

ビスマス薄膜を通して「見る」表面物理学の新展開



伊藤 俊

マールブルク大学
suguru.ito@physik.uni-marburg.de



松田 巖

東京大学物性研究所
imatsuda@issp.u-tokyo.ac.jp

表面物理学は、物理学の諸分野の中でも「直接見る」ことを求め発展してきた点にその独自性がある。その象徴が、走査型トンネル顕微鏡（1986年ノーベル物理学賞）を用いた表面原子構造の観測であろう。一方、光励起で放出される電子を利用した光電子分光（1981年ノーベル物理学賞）により、エネルギー・運動量・スピンすべての情報を分解したバンド構造を直接観測することもできる。物理学の抽象的な概念を、疑いようのない形で描き出すことに表面物理学の醍醐味がある。

近年の表面物理学での一大トピックがトポロジカル物質の研究である。トポロジカル物質は「ねじれた」電子状態をもち、そのねじれに対応した特別な電子状態を表面に作り出す。このトポロジカル表面状態は、系の対称性によって不純物から保護され、無磁場でスピン流を担う驚くべき性質をもつ。表面の数原子層に局在するこの電子状態の研究において、光電子分光による直接観測が大きな力を発揮し、多様なトポロジカル相の存在が実証されてきた。

さらに、トポロジカル物質の研究で重要な役割を果たしてきた元素がビスマスである。安定元素中最大の原子質量をもつビスマスは巨大なスピン軌道結合を有する。これを「ねじる」原動力として、多彩なトポロジカル物質が作り出されている。一方でBi単結晶自体は、その強すぎるスピン軌道結合によってねじれが戻ってしまい、通常の物質であるとされてきた。しかし近年異議が唱えられ、我々はビスマス薄膜中に形成される量子井戸状態を活用して、実験的に困難を極めるビスマスのトポロジー決定に成功した。最近のさらなる理論・実験

研究とともに、ビスマス表面において多様なトポロジカル相が実現していることが解明されつつある。

ビスマス薄膜中の量子井戸状態は、それ自体が表面物理学の歴史的なトピックでもある。半金属であるビスマスのバンドが量子化されることにより、ある膜厚を境に絶縁体化することが半世紀前に予言されていた。電気伝導や光電子分光による測定が行われてきたが、先行研究の間に奇妙な矛盾が残っていた。我々は、高品質なビスマス薄膜の測定により、ビスマスのバンドが量子化によって絶縁化する過程を描き出すことに初めて成功した。量子化モデルと著しく異なる膜厚依存性、そして準位の縮退の観測により、表面状態由来のクーロン反発効果によって薄膜内部の絶縁化が促進されることを明らかにした。この描像は先行研究の矛盾を解決し、表面状態の電子相関による新たなサイズ効果を提示する。薄膜内部の絶縁相が実証されたことで、トポロジカル表面状態の伝導測定が、そしてさらには表面における量子極限での伝導測定が展開できることとなる。奇しくも最近、走査型トンネル顕微鏡により、ビスマス表面における多体電子相が発見されたばかりである。

光電子分光による直接観測を駆使することで、トポロジカル相や絶縁体相の実験的検証について進展がもたらされた。だがこれは次の出発点である。存在が明らかになったトポロジカル相や多体電子相がビスマス表面でどのような応答を示すのか。物性物理学の黎明期から研究されてきたビスマスは、依然新たな物性探求の場を提供し続けている。

用語解説

光電子分光：

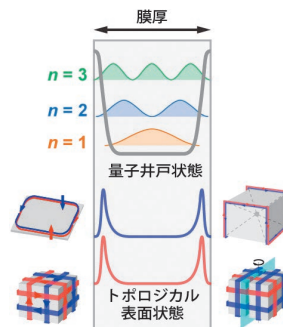
仕事関数以上のエネルギーをもつ光によって放出される光電子の測定を通して、物質の電子状態を調べる実験手法。光電子のエネルギーに加えて放出角度も測定する角度分解光電子分光では、物質内の電子が示すエネルギーと運動量の関係、バンド分散を測定できる。さらに磁性体などのフィルターを用いてバンド分散各点でのスピン偏極度を測定することも可能になっている。

トポロジカル物質：

強いスピン軌道相互作用によってバンドが反転し、通常の物質に比べて「ねじれた」電子状態をもつ物質群。バルク（物質内部）の「ねじれ」に対応して、エッジ（表面、端）にギャップレスな金属状態が出現する。

量子井戸状態：

ナノスケールの薄膜は井戸型ポテンシャルを形成し、その中に形成される離散的な電子状態を量子井戸状態とよぶ。膜垂直方向に分散をもたない2次元な状態である一方、そのエネルギー準位と波動関数形状に、離散化された3次元分散の情報を保持している。



Bi薄膜中に形成される量子井戸状態とトポロジカル表面状態。様々なトポロジカル相の概念図も示す。