

持つ(現在得られる最も良い単結晶試料でも Nd/Ir 比は ~1% ずれる)。この Nd/Ir 比が ~2% ずれている単結晶試料の電気抵抗の温度依存性を図 2(a) 挿入図に示す。組成ずれが無い $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 粉末サンプルの相転移温度 ($T_N = 33$ K) と比べると、金属・絶縁体転移はおよそ 20 K に減少しているが、それでも T_N で抵抗率はおよそ 3 桁上昇する。このため、Nd/Ir 比が ~2% 程度ずれているサンプルにおいても $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における金属・絶縁体転移の本質をとらえていると考え、磁気抵抗と磁化の測定を行った。

図 2(a) およびその挿入図に、定常磁場およびパルス磁場下で得られた抵抗の磁場変化および温度変化を示す。この図に見られるように、~10 T の磁場を [001] 方向に印加することで金属・絶縁体転移を誘起できる。これは、電荷ギャップが 500 K 程度⁴ であることを考えると、2 桁程度小さなエネルギースケールの磁場で、ギャップを消失させたことになる。図 2(b) は様々な温度や磁場下での抵抗測定から得られた、 $H//[001]$ の磁場・温度相図である。一般的な反強磁性相で見られるように、 T_N は磁場の印加により単調減少していることが確認できる。この金属・絶縁体転移の振る舞いは、磁場印加方向を [001] から [110] 方向に傾けることで大きく変化する(図 2(b))。[001] 方向からおよそ 15° 磁場印加方向を変化させると、3 桁程度の大きな負の磁気抵抗は消失し、 $H//[110]$ 方向ではヒステリシス現象も見られなくなる。これらのデータは、立方晶のパイロクロア化合物で異方的な磁気抵抗が存在し、 $H//[001]$ 方向のみ金属・絶縁体転移を抑制できることを示している。このような磁気抵抗の角度変化から得られた磁場・温度相図を図 2(d) に示す。 $H//[001]$ 方向では磁場印加により金属相が誘起されるが、印加磁場が [001] 方向からずれると金属・絶縁体転移は起こらない。

この異方的な磁気抵抗は、磁場印加方向によって、異なる磁気構造が出現しているためと理解できる(図 1(b)-(d))。実際、我々の磁化測定から $H//[001]$, $H//[111]$, $H//[110]$ のとき飽和磁化の大きさがそれぞれ 1.4, 1.2, 1.1 μ_B/Nd となっていることが判っており、これは Nd モーメント (2.37 μ_B) が四面体の中でイジング的にふるまったときに期待できる磁化の飽和値と一致する ($H//[001]$, $H//[111]$, $H//[110]$ のとき 1.4, 1.2, 0.9 μ_B/Nd が予想される)。これから、図 1(b-d) にあるように、 $H//[001]$ では Nd モーメントが 2I2O 構造、 $H//[111]$ および $H//[110]$ では 3I1O 構造を取っていることを実験的に確認した。このような複数の磁気構造をもつ Nd の磁気モーメントと、遍歴性を持つ Ir5d 伝導電子との間に相互作用があれば、Nd モーメントの磁

気構造の変化により Ir5d 電子物性も変化が期待できる。議論の詳細は原論文に委ねるが[1]、局在した Nd のモーメントと Ir の 5d 電子間の相互作用(近藤相互作用)を取り入れることにより、 $H//[001]$ 方向ではギャップが閉じた金属状態になること、 $H//[111]$ 方向ではギャップが開いたままで絶縁体となることを理論的に示した。従って、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ で観測された磁場印加方向に敏感な磁気抵抗は磁気秩序の磁場変化が原因であると考えられる。

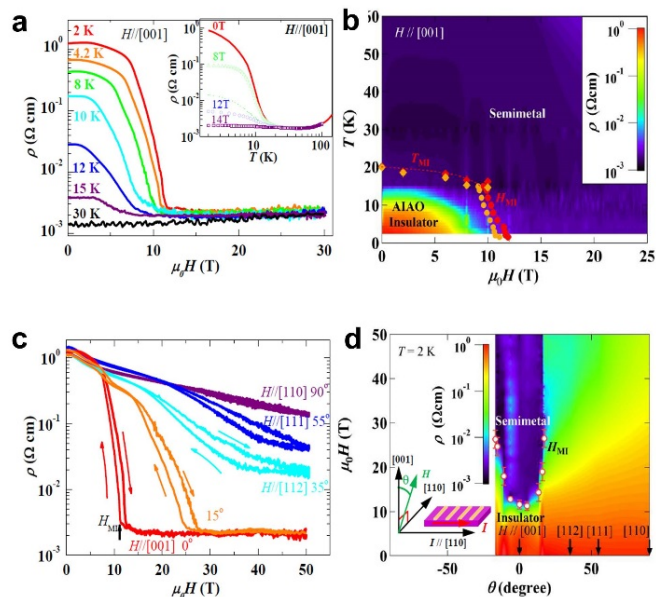


図 2 (a) $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の磁気抵抗 ($H//[001]$)。挿入図: 抵抗の温度依存性。(b) $H//[001]$ における $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の磁場・温度相図。(c) 2 K における磁気抵抗の角度変化。(d) $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の角度・磁場相図。

まとめ

本稿で紹介した $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ における異方的な金属・絶縁体転移は、特にスピン・軌道相互作用が大きな 5d 電子を持つモット絶縁体の金属・絶縁体転移を理解する上で重要と考えられる。未解決の課題は幾つかあり、例えばパイロクロア型イリジウム化合物で示唆されているワイル金属状態[4]が $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ において実現しているかに興味を持たれる。これについては様々な研究が展開されているが、例えば極限コヒーレント光科学研究センターでは、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ と類似の電子状態を持つ $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ において、放物線上の分散を持つバンドがフェルミ準位において接している四準縮退点(フェルミノード)を観測している[6]。さらに最近では、このフェルミノードが $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の常磁性金属状態においても確認された[7]。このフェルミノード状態で AIAO 秩序を示すと、理論的にはワイル半金属状態となることが予想されており[5]、 $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の低磁場相はワイル

半金属状態と考えるのが妥当と考えられている。今後はホール効果や量子振動の観測などにより、Nd₂Ir₂O₇ のワイル半金属状態を実証できる研究が待たれている。

謝辞

本研究は東京大学物性研究所中辻研究室の富田崇弘博士、石川洵様、カリフォルニア大学の石塚大晃博士、T. H. Hsieh 博士、L. Balents 博士らを含めた共同研究の成果です。特に理論計算は、石塚大晃博士、T. H. Hsieh 博士、L. Balents 博士らにより行われており、また多くの有用なアドバイスを頂きました。中辻研究室の富田崇弘博士、石川洵様らには試料合成や実験結果への議論など、様々な面で協力を頂きました。そして極限環境物性研究部門の長田俊人先生にはプラスチック製回転プローブの製作時に、有益な助言を頂きました。皆様に、この場を借りてお礼申し上げます。

- [1] Z. Tian, Y. Kohama, T. Tomita, H. Ishizuka, T. H. Hsieh, J. Ishikawa, K. Kindo, L. Balents, and S. Nakatsuji, *Nature Physics* **12** 134 (2016).
- [2] Z. Tian, Y. Kohama, T. Tomita, H. Ishizuka, T. H. Hsieh, J. Ishikawa, H. Mario, K. Kindo, and S. Nakatsuji, *Journal of Physics: Conference Series* **683**, 012024 (2016).
- [3] 小濱芳允, Zhaoming Tian, 富田崇弘, 石川洵, 金道浩一, 中辻知, 石塚大晃, *固体物理* **51** 339 (2016).
- [4] K. Ueda, J. Fujioka, Y. Takahashi, T. Suzuki, S. Ishiwata, Y. Taguchi, and Y. Tokura, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 136402 (2012).
- [5] X. Wan, A. M. Turner, A. Vishwanath, and S. Y. Savasov, *Phys. Rev. B* **83** 205101 (2011).
- [6] T. Kondo, M. Nakayama, R. Chen, J. Ishikawa, E. –G. Moon, T. Yamamoto, Y. Ota, W. Malaeb, H. Kanai, Y. Nakashima, Y. Ishida, R. Yoshida, H. Yamamoto, M. Matsunami, S. Kiura, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, S. Nakatsuji, L. Balents, and S. Shin, *Nature Communications* **6**, 10042 (2015).
- [7] M. Nakayama, Takeshi Kondo, Z. Tian, J. J. Ishikawa, M. Halim, C. Bareille, W. Malaeb, K. Kuroda, T. Tomita, S. Ideta, K. Tanaka, M. Matsunami, S. Kimura, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, L. Balents, S. Nakatsuji, and S. Shin, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 056403 (2016).