

論文の要旨

氏名 板橋 克美

論文題目：Theory of the Fulde–Ferrell–Larkin–Ovchinnikov State
in Quasi-One-Dimensional Type-II Superconductors
(準1次元第二種超伝導体における FFLO 状態の理論)

超伝導研究において、強磁場中の第二種超伝導体における Fulde–Ferrell–Larkin–Ovchinnikov (FFLO) 状態は重要な研究対象の1つであり、多くの理論的・実験的研究が行われている。FFLO 状態は、強磁場中の第二種超伝導体において有限な重心運動量 \mathbf{q} をもつ Cooper 対によって引き起こされる超伝導状態であり、その秩序変数は、 \mathbf{q} が有限であることを反映し、空間的に振動している。この状態は、クリーンな第二種超伝導体における対破壊効果に関してスピン磁性が軌道磁性よりも支配的な場合にのみ生じるが、従来型の超伝導体では、この条件を満たすことができず、FFLO 状態は長い間観測されてこなかった。

一方、有機物超伝導体や重い電子系超伝導体などの新奇超伝導体では、その巨大な有効質量や狭いバンド幅、準低次元構造により、上記の条件を満たすことができ、FFLO 状態の実現が有望視されている。この理論的予想に基づいて数多くの実験が行われた結果、近年になり、FFLO 状態の実現を示唆する実験結果が報告されるようになった。特に、準1次元有機物超伝導体 (TMTSF)₂ClO₄ では、Yonezawa らが超伝導オンセット温度の面内磁場角度依存性 $T_c^{\text{onset}}(\phi)$ を観測し、強磁場中で主軸が結晶軸と異なる方向にシフトすることを発見した。ここで、TMTSF は tetramethyltetraselenafulvalene を意味し、 ϕ は結晶の a 軸と磁場 \mathbf{H} の間の角度を表す。Yonezawa らはこの強磁場中の主軸の変化が FFLO 状態の出現に起因する可能性を指摘した。

この物質の準低次元構造は、軌道磁性の抑制とフェルミ面に起因する効果のため、FFLO 状態の安定化に対して有利にはたらくと考えられる。このフェルミ面に起因する安定化効果は電荷密度波やスピン密度波に対するネスティング効果と類似するものであり、FFLO 状態におけるネスティング効果と呼ばれる。準低次元系では、FFLO 状態はこのネスティング効果により安定化することが示されている。

また、この物質では、実験と理論の先行研究からラインノードをもつスピン–三重項超伝導が生じている可能性が示唆されているが、スピン三重項超伝導が生じている可能性も示唆されている。さらに、反強磁性揺らぎを媒介とした超伝導対形成相互作用がスピン–三重項と三重項の両方を含むことが示されている。このような系ではスピン–三重項と三重項の秩序変数の混成が生じ、この効果によって FFLO 状態は安定化することが示されている。

本論文では、 $T_c^{\text{onset}}(\phi)$ における強磁場中の主軸の方向を再現することを目的として、研究を

行った。この強磁場中の主軸の方向は、主にフェルミ面のネスティング効果によって決定されると考えられる。(TMTSF)₂ClO₄では、軌道磁性対破壊効果のため、重心運動量の方向が磁場の方向が一致すると考えられる ($\mathbf{q} \parallel \mathbf{H}$)。従って、実験上、 \mathbf{H} の方向を変化させることは、FFLO状態を仮定すれば、 \mathbf{q} の方向を変化させることであると考えられる。本研究では、これらの考察に基づき、FFLO状態の安定性の面内磁場方向依存性を調べた。ここで、理論と実験との比較のために、(TMTSF)₂ClO₄における現実的な格子構造や分散関係を考慮した。また、面内磁場方向依存性に関連し、準1次元系における幅広いパラメーターでフェルミ面の形とFFLO状態が安定となる磁場方向との関係を調べた。さらに、準1次元系におけるFFLO状態に対する秩序変数混成効果も調べた。以上の研究の結果を以下に述べる。

まず、FFLO状態の安定性の面内磁場方向依存性に関して、FFLO状態が強く安定化される磁場方向 (ϕ_0 とする) が存在することが分かった。上部臨界磁場はこの方向で cusp を示す。この cusp を示す振る舞いは、先行研究で示されている正方格子系でホール濃度 n_h を変化させた場合に生じる振る舞いと類似している。正方格子系では、ホール濃度を変えることでフェルミ面の形状を変化させ、特定のホール濃度で cusp が生じている。本研究では、フェルミ面の形状は変化させず、磁場の方向を変化させることによって cusp が生じている。従って、異なる状況だが、同じ現象が生じており、cusp が FFLO 状態にとって普遍的な現象であると考えられる。

この安定となる方向と上記の $T_c^{\text{onset}}(\phi)$ における主軸の方向と比較したところ、先行研究で得られているパラメーターでは、主軸の方向と同じ象限に cusp が生じ、実験結果を概ね再現できている。さらに、このパラメーターを少し修正すれば、実験結果をより精密に再現することができる。従って、これらの結果は (TMTSF)₂ClO₄ において FFLO 状態が起きているという仮説と一致する。

次に、幅広いパラメーターで FFLO 状態の安定性の面内磁場方向依存性を計算し、FFLO 状態が安定となる磁場方向 ϕ_0 とフェルミ面の見た目との関係を調べた。似た形状のフェルミ面である場合、 ϕ_0 も類似することが推測されるが、ネスティング効果がフェルミ面の構造に鋭敏に依存するため、 ϕ_0 は全く異なる可能性もある。本研究では、見た目を定量的に表す特徴量を導入し、その特徴量と ϕ_0 の関係について調べた。

その結果、似たフェルミ面でも全く異なる ϕ_0 となることや、全く異なるフェルミ面でも同じ ϕ_0 となることが分かった。つまり、フェルミ面の見た目と ϕ_0 の間に相関はなく、フェルミ面の見た目からの単純な考察では、 ϕ_0 は得られないことが分かった。これは、フェルミ面の形状に加え、フェルミ速度 v_F などのフェルミ面における1粒子エネルギーの導関数も重要となるためであり、本研究では、正確に考慮し、計算をしている。

また、ホッピングパラメーターと ϕ_0 との関係も調べ、 t_{14} と呼ばれる第二近接格子点間の飛び移り積分が ϕ_0 の決定に重要であるということが分かった。

最後に、準1次元系における FFLO 状態の秩序変数混成効果を調べた。この系における混成効果の強さは秩序変数のスピン-重項と三重項の組み合わせ、磁場の方向、フェルミ面の形状に依存することが分かった。例えば、d 波と f_x 波や s 波と p_x 波が混成する場合、磁場方向が a 軸方向に向くにつれて、混成効果が強く生じる。これに対して、d 波と f_y 波や s 波と p_y

波が混成する場合には、磁場方向が b 軸方向に向くにつれて、混成効果が強く生じる。また、 $d + f_x, s + p_x$ の混成では、フェルミ面がフラットになるにつれて混成効果が強く生じ、その一方、 $d + f_y, s + p_y$ の混成では、フェルミ面の歪みが大きくなるにつれて混成効果が強く生じる。 d 波と p_x 波の混成、 d 波と p_y 波の混成では、混成効果はほとんど生じない。これらの振る舞いは解析的な計算からも表すことができる。

以上の結果は次の 6 点に総括される。

1. FFLO 状態が強く安定化される磁場方向 ϕ_0 がある。
2. 現実的なパラメータにおける ϕ_0 は実験結果と概ね一致する。
3. ϕ_0 で上部臨界磁場は cusp を示す。
4. フェルミ面の見た目からの単純な考察だけでは ϕ_0 は決まらない。
5. t_{I4} が ϕ_0 の決定に重要である。
6. 準 1 次元系における混成効果の強さは、秩序変数のスピン一重項と三重項の組み合わせ、磁場の方向、フェルミ面の形状に依存する。

1 と 2 は $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ において FFLO 状態が実現していることを支持するものである。3 と 4 に関して、これらの振る舞いは正方格子系での先行研究における振る舞いと類似しており、特に 3 の cusp は FFLO 状態にとって普遍的な現象であると考えられる。また、特定の物質に限らない、幅広いパラメータにおける計算結果は、今後の準低次元系における FFLO 状態に関する研究に対して幅広く適用できる。