

反対称スピン軌道相互作用の量子臨界磁気ゆらぎによる「くりこみ」効果

原子スペクトルの多重項構造を理解する中で、電子がスピン自由度を持つことと、そのスピン自由度と軌道自由度の間に“スピン軌道相互作用”と呼ばれる相互作用があることが明らかにされた。この間の事情は、朝永振一郎の名著「スピンはめぐる」の中で詳述されており、その相互作用の起源は特殊相対論的效果であることが述べられている。すなわち、図 1(a)のように静止系の磁場は運動系でみると電場となり（速さ v が光速 c に比べて小さいときローレンツ力の式に帰着する）、図 1(b)のように静止系の電場 \mathbf{E} は電子に乗った座標系では磁場 $\mathbf{B} \doteq -(\mathbf{v} \times \mathbf{E})$ を与える。電子はスピン \mathbf{s} に起因する磁気モーメント $-2\mu_B \mathbf{s}$ をもっているのでゼーマンエネルギー $2\mu_B[\mathbf{s} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{E})]$ が生じる。これがスピン軌道相互作用の物理的起源である。電場が中心力場の場合には（電子の加速度運動の効果まで考慮すると）角運動量 \mathbf{l} を含んだ $\lambda_{so}(\mathbf{s} \cdot \mathbf{l})$ のような（トーマス因子まで含んだ正しい）形になる。この結果はディラックの相対論的場の理論によっても導かれた。

さて、結晶が反転中心をもたない場合には、固体中のバンド電子が感じるスピン軌道相互作用として、反対称スピン軌道相互作用と呼ばれる項が存在することが知られている。たとえば、正方晶で c 軸 (z 軸) 方向に反転対称性がない場合には、そのハミルトニアン H_{ASSO} は第二量子化表示で

$$H_{ASSO} = \alpha \sum_{\mathbf{k}, \sigma, \sigma'} b_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger [\gamma(\mathbf{k}) \cdot \sigma_{\sigma\sigma'}] b_{\mathbf{k}\sigma'}, \quad \gamma(\mathbf{k}) \equiv (\sin k_y a, -\sin k_x a, 0)$$

と表すことができ、ラッシュバ型のスピン軌道相互作用と呼ばれる。 $b_{\mathbf{k}\sigma}$ は波数 \mathbf{k} スピン成分 σ のバンド電子の消滅演算子を、 σ はパウリ行列ベクトルを、 a は ab 面内の格子定数を表す。これは元々、界面や表面の 2 次元電子系の場合に、上記の 1 電子に対するスピン軌道相互作用を与える表式 $2\mu_B[\mathbf{s} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{E})]$ において、 \mathbf{v} をバンド電子の速度に対応させ、電場 \mathbf{E} が界面に垂直 (z 軸に平行) な場合に得られたものである [($\mathbf{v} \times \mathbf{E}$) // ($v_y, -v_x, 0$) の関係に注意]。しかし、対称性の考察からバルクの系に対しても適用できる。 z 軸方向に反転対称性がない場合には z 軸方向に局所的な電場が発生し、その効果は結晶全体でならしたときにも生き残るのである。この項の効果は反転対称中心を持たない正方晶の重い電子系超伝導体 CePtSi_3 などでも非自明な超伝導の性質を理解するのに重要な役割を演じている。また、最近研究の発展がめざましいトポロジカル絶縁体の表面やキラル磁性体の物理においても重要な役割を果たしている。

一方、上記 CePtSi_3 や CeRhSi_3 などでは加圧により磁気秩序が消失する臨界圧近傍で量子臨界磁気ゆらぎが発達し、種々の物理量に非フェルミ液体的振る舞いが現れることが知られている。最近、大阪大学基礎工学研究科物質創成専攻のメンバーを中心とする研究グループは、量子臨界磁気ゆらぎが反対称スピン軌道相互作用に大きな影響を与えることを初めて理論的に指摘した。詳細な計算の結果、量子磁気臨界点近傍ではフェルミ面が顕著に変形を受けるとともに、分離した二つのバンドの質量のくりこみ効果が逆になることを示し、それらはドハース・ファンアルフェン効果により観測可能であることを提唱した。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 2015 年 4 月号に掲載された。

反対称スピン軌道相互作用 $\alpha\gamma(\mathbf{k}) \cdot \sigma$ は一般に臨界磁気ゆらぎによりくりこみの効果を受けるが上記論文では、図 2(b)に示されるようなファイマン図形に対応する最低次の効果が求められた。その結果、図 3(a)に示すように、磁気ゆらぎの効果がないときは、反対称スピン軌道相互作用によ

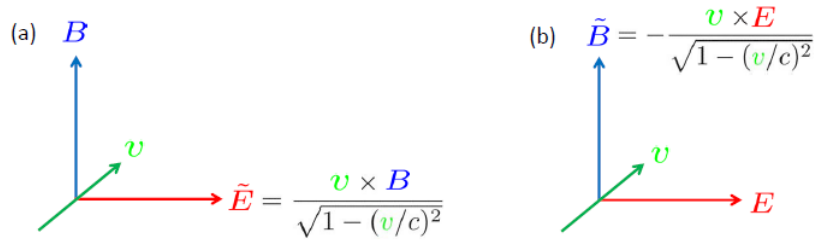


図 1. 電場と磁場のローレンツ変換： \sim の付いた量は速度 \mathbf{v} で運動する系でのものを表す。

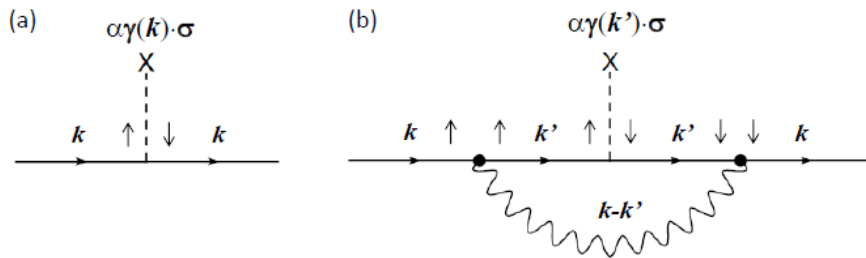


図 2. (a) 反対称スピン軌道相互作用 (b) 臨界磁気ゆらぎによる補正項の最低次項

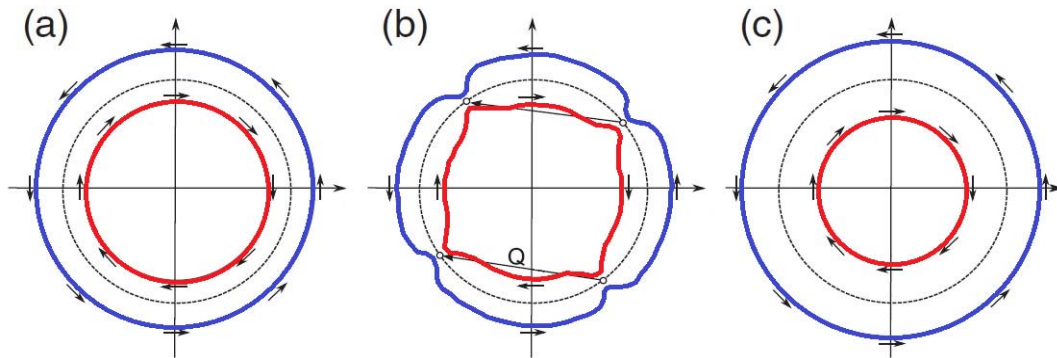


図 3. 反対称相互作用によるフェルミ面の分裂の様相. (a) 臨界磁気ゆらぎの効果がないとき. (b) 反強磁性臨界ゆらぎの効果による変形 (\mathbf{Q} は反強磁性ベクトル). (c) 強磁性臨界ゆらぎによる変形. 矢印はスピンの方向を表す.

ってフェルミ面が点線から青と赤の二つに分離するだけであるが、反強磁性臨界点に近づくにつれてゆらぎの効果によって、図 3(b) のように反強磁性ベクトル \mathbf{Q} で結びつけられるフェルミ面上の点（ホットスポット）付近でその分離は急激に減少する。また、強磁性臨界点近傍では一様に青と赤のフェルミ面の分離が増大する。また、フェルミ面の有効質量は臨界ゆらぎにより発散的なくりこみの効果を受けるが、青と赤のバンドで符号が逆になる。これらの効果は初めて得られた非自明なものであり、ドハース・ファンアルフェン効果により原理的には観測可能である。その意味で、理論研究者のみならず、実験研究者の興味を引くと考えられ、今後の研究の展開が期待される。

原論文

[Deformation of the Fermi Surface and Anomalous Mass Renormalization by Critical Spin Fluctuations through Asymmetric Spin-Orbit Interaction](#)

[Yukinobu Fujimoto, Kazumasa Miyake, and Hiroyasu Matsuura: J. Phys. Soc. Jpn. **84** \(2015\) 043702](#)

問合せ先：三宅 和正（豊田理化学研究所，大阪大学基礎工学研究科）