

強相関半金属で直接観測するフェルミノード状態

近藤 猛、中辻 知、辛 埴

概要:

これまでの物性研究の主な舞台は、電子相関とスピン軌道相互作用のどちらか一方を有する物質にあった。強い電子相関と強いスピン軌道相互作用の両者を兼ね備えた電子系は未開拓であり、新奇なトポロジカル量子相が理論予想されることから、次なるフロンティアとして注目されている。その候補物質として、 $5d$ 軌道を有する遷移金属イリジウム酸化物が期待されている[1-5]。 $3d, 4d, 5d$ へと電子軌道が広がると電子相関は弱くなるが、一方で、原子量の増大によりスピン軌道相互作用が強くなる。電子相関とスピン軌道相互作用の両者が同程度のエネルギースケールを持って競合するイリジウム酸化物 $5d$ 電子系は、今大変注目される新しい研究分野である。本研究では、角度分解光電子分光を用いた電子構造の直接観察から、パイロクロア型イリジウム酸化物 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ が、立方結晶対称性と時間反転対称性に守られて実現するフェルミノード状態を有することを見出した。2 次曲線的分散を持つ価電子バンドと伝導バンドがフェルミ準位上一点で接する 4 重縮退点を持つフェルミノード状態が強相関電子系で成り立つ $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ では非フェルミ液体状態が期待される。本研究の結果から、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は、トポロジカル絶縁体が初めて確認された物質として知られる HgTe の強相関バージョンであり、新奇な強相関トポロジカル量子相(トポロジカル Mott 絶縁体、ワイル半金属、量子スピン及び異常ホール効果)を発現しうる母体物質だと言える。

研究結果:

トポロジカル絶縁体の発見[1-4]に続く次なる物質科学のフロンティアが、スピン軌道相互作用と強相関が共に重要となる物質群に対し期待されている[5-11]。その中でも特に、 $5d$ 遷移金属の一種で立方晶構造を持つパイロクロア型イリジウム酸化物($\text{A}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$)は[12,13]、トポロジカル絶縁体の発現に不可欠であるバンド反転と $5d$ 軌道由来の強相関を併せ持つとの理論予想で注目を集めている[8,11]。この一連物質が描く電子相図において、 A サイトのイオン半径が最大となる $A=\text{Pr}$ と Nd の間で強相関由来の反強磁性量子臨界点の存在が示唆されており、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ はそれへ

の漸近状態にあると考えられる[13,14]。 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の特徴として、上記するパイロクロア型イリジウム酸化物の中で唯一、常磁性と遍歴性を最低温まで保持する。また、Bad metal 的振る舞いと非自明な自発的ホール伝導を示すことから、強相関電子系だと示唆される[6,14,15]。熱力学的測定による最近の研究から、ゼロ磁場下で量子臨界状態が示された点でも $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は注目されている[16]。

図 1 に示す理論計算から[10]、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は Γ 点において、2 次曲線的分散を持つ伝導バンドと価電子バンドがフェルミ準位一点で接して 4 重縮退するフェルミノードを持つことが予想される[17]。このノード状態は、対称性と群論からの要請で形成されるが、縮退点がフェルミ準位に位置するか否かは推測の範疇を超えないため、実験的実証が必要である。トポロジカル絶縁体を初めて実証したことで知られる HgTe は[18,19]、数学的にこれと同様のフェルミノード状態を実現する。もし理論予想が正しければ、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ はその強相関バージョンであり、様々なトポロジカル量子相へ遷移可能となる(図 1 参照)。フェルミノード半金属では、長距離クーロン相互作用による変調を強く受けるため、非フェルミ液体状態が期待されている。もしフェルミノード状態が実証されれば、 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ は強相関トポロジカル量子相と非フェルミ液体を発現しうる母物質だと言える。

角度分解光電子分光は物質の電子構造を直接観察できる強力な実験手法である。一つのフォトンエネルギーで励起される光電子の面直方向の波数 k_z は一つの値に対応するため、固定した入射フォトンエネルギーを用いて観測されるブリルアンゾーンは、ある k_z で切り取られる k_x - k_y 面に制限される[図 2(a)]。よって、3D ブリルアンゾーン全域を観察するためには、フォトンエネルギーを走査する必要がある。フェルミノードを同定するため我々は、様々なフォトンエネルギーで ARPES スペクトルを測定した。光は劈開面である(111)面に照射して測定したため、フォトンエネルギーを変えつつ観測される運動量カットは、 Γ , L , K 点を横切る面内で[111]方向に移動する。最も重要な結果として我々は、放物的なバンド分散が入射フォトンエネルギーの増大と共にフェルミ準位へ近づき、さらにはフェルミ準位に接する振る舞いを観察した[図 2(d)]。フォトン



- [9] W. W.-Krempa, G. Chen, Y. -B. Kim and L. Balents, *Annual Review of Condensed Matter Physics* **5**, 57 (2014).
- [10] E.-G. Moon, C. Xu, Y. B. Kim and L. Balents, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 206401 (2013).
- [11] X. Wan, A. M. Turner, A. Vishwanath and S. Y. Savrasov, *Phys. Rev. B* **83**, 205101 (2011).
- [12] D. Yanagishima and Y. Maeno, *J. Phys. Soc. Jpn.* **70**, 2880 (2001).
- [13] K. Matsuhira et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **76**, 043706 (2007).
- [14] S. Nakatsuji et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 087204 (2006).
- [15] Y. Machida et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 057203 (2007).
- [16] Y. Tokiwa, J. J. Ishikawa, S. Nakatsuji and P. Gegenwart, *Nature Mat.* **13**, 356 (2014).
- [17] K. Sun, H. Yao, E. Fradkin and S. A. Kivelson, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 046811 (2009).
- [18] B. A. Bernevig, T. L. Hughes and S.-C. Zhang, *Science* **314**, 1757 (2006).
- [19] C. Brüne et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 126803 (2011).
- [20] T. Kondo et al., *Nature communications* **6**, 10042 (2015).

