

空間反転対称性の破れた物質で観測された「軌道交差」

空間反転対称性の破れた金属では反対称スピン軌道相互作用によってスピンによる縮退が解けてフェルミ面は分裂するが、別の対称性のために特定の方向で縮退が残る場合がある。本論文では、 Yb_4Sb_3 のキャリアがこの縮退点で、スピン分裂した片方のフェルミ面からもう片方のフェルミ面に移る「軌道交差」を起こす現象を見出した。さらに、この交差が起きる確率から、縮退点でのスピン反転の有無を明らかにできることを示した。

初等的な固体物理の教科書では、電子のエネルギーバンドあるいはフェルミ面を説明する際にスピンの自由度は無視するかあるいは「縮退」しているものとして話が進む。ところが、結晶の空間反転対称性が破れている物質では、反対称スピン軌道相互作用によって電子状態は分裂する。この対称性の破れに起因した電子状態のスピン自由度による分裂は、たとえば図 1(a)のように、大きさの異なる二つのフェルミ面をもたらす。このとき、スピンの向きは逆格子空間の k 方向に依存するようになるが、スピンの k 依存性（スピントクスチャー）を実験的にとらえるのは難しい。

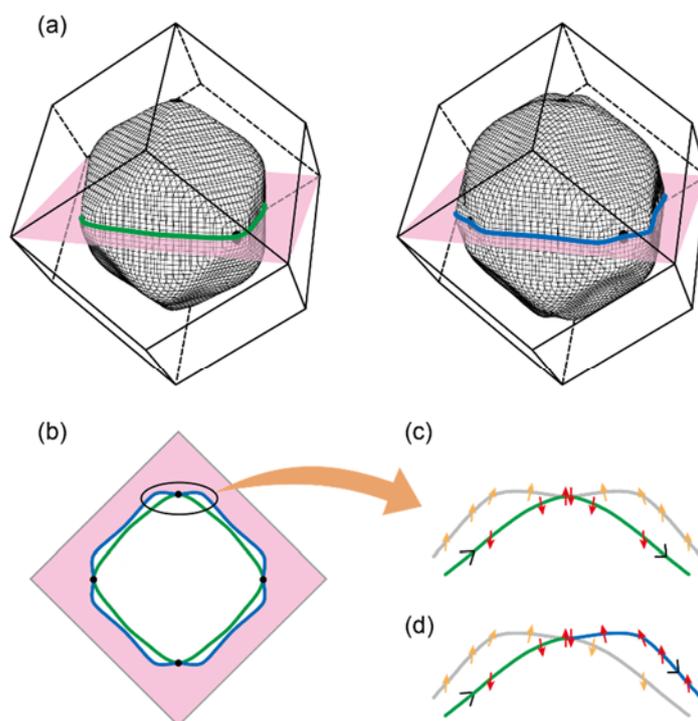


図 1 (a) 反対称スピン軌道相互作用によって分裂したフェルミ面。(b) (a)のピンクで示した面（ $\{100\}$ 面）でカットしたフェルミ面の断面。内側の軌道が緑、外側の軌道が青で示されている。黒い点はスピン縮退点。(c) 内側を通る軌道と(d) 内側から外側に切り替わる軌道。矢印はスピンの向きを表す。

結晶の対称性を考慮すると、このフェルミ面の分裂は特定の k 方向で再び縮退する場合がある。このとき、フェルミ面に沿って運動するキャリアの軌道は図 1(b)のようにこの縮退点で「交差」する。最近、東北大学大学院理学研究科物理学専攻および神戸大学大学院理学研究科物理学専攻のメンバー

による共同研究グループは、空間反転対称性の破れた価数揺動物質 Yb_4Sb_3 において、ドハース・ファンアルフェン効果を用いてこの「軌道交差」を観測した。さらに軌道交差が起きる確率を実験的に決定することによって、スピントクスチャーに関する情報を引き出すことに成功した。この成果は日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2018 年 11 月号に掲載された。

ドハース・ファンアルフェン効果は低温・強磁場の条件下で起きる磁化の振動現象で、振動周波数がフェルミ面の極値断面積に比例することから、フェルミ面の形状を実験的に調べる有効な手段である。図 1(a) のような 2 つのフェルミ面の極値断面積は、図 1(b) に示すように大・小 2 つとなるが、研究グループはこの極値断面積に対応する 2 つの周波数のほかに 3 つの周波数の異なる振動を見出した。これら周波数は、キャリアが縮退点で内側から外側(図 1(d))、あるいは外側から内側に軌道を変えたときの極値断面積に比例しており、軌道交差が実際に起きていることを示している。

軌道交差は磁気破壊 (Magnetic Breakdown) と呼ばれる現象と少し似ている。磁気破壊は、強磁場によるサイクロトロン運動によりもともとバンド間にあったギャップを超えてより大きな軌道をまわる現象であるが、軌道交差は、磁場の有無にかかわらず縮退している、すなわちギャップがゼロである点で、また「スピン反転」の有無が伴う点で磁気破壊とは本質的に異なる。このことを、図 1(c) と (d) を使って説明しよう。内側の軌道 (緑色) を通ったキャリアは縮退点でそのまま内側の軌道を通る場合(図 1(c)) と外側の軌道 (青色) に切り替わる場合(図 1(d)) の 2 通りの可能性がある。前者ではスピン反転は起きないが、後者では縮退点を通過する際にスピン反転が起きる。本論文ではどちらの軌道を通るかを表す交差確率を定量的に評価し、特定のフェルミ面の特定の磁場方向によってのみスピン反転が起きる確率が高くなることを明らかにした。

空間反転対称性の破れた物質で見られるこの軌道交差は、古くからその存在自体は知られていたが、これまでほとんど研究例がなかった。本論文では、軌道交差が起きる確率を実験的に決定し、しかもその確率からスピントクスチャーに関する情報を引き出せることを示した点が新しい。また、特定のフェルミ面の特定の磁場方向でスピン反転が起きる確率が高くなる現象の発見は、反対称スピン軌道相互作用に関わる物理の研究に対し、大きな発展をもたらす可能性を秘めている。

原論文

[Orbital Crossing on Split Fermi Surfaces in Noncentrosymmetric \$\text{Yb}_4\text{Sb}_3\$](#)

Noriaki Kimura, Hiroki Sano, Makoto Shirakawa, Akira Ochiai, Hiroki Funashima, and Hisatomo Harima: *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 114708 (2018).

問い合わせ先：木村憲彰（東北大学大学院理学研究科）

播磨尚朝（神戸大学大学院理学研究科）

船島洋紀（神戸大学大学院理学研究科）