

# 固体中のスピン軌道相互作用が引き起こす特異な電子スピン構造

宮本幸治 〈ミュンスター大学〉

木村昭夫 〈広島大学理学研究科〉

奥田太一 〈広島大学放射光科学研究センター〉

空間反転対称性の破れとスピン軌道相互作用に起因する Rashba 効果によってスピン分裂バンドが非磁性体金属および半導体表面などに現れる。さらに最近、波動関数のトポロジーによって物質群の分類がなされ、スピン軌道相互作用が強い物質においては、時間反転対称性によって保護されたトポロジカル絶縁体が大きな注目を集めている。

トポロジカル絶縁体の表面状態は、バルクバンドギャップ中にスピン偏極したフェルミ面が奇数個存在し、トポロジーの異なる Rashba 物質の場合は、偶数個となる。このトポロジーの違いは、スピン軌道相互作用の大きさに依存し、バンドギャップを挟む2つのバルクバンドのパリティが入れ替わることで生じる。これは  $\mathbb{Z}_2$  数と呼ばれるトポロジカル不変量が偶から奇に変化することに対応する。

$\text{Bi}_2\text{Se}_3$  に代表されるトポロジカル絶縁体の表面は、直線的なバンド分散形状を示す、質量ゼロのディラック電子系である。この分散形状と特徴的なスピン構造から、さまざまな新奇物性の発現が期待される。

結晶表面の対称性と電子スピン構造には密接な関係があることが、これまでの研究により徐々に明らかとなってきている。例えば、 $C_{3v}$  結晶表面对称性に影響を受けたディラック電子の電子スピン構造は、異方的なバンド分散形状を示し、面直スピンを生じさせる。この面直スピン成分が電子の後方散乱を増大させスピン緩和時間を短くする。しかしこれまでの研究は、 $sp$  電子系の  $C_{3v}$  結晶表面对称性をもつ物質に限られていた。

一方、 $d$  電子系の物質は、電子の運動エネルギーとクーロン反発の競合（電子相

関）によって、磁性や近藤効果といった多彩な物理現象を引き起こし、特に、 $3d$  遷移元素を含む物質を中心に多くの研究がなされてきた。ごく最近、イリジウム酸化物等が  $5d$  電子系のスピン偏極ディラック表面電子をもつトポロジカル絶縁体として理論的に予言され、電子相関とスピン軌道相互作用の競合する物質として注目を集めている。しかし、 $3d$  電子系の物質に比べ  $5d$  電子系の物質についての研究はごく僅かである。

$W(110)$  は、典型的な  $5d$  電子系で2回対称性 ( $C_{2v}$ ) の表面をもつ。さらに、 $W$  表面上に吸着した  $Mn$  超構造が螺旋スピン構造を示すなど基板の強いスピン軌道相互作用に起因した様々な新奇表面物性について古くから研究が行われていた。このような新奇物性は、 $W(110)$  表面のスピンに依存した電子構造が重要な役割を担っていると考えられるが、それを詳細に研究した報告はこれまでにない。

そこで、我々は独自に開発したスピン角度分解光電子分光装置で測定を行い、 $W(110)$  表面に  $5d$  電子系のスピン偏極ディラック電子が存在することを発見した。しかも、この表面電子は、結晶表面对称性の  $C_{2v}$  に強く影響を受け、波数一方向に強く押しつぶしたような扁平なディラックコーン型の電子構造を示す。

$k \cdot p$  摂動計算を用いた考察から  $C_{2v}$  対称性に強く影響を受けたスピン偏極ディラック電子は、電子の後方散乱を大きく抑制し、 $C_{3v}$  対称性の場合よりもスピン緩和時間を飛躍的に増大させると期待される。この結果はスピンを制御した新奇デバイス作成の物質探査に大きな指針を与える。

## —Keywords—

### トポロジカル不変量：

トポロジカル（位相幾何学的に区別するための不変量。連続変形で変化しない位相不変量である。3次元トポロジカル絶縁体の場合は、バルクバンドのパリティ不変量に対応する。[参照：日本物理学会誌 69 (2014) 286]。

### $k \cdot p$ 摂動計算：

シュレディンガー方程式の波動関数としてブロッホ関数を用いた時に生じる  $k \cdot p$  項を摂動項として取り入れた計算。ブリルアンゾーンの対称点近傍について良い近似となる。特に半導体などで用いられていたが、最近では、トポロジカル絶縁体などでも用いられ、波数の小さい領域において、その電子構造やスピン構造の特徴を再現できている。