

## 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

### 1. トポロジカル絶縁体 : Pb 系ホモロガス相におけるトポロジカル起源の表面状態の観測

Pb 系ホモロガス相  $(\text{PbSe})_3(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_{3m}$  は通常の絶縁体 PbSe とトポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  とが積層した構造を自然に持つ。安藤、瀬川らは佐藤宇史 (C01 班公募研究) らとの共同研究により、この Pb ホモロガス相でトポロジカルな起源を持つ表面状態を観測した (図 1)。結晶内に自然に形成されるヘテロ結合を利用することは、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観測する新たな手法となる可能性があり、この物質系の今後の研究が注目される。

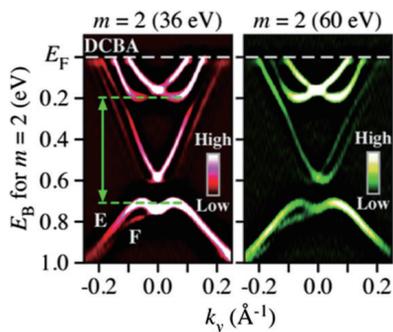


図 1 : Pb 系ホモロガス相  $m = 2$  で観測された表面状態

### 2. トポロジカル超伝導体候補物質の研究

トポロジカル絶縁体  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の層間に Cu をインタカレートすると超伝導が発現するが、超伝導体積分率が低いためにバルクのギャップ対称性はまだ不明になっている。最近、C01 班の鄭、侯野らは同班の安藤、瀬川らが電気化学的に作成した単結晶試料 (超伝導体積分率約 4.0%) を用いてナイトシフト等を測定した結果、この物質は  $d$  ベクトルが  $ab$  面内に向くスピン三重項超伝導状態にあることを強く示唆した。この結果により、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  は DIII に属すトポロジカル超伝導体である可能性が高くなった。

また、トポロジカル結晶絶縁体 SnTe は Sn サイトを In で置換すると超伝導体となる。安藤、瀬川らは気相成長法で得られた  $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  単結晶について、超

伝導相図を新たに見出した [1]。  $T_c$  のドーピング依存性は  $x = 0.038$  を境に変化し、特に低ドーピング側では結晶の乱れが増えるとともに  $T_c$  が上昇する異常な振舞いが見られた。一方、鄭、侯野らは、独自に作成した  $x$  の大きい試料を NMR 法で調べた結果、超伝導ギャップが  $s$  波対称性をもつことを明らかにした (図 2)。これは、 $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  系の超伝導ギャップ対称性に量子相転移の可能性を示唆している。

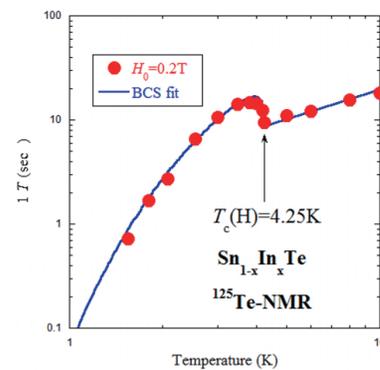


図 2 : ドーピングの大きい  $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  多結晶におけるスピン格子緩和率の温度依存性。

### 3. $\text{SrTiO}_3$ 電場誘起表面伝導の新展開

野島と上野のグループは、 $\text{SrTiO}_3(100)$  面上にイオン液体を用いた電気二重層トランジスタ構造を作製することにより、これまでの電解質を用いた場合に比べ約 7 倍の大きさの電子密度 ( $6.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) までキャリアドーピングを広げること成功し、この高電子密度の金属状態が約 30 K 以下の低温において大きな正 (垂直磁場中) と負 (平行磁場中) の磁気抵抗効果及びそれに伴う異常ホール効果を見出した。これらの結果は、静電的キャリアドーピングが超伝導に加え、磁気秩序を引き起こす可能性を示している。

もう一つの試みとして、 $\text{SrTiO}_3(100)$  表面に加え、(110), (111) 表面を用いた電気二重層トランジスタを作製した。それぞれのデバイスにおいて電場誘起超伝導の観測に成功し、さらに図 3 に示すような結晶方位によって異なる超伝導転移温度のゲート電圧依

存性を得た。表面電場により引き起こされる電子のサブバンド構造が面方位によって違うことから、超伝導転移のふるまいに変化が現れたものと考えられる。それぞれの面方位におけるスピン軌道相互作用の違いにより、強磁場下での超伝導状態も変化するものと期待される。

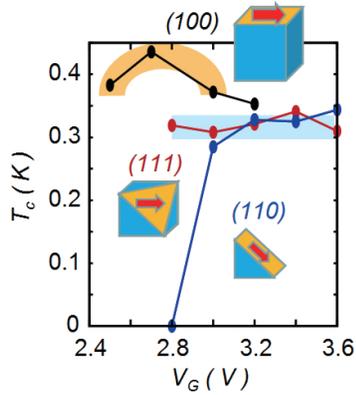


図3：様々な面方位をもつ SrTiO<sub>3</sub> 表面に作成した電気二重層トランジスタにおける電場誘起超伝導転移温度のゲート電圧依存性

#### 4. 空間反転対称性の破れた超伝導体や磁性体の研究

稲田、鄭らは空間反転対称性の破れた超伝導体 Li<sub>2</sub>Pd<sub>3</sub>B と Li<sub>2</sub>Pt<sub>3</sub>B において不純物や乱れによる超伝導 H-T 相図の変化を調べ、両者で極めて対照的な結果を見出した [2]。Li<sub>2</sub>Pd<sub>3</sub>B では T<sub>c</sub> が変化せず H<sub>c2</sub> が増大するのに対し、Li<sub>2</sub>Pt<sub>3</sub>B では明確な対破壊効果が観測された (図4)。Li<sub>2</sub>Pt<sub>3</sub>B の超伝導ギャップにノードが存在する新たな証拠である。さらにスピン軌道相互作用の強い系では不純物や乱れの影響を弱める機構が存在する可能性を示した。

三角格子系 PdCrO<sub>2</sub> においては、Cr<sup>3+</sup> 局在スピンの 120 度構造のノンコリニア反強磁性を示し、様々な異常物性を示す。その起源として、低温で何らかの磁気秩序変調により Berry 位相が獲得されるという提案がされている。獅子堂らは第一原理計算で得られたフェルミ面に基づき、PdCrO<sub>2</sub> のホール効果の解釈

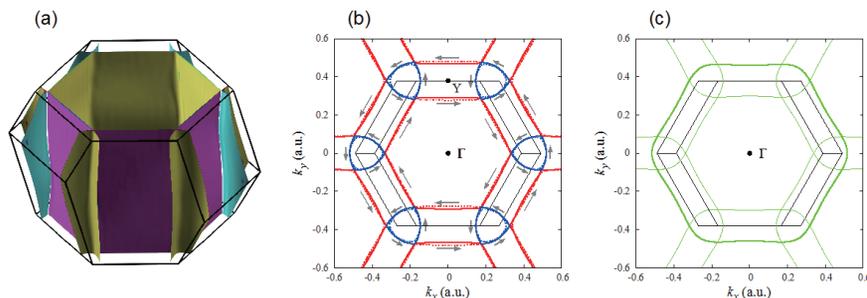


図5：(a) PdCrO<sub>2</sub> のフェルミ面。(b)  $k_z=0$  でのフェルミ面の断面。周期的ゾーン形式を採用。矢印は  $z$  方向に磁場をかけた際のサイクロトロン運動の様子を表す。(c) 非磁性 PdCoO<sub>2</sub> のフェルミ面断面を  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  周期で折り畳んだもの。

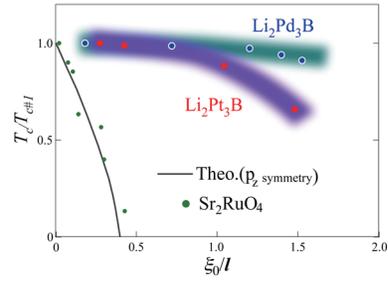


図4：Li<sub>2</sub>Pd<sub>3</sub>B と Li<sub>2</sub>Pt<sub>3</sub>B の T<sub>c</sub> の  $\xi_0/l$  依存性。縦軸は T<sub>c</sub> の変化率、 $\xi_0$  はコヒーレンス長、 $l$  は平均自由行程。図中に Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> や p<sub>2</sub> 対称性のギャップ関数を仮定した計算結果を示す。

を与えた [3]。図5に示すように、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  長周期磁気秩序からくるバンドの折り畳みの結果、フェルミ面は  $\Gamma$  点まわりの大きな六角柱 (ホール面) とゾーンをまたぐ小さな三角柱 (電子面) からなる。磁気秩序による空間反転対称性の破れから伝導バンドはスピン分裂し、スピン軌道相互作用により電子面・ホール面の交点に小さなギャップが開く。その結果、低磁場では電子軌道とホール軌道のホール抵抗への寄与が競合するが、高磁場では Magnetic Breakdown による巨大軌道が出現しホール抵抗が著しく変化する。

[1] M. Novak, S. Sasaki, M. Kriener, K. Segawa and Y. Ando, Phys. Rev. B **88**, 140502 (2013).

[2] G. Bao, Y. Inada, G. Eguchi, Y. Maeno, M. Ichioka, and G.-q. Zheng, Physica C **494**, 95 (2013).

[3] J. M. Ok, Y. J. Jo, K. Kim, T. Shishidou, E. S. Choi, H.-J. Noh, T. Oguchi, B. I. Min, and J. S. Kim, Phys. Rev. Lett. **111**, 176405 (2013).