

交替磁性体とスピン軌道結合がもたらす新奇な超伝導状態

[1] 要旨

第三の磁性体として注目を集めている交替磁性体にラシュバ型スピン軌道結合を導入したモデルにおいて、クーパー対全体が重心運動量を持つ有限重心運動量超伝導の実現が理論的に提案された。交替磁性体がもつ異方的なバンド分裂とラシュバ型スピン軌道結合が組み合わさると、フェルミ面が四極的に変形し、超伝導の安定化に重要な役割を果たすことが明らかとなった。これは、空間反転対称性のない交替磁性体における超伝導状態の理解に新たな視座を提供する成果である。

[2] 本文

超伝導を記述する BCS 理論によれば、フェルミ面上にあるスピナップとスピンドアウンの電子がクーパー対と呼ばれるペアを形成することで超伝導が発現する。通常、2つのスピン状態は時間反転対称性で縮退しているため、ペアの2電子それぞれが持つ運動量の大きさは等しく、クーパー対の重心運動量はゼロになる。しかし、超伝導物質に外部磁場を印加した場合はゼーマン結合によりフェルミ面が電子スピンの向きに応じて2つに分裂するため、クーパー対全体が有限の重心運動量を獲得する可能性がある。このようにフェルミ面のスピン分裂に起因してクーパー対が重心運動量を持った状態は有限重心運動量超伝導と呼ばれる。

最近では超伝導電流の整流効果である超伝導ダイオード効果などの観点から、磁場とのゼーマン結合に加え、ラシュバ型スピン軌道結合を持つ2次元超伝導体（ラシュバ・ゼーマン模型）の研究が盛んに行われている。ラシュバ型スピン軌道結合とは空間反転対称性のない系で現れる効果で、エネルギーバンドのスピン自由度による分裂をもたらす。ラシュバ・ゼーマン模型では面内磁場とラシュバ型スピン軌道結合のバンド分裂効果が結合することでフェルミ面がシフトし、有限重心運動量超伝導が安定化することが知られている[図 1(a)]。これら2つのスピン結合をもつモデルでの有限重心運動量状態の対形成の起源は、異なる2つのフェルミ面の2電子からなるバンド間ペアと、同じフェルミ面上の2電子からなるバンド内ペアに大別できる。特に、状態密度の大きなフェルミ面におけるバンド内ペアは、大きな重心運動量を持つ「強いヘリカル状態」を実現することが知られている。

近年、従来の強磁性体・反強磁性体とは異なる新しい磁性体として、「交替磁性体 (altermagnet)」が注目されている。交替磁性体は磁化の空間平均がゼロでありながら、フェルミ面に異方的なスピン分裂をもたらすという特異な性質をもつ。このような性質により、交替磁性体は異方的なスピン分裂と超伝導の協奏効果を調べる物質群として研究が盛んに行われている。しかしながら、前述したような空間反転対称性の破れの影響は調べられていなかった。

最近、東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻の研究グループは2次元交替磁性体とラシュバ分裂を組み合わせることで有限重心運動量超伝導が現れると考え、理論モデルによって超伝導状態の解析を行った。その結果、交替磁性体のネールベクトルが面内にある場合に、ラシュバ・ゼーマン模型とは異なる機構で有限重心運動量超伝導が安定化しうることを明らかにした。この成果は JPSJ の 2025 年 6 月号に掲載された。

本研究では、二次元自由電子気体に d 波動的な交替磁性のスピン分裂とラシュバ分裂を導入した「ラシュバ・交替磁性模型」に対して、同じく d 波対称性を持つスピナー重項超伝導を仮定して、ボゴ

リューボフ・ドジャン方程式を用いた超伝導状態の数値解析を行った。

数値計算の結果、特にネールベクトルが2次元面内方向にある場合に、広いパラメータ領域で有限重心運動量超伝導が発現することが示された。ラシュバ・ゼーマン模型と本研究のラシュバ・交替磁性模型とで大きく異なるのはフェルミ面への影響である。図1(b)に面内交替磁性体のスピンスplitとラシュバsplitの双方の影響を受けたフェルミ面を示す。交替磁性がd波対称性を有するため、 $k_y = \pm k_x$ 方向では交替磁性体によるフェルミ面の變形が生じず、それ以外の波数領域では變形方向が波数に依存する。その結果、フェルミ面が四極子的な變形を示していることがわかる。

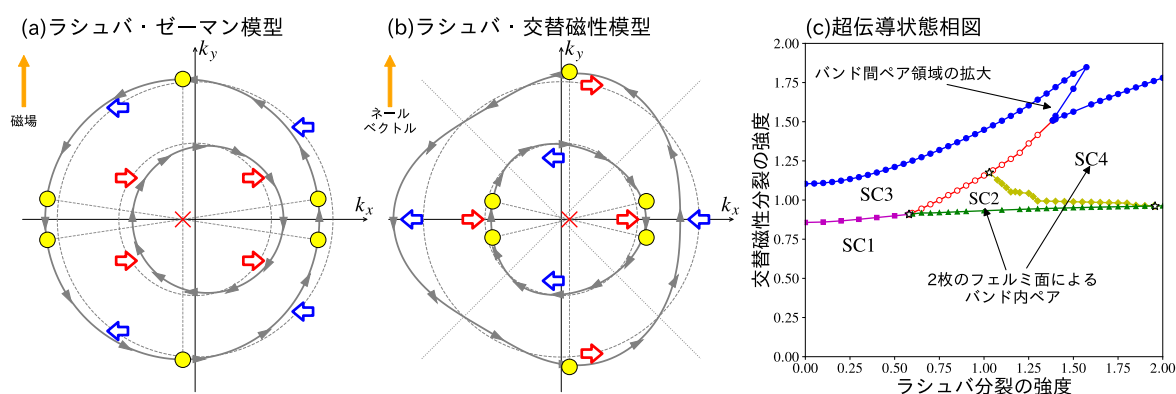


図1 (a)ラシュバ・ゼーマン模型と(b)本研究で扱ったラシュバ・交替磁性模型で現れる2枚のフェルミ面(実線)。破線はラシュバ型スピンスplitのみの場合のフェルミ面を示し、フェルミ面上の矢印は電子スピンの向きを表す。赤色(青色)の矢印は(a)ゼーマン結合または(b)交替磁性によるスピンスplitにより、破線のフェルミ面が $+k_x$ ($-k_x$)方向へ變形したことを模式的に表す。(b)の点線は交替磁性体によるスピンスplitのない方向($k_y = \pm k_x$ 方向)に対応する。黄色の丸はバンド内ペアを模式的に表しており、赤色の×印はクーパ対の重心運動量を表す。(c)本研究で得られた超伝導状態相図。

このような交替磁性体のd波対称性に起因した異方的なフェルミ面の變形はバンド間ペアの安定化に寄与し、超伝導領域が拡大することが数値計算によって示された[図1(c)]。また、2枚のフェルミ面の両方が有限重心運動量超伝導に寄与するバンド内ペアが実現可能であることも本研究は示しており、これは主に1枚のフェルミ面が有限重心運動量超伝導の安定化に寄与するラシュバ・ゼーマン模型のバンド内ペアとは対照的である[図1(a, b)]。

本研究は交替磁性とラシュバsplitの協奏効果についてフェルミ面の變形という観点から新たな視座を提供するものであり、交替磁性における超伝導への基礎的な理解に資すると同時に、将来的には交替磁性体を用いた超伝導デバイス応用などへ発展することが期待される。

原論文(2025年5月23日公開済)：

Finite-momentum Superconductivity in Two-dimensional Altermagnets with a Rashba-type Spin-Orbit Coupling

K. Mukasa and Y. Masaki, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 064705 (2025).

<情報提供：向笠 紘平(東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻)

正木祐輔(東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻)>