

モット絶縁体とスピンホール絶縁体：普通でない絶縁体の物理の究明

Mott Insulator and Spin Hall Insulator

: Elucidating the Physics of Nontrivial Insulators

安藤 陽一 (ANDO YOICHI)

大阪大学・産業科学研究所・教授



研究の概要

近年、有用な物性発現の舞台となる特異な絶縁体が物理学の重要な研究対象となっている。本課題では、キャリア添加によって高温超伝導を示す「モット絶縁体」と、バンド構造の位相幾何学的特徴によって表面にスピン偏極した金属的状态が現れる「スピンホール絶縁体」を対象とし、高度なドーピング制御による試料作製と精密物性測定を組合わせてその物性解明を行う。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：強相関系、スピンホール効果、トポロジカル絶縁体

1. 研究開始当初の背景

絶縁体は古くて新しい材料である。例えば電子間の強いクーロン斥力のために電気が流れなくなったモット絶縁体にキャリアを添加すると、普通の金属まで変化する途中で高温超伝導などの“巨大物性”が現れる。しかしそのとき電子系がどのような変遷を辿ってそうなるのかはまだよくわかっていない。また、スピン軌道相互作用によってギャップが開いている絶縁体は、価電子帯が持つベリー位相の存在のために電場によってスピン流を誘起できる「スピンホール絶縁体」である可能性が理論的に予想されている。もしそのような絶縁体の実在すれば、新原理による超省エネルギー型スピントロニクス・デバイスの開発が可能になる。

2. 研究の目的

普通でない絶縁体材料に関する上記の重要問題、即ち「モット絶縁体はキャリア添加によってどのように金属に転移するか」と「スピンホール絶縁体は実在するか」を、研究代表者の持つドーピング制御技術と輸送特性測定技術を活かして、実験的に追及する。

3. 研究の方法

(1) モット絶縁体の研究に関しては、両極ドーピングが可能であることを研究代表者らが発見した銅酸化物である $(Y,La)(Ba,La)_2Cu_3O_y$ について重点的に研究を実施している。特に独自の酸素アニール装置を用いて酸素量を

精密に制御することにより、世界で初めて、電子ドーピング側と正孔ドーピング側の両方をまたぐ試料の作製が同一の銅酸化物系において実現できたので、ゼロドーピング状態を境に物性がどう変わるかを、輸送特性、光電子分光、中性子散乱を組み合わせて調べている。

(2) スピンホール絶縁体に関しては、これまでに PbS 、 $Bi_{1-x}Sb_x$ 、 Bi_2Se_3 について、組成を高度に制御した単結晶試料を作製し、磁気輸送特性の精密測定を行った。このうち特に $Bi_{1-x}Sb_x$ と Bi_2Se_3 は、新しいトポロジカル不変量で特徴づけられる「トポロジカル絶縁体」であることが最近明らかになり、大きな注目を集めている。そこでこのトポロジカル絶縁体特有のスピン偏極表面状態を量子振動効果などの実験によって調べるとともに、表面におけるスピン偏極に起因する新現象を探索している。

4. これまでの成果

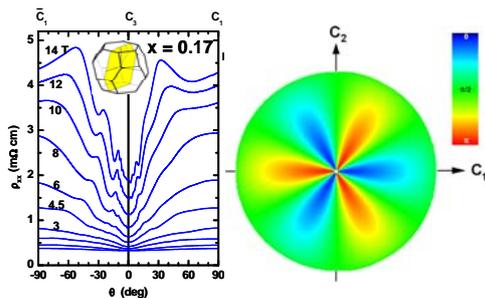
(1) トポロジカル絶縁体とも呼ばれるようになった量子スピンホール絶縁体 $Bi_{1-x}Sb_x$ における金属的表面状態を量子振動効果によって観測することに世界で初めて成功した。この成果は*Physical Review B*誌における注目論文として*Editor's Suggestion*に選ばれた。また本成果により、2010年3月の米国物理学会と日本物理学会の両方でシンポジウム講演を行った。

(2) スピン分解光電子分光の専門家である東大物性研の松田巖准教授と共同で、 $Bi_{1-x}Sb_x$

表面状態のスピンの偏極を初めて完全に決定することに成功した。この成果も *Physical Review B* 誌の Editor's Suggestion に選ばれた。

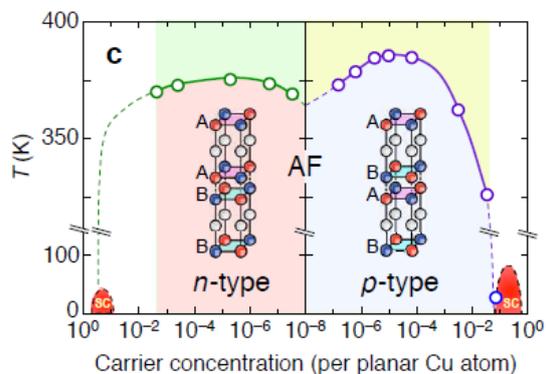
(3) 世界最高のキャリア移動度を持つ $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 高品質単結晶試料について磁気輸送特性の精密測定を行い、2次元表面状態に起因する新しい角度依存磁気抵抗振動現象を発見した。

(4) 角度依存磁気抵抗振動の詳細な解析によって、 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 表面金属状態のスピンのテクスチャに起因すると考えられる量子位相の異常な磁場角度依存性を発見した (下図)。



[図の説明: $\text{Bi}_{0.83}\text{Sb}_{0.17}$ における量子位相の異常な磁場角度依存性。高対称軸周りでの角度依存磁気抵抗に現れた非対称性 (左図) は、量子位相が三回対称軸をまたいで π シフトしている (右図) ためであることがわかった。]

(5) 輸送特性測定と中性子散乱を組合わせた $(\text{Y},\text{La})(\text{Ba},\text{La})_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の実験により、真のモット絶縁体状態では電子ドーピングと正孔ドーピングの間の「競合」が起こっており、このため、ゼロドーピング状態ではわずかにキャリアがいるときに比べて反強磁性転移温度 T_N がやや低くなり、しかも反強磁性相における磁気構造は電子側と正孔側で突然変化する、という予想外の結果を得た。また輸送特性も電子側と正孔側で非対称であり、特に磁気秩序がキャリアの間伝導に与える影響が電子と正孔で異なっていることもわかった (下図)。



[図の説明: $(\text{Y},\text{La})(\text{Ba},\text{La})_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ で明らかになった反強磁性転移温度 T_N のキャリア濃度依存性と、正孔ドーピング側と電子ドーピング側それぞれにおける磁気構造の概略図。ゼロドーピング状態近傍で T_N が予想外の極小を示すことがわかった。]

(6) 低キャリア濃度の PbS 単結晶試料において、表面平行な磁場中で表面伝導層が形成される「静的表皮効果」が関与する、予想外の角度依存磁気抵抗ピーク効果を発見した。

5. 今後の計画

(1) 研究代表者が既に高品質単結晶育成技術を確立している $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ と Bi_2Se_3 のバルク単結晶を用いて、トポロジカル絶縁体の基礎物性を解明する。

(2) 現在試作しているデバイス構造をベースにして、トポロジカル絶縁体表面におけるスピンの輸送特性による直接観測を目指す。

(3) 理論的にトポロジカル絶縁体の存在が予想されている三元系カルコゲナイドやホイスラー化合物などにおいて、新しいトポロジカル絶縁体を探索する。

(4) トポロジカル絶縁体を舞台にした新奇現象や、「トポロジカル超伝導体」の探索および検証を行う。

(5) $(\text{Y},\text{La})(\text{Ba},\text{La})_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の電子ドーピング側における物性の詳細を調べる。

6. これまでの発表論文等

(1) K. Eto, A. A. Taskin, K. Segawa, Y. Ando, Spin-orbit coupling and anomalous angular-dependent magnetoresistance in the quantum transport regime of PbS , *Physical Review B* **81** (Rapid Communications), 掲載決定済, 2010.

(2) A. Nishide, A. A. Taskin, Y. Takeichi, T. Okuda, A. Kakizaki, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, Y. Ando, I. Matsuda, Direct mapping of the spin-filtered surface bands of a three-dimensional quantum spin Hall insulator, *Physical Review B* **81**, 041309(R)-(1-4), 2010.

(3) A. A. Taskin, Y. Ando, Quantum oscillations in a topological insulator $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, *Physical Review B* **80**, 085303-(1-6), 2009.

(4) F. F. Balakirev, J. B. Betts, A. Migliori, I. Tsukada, Y. Ando, G. S. Boebinger, Quantum phase transition in the magnetic-field-induced normal state of optimum-doped high- T_c cuprate superconductors at low temperatures, *Physical Review Letters* **102**, 017004-(1-4), 2009.

(5) A. N. Pasupathy, A. Pushp, K. K. Gomes, C. V. Parker, J. Wen, Z. Xu, G. Gu, S. Ono, Y. Ando, A. Yazdani, Electronic origin of the inhomogeneous pairing interaction in the high- T_c superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, *Science* **320**, 196-201, 2008.

ホームページ等

http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/fmc/wakate_s.html