarkinとOvchinnikov [2]が同年に別々に理論的に提案したFulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO)状態が知られている。図1(a)に示すように、BCS理論における \mathbf{k} と $-\mathbf{k}$ の電子による対ではなく、FFLO状態では \mathbf{k} と $-\mathbf{k}+\mathbf{q}$ の電子による対形成が考えられており、クーパー対が有限の重心運動量 \mathbf{q} をもつ。ただ、BCS的なクーパー対に比べ、 \mathbf{q} の存在により相手の電子がフェルミ面上から外れて対となることができず凝縮エネルギーで損をし、 \mathbf{q} の分だけ運動エネルギーが高くなることを考えると、不利な対形成であることが予想できる。しかし、強磁場中では状況は変わり、ゼーマン効果によってアップスピンとダウンスピンで分裂したフェルミ面ではBCS的対形成は不安定化され、逆に \mathbf{q} によってはFFLO状態が安定となる場合がある。

FFLO状態が現れると \mathbf{q} の存在により秩序変数が変化する。超伝導を特徴付ける超伝導ギャップ関数 Δ に更に $\cos(\mathbf{q}\mathbf{r})$ という項が追加される訳であるが、これは図1(b)のようにギャップが \mathbf{q} の方向に沿って実空間上で周期的に変調した構造を示すことを意味している。この空間変調性がFFLO状態の最大の特徴の一つであり、この空間変調性は \mathbf{q} の方向に依存した空間的異方性を示す。逆に言えば、空間的異方性を検出することでFFLO状態の存在を

実証できるはずである。

ここまで理論的な背景を紹介したが、現実ではFFLO状態がどのような条件で現れるか考えよう。まず、低磁場で安定なBCS状態がゼーマン効果によって完全に抑制されるには、パウリ極限と呼ばれるスピン分極エネルギーが凝縮エネルギーを上回る強磁場以上である必要がある。パウリ極限以上ではBCS状態は破壊され、一方、FFLO状態は空間的に変調することでスピン分極のエネルギーでの利得分だけ生き残ることができる。しかし、ここで注意したいのは、超伝導はスピンによるゼーマン効果だけでなく、電荷によるローレンツ力の影響も受ける。これは軌道破壊効果と呼ばれ、通常の超伝導体ではフェルミ速度が大きいために、ゼーマン効果より強く軌道破壊効果が働き、パウリ極限よりもはるか低磁場で超伝導自体が抑制されてしまうためFFLO状態が現れる余地はない。極端に電子の有効質量が大きくなければ軌道破壊効果は回避できないため、重い電子系超伝導か低次元超伝導の伝導方向に平行に磁場をかけるような特異な場合でなければFFLO状態は実現しない。更に、電子の平均自由行程が実空間変調の周期より十分長くなければ、散乱によって変調構造が抑制されてしまうため、FFLO状態の実現には極めてクリーンな電子系が必要となる。

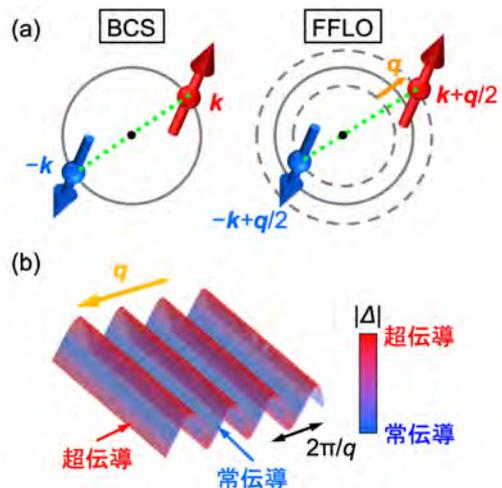


図1 (a) BCS状態とFFLO状態におけるフェルミ面上での電子対形成の概略図。(b) FFLO状態における超伝導秩序変数 Δ の実空間変調構造。超伝導部分(赤)と常伝導部分(青)が \mathbf{q} に沿って実空間で周期的に現れる。

謝辞

本研究は、東京大学物性研究所の野村肇宏氏、小濱芳允氏、金道浩一氏との共同研究で行われました。また、JSPS 科研費 (JP20K14406, JP22H04466, JP20K14403, JP22 H 00104) の支援のもと遂行されました。

参考文献

- [1] P. Fulde, & R. A. Ferrell, *Phys. Rev.* **35**, A550 (1964).
- [2] A. I. Larkin, & Y. M. Ovchinnikov, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **47**, 1136 (1964).
- [3] S. Imajo et al, *Nat. Commun.* **13**, 5590 (2022).
- [4] H. Urayama et al., *Chem. Lett.* **17**, 55 (1988).
- [5] D. Guterding et al., *Phys. Rev. B* **94**, 024515 (2016).

