

計画研究 C01

空間反転対称性を破る電子流体の新奇界面現象

鄭 国慶 / 岡山大学大学院 自然科学研究科 教授

計画班 C01 は空間反転対称性の破れた超伝導体におけるスピン軌道相互作用の制御と超伝導特性の解明、絶縁体薄膜の作製、トポロジカルクリスタル絶縁体の開発、銅酸化物絶縁体の電場によるドーピング、及び  $\text{PdCrO}_2$  のホール効果の理論計算などに取り組んだ。ここでは、以下の4トピックスについて紹介する。

1. 空間反転対称性の破れた物質におけるスピン軌道相互作用を増大させる新戦略

空間反転対称性の破れた (NCS) 物質でスピン三重項超伝導状態を誘起する鍵はスピン軌道相互作用 (SOC) である。これまでに、SOC を増大させる手立てとして考えられてきたのは、重金属を含む物質を合成することである。しかし、このような指針で設計・合成された  $\text{Mg}_{10}\text{Ir}_9\text{B}_{16}$  や  $\text{LaBiPt}$  などでは、予想に反し、スピン一重項が支配的である [1,2]。最近、鄭・稲田らは、結晶の対称性破れの度合いを制御し、特に重元素間のボンド角を小さくすることがスピン軌道相互作用を最も効果的に増大させられることを明らかにした [3]。図1は  $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$  におけるスピン・格子緩和率  $1/T_1$  とナイトシフトの温度依存性である。  $x < 0.8$  ではエネルギーギャップが等方的で、スピン一重項状態が実現

しているが、  $x > 0.9$  ではエネルギーギャップ関数に線状の節があり、スピン三重項状態が実現していることを示している。研究グループは、このような超伝導状態の推移は  $x=0.8$  を境に結晶構造が急変したことに起因することを明らかにした。図2は  $\text{Pt}(\text{Pd})-\text{Pt}(\text{Pd})$  ボンド角の変化を示す。  $x > 0.8$  ではボンド角が急激に減少することがわかる。研究グループはさらにバンド計算により、この変化は反転対称性の破れの度合いを増しスピン軌道相互作用を増大させた結果、フェルミ面の分裂が大きくなったことを示した。

2. トポロジカル絶縁体:  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  純良薄膜の作製に成功

トポロジカル絶縁体における興味深い表面状態を非分光的手法で直接的に観測することは重要である。安藤・瀬川らは薄膜成長方法の工夫により量子振動が観測される高品質  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜の作製に成功し、その表面状態の振舞いの詳細を観測することに成功した [4,5]。薄膜の厚さを薄くすると上面と下面との表面状態が混成してディラック錐にギャップが開き、表面状態のトポロジカルな保護が解けてトポロジカル相転移が起きる様子をこの高品質薄膜で初めて明らかにすることができた (図3)。

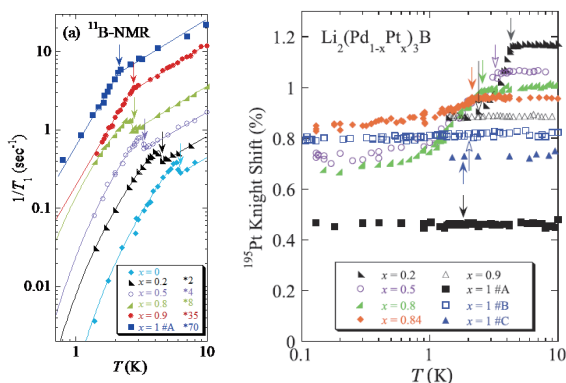


図1:  $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$  におけるスピン・格子緩和率  $1/T_1$  とナイトシフトの温度依存性

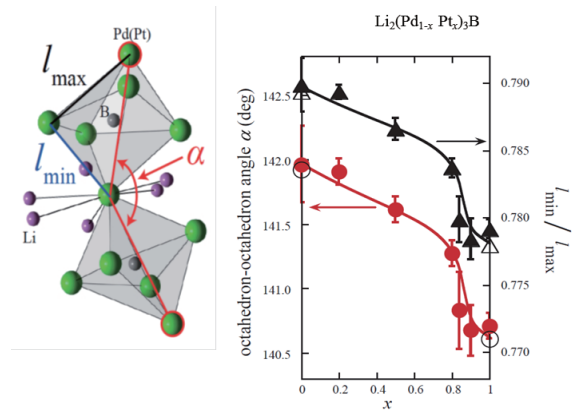


図2: Pt-Pt ボンド角の変化

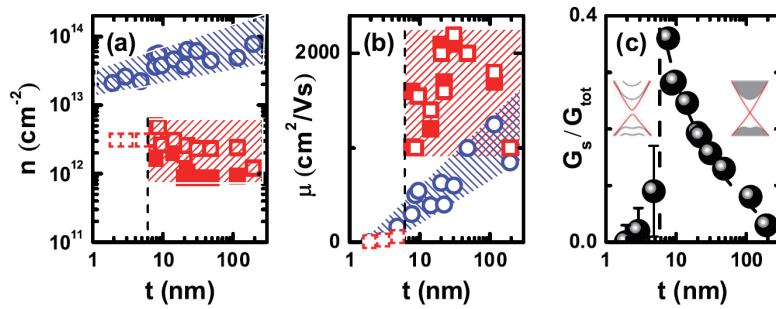


図3：Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 薄膜の輸送特性における (a) 二次元キャリア濃度, (b) 移動度, (c) 全伝導度に対する表面状態の伝導度の割合. 赤色は表面伝導, 青色はバルクの寄与を示す。

### 3. トポロジカル絶縁体：トポロジカルクリスタル絶縁体の発見

これまで三次元トポロジカル絶縁体と呼ばれていたものは時間反転対称性によって保護されたトポロジカル不変量によって特徴づけられていたが、結晶格子の対称性によって保護される表面状態を持つ新種のトポロジカル絶縁体の存在が L. Fu によって提唱された。安藤・瀬川と公募班の佐藤は、SnTe が実際に新種のトポロジカル絶縁体、トポロジカルクリスタル絶縁体であることを単結晶試料の角度分解光電子分光によって明らかにした [6] (図4)。このトポロジカル物質は従来のトポロジカル「周期表」の枠に入らないものであり、類縁の超伝導試料でソフトポイントコンタクト分光にゼロバイアスピークが見られるなど [7]、トポロジカル量子現象の研究に今後新たな舞台を与えることとなる可能性がある。

### 4. 銅酸化物超伝導体の電場制御

野島と上野らは、La をドーピングすることで絶縁体化した YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> の薄膜試料を用いた電気二重層トランジスタ構造において、電場により超伝導を復活させるだけでなく、可逆的に超伝導転移温度を制御すること

に成功した (図5)。さらにホール効果によるキャリア密度の詳細な測定から、電場によりキャリア変調された表面層がより深い領域の電子状態に影響を及ぼし、試料中の比較的広い範囲 (50 nm 程度) でキャリア密度が変わることも見出した。これらの結果は、本実験手法が p 型のモット絶縁体にも有効な静電的ホールドーピング法として機能するだけでなく、電子相関を反映した新たな物理現象を調べるポテンシャルを有することを示している。

- [1] K. Tahara, Z. Li, H. X. Yang, J. L. Luo, S. Kawasaki, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. B 80, 060503(R) (2009).
- [2] K. Matano *et al*, to be published
- [3] S. Harada, J. J. Zhou, Y. G. Yao, Y. Inada, and G.-q. Zheng, Phys. Rev. B 86, 220502(R) (2012).
- [4] A.A. Taskin, S. Sasaki, K. Segawa and Y. Ando, Phys. Rev. Lett. 109, 066803 (2012).
- [5] A.A. Taskin, S. Sasaki, K. Segawa and Y. Ando, Advanced Materials 24, 5581 (2012).
- [6] Y. Tanaka, Z. Ren, T. Sato, K. Nakayama, S. Souma, T. Takahashi, K. Segawa and Y. Ando, Nature Phys. 8, 800 (2012).
- [7] S. Sasaki, Z. Ren, A.A. Taskin, K. Segawa, L. Fu and Y. Ando, Phys. Rev. Lett. 109, 217004 (2012).

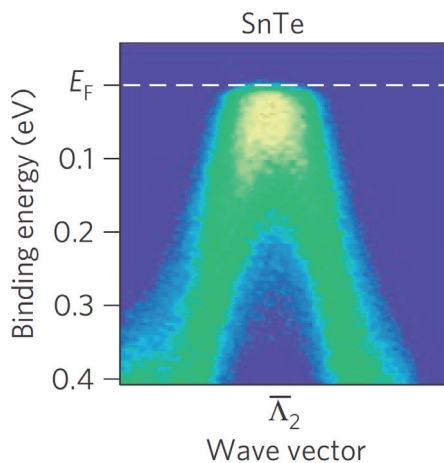


図4：SnTe 単結晶試料で観測された表面状態

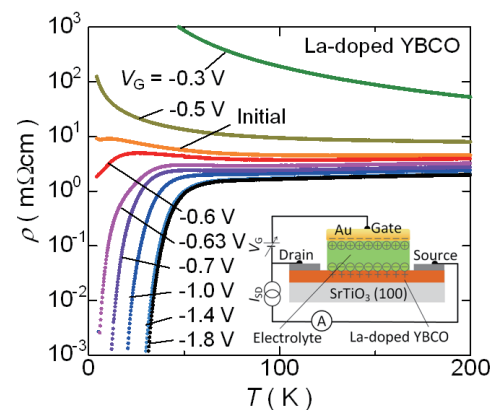


図5：La ドープ YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> を用いた電気二重層トランジスタ構造における超伝導制御