

## 局在性と遍歴性の二面性が生み出す電気四極子由来の新奇な低温電子状態

本研究では、四極子自由度が活性な物質である  $\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$  における極低温高磁場下輸送係数測定により、低温にみられる4つの特異な電子状態における遍歴的性質が、いずれもその対極にある局在的な結晶場基底状態の性質で説明できることを突き止めた。これは、この系が遍歴・局在という二面性をもち、その双対性が新奇物性を生み出していることを如実に表しており、これまで実験的に明らかではなかった四極子自由度と特異な遍歴電子状態との関係の理解を深めるものである。さらにこの結果をもとに四極子自由度により創出される新奇物性を統一的に理解するための概念的相図が提案された。

固体中の電子が強いクーロン相互作用により互いに反発しあう系、すなわち強相関電子系では、電子のもつ電荷・スピン・軌道の3つの内部自由度に由来した多種多様な物理現象が発現する。特に希土類化合物やアクチノイド化合物といった  $f$  電子を含む元素からなる物質群 ( $f$  電子系) では、伝導電子と局在した  $f$  電子との混成 ( $c$ - $f$  混成) によって電子が遍歴と局在という二面性を獲得し、その双対性に起因して、重い電子、磁気秩序、非フェルミ液体的挙動、非従来型超伝導などの興味深い現象が現れる。これらの現象の多くは、 $f$  電子のスピン自由度にその起源を持つことが知られている。ここで注目すべきは、非従来型超伝導や非フェルミ液体的挙動が磁気量子臨界点、すなわち磁気秩序から非磁性フェルミ液体に基底状態が移り変わる点近傍で見られることからわかるように、局在  $f$  スピンが伝導電子と混成することにより遍歴性を獲得してゆく中で新奇現象や重要な概念が創出されているということである。そしてその多くは  $c$ - $f$  混成強度を横軸、温度を縦軸にとったドニアック相図と呼ばれる普遍的な相図に基づいた議論により統一的に理解されてきた。このようにスピン自由度に由来する強相関電子系の理解に、このドニアック描像は重要な役割を果たしている。

一方、電子には電荷・スピン以外に、軌道の自由度が存在する。 $f$  電子系では、スピン軌道相互作用が強い場合、軌道自由度はスピンと合わせて多極子として表現され整理される。スピンの場合と同様に、この多極子（軌道）自由度が活性な系で出現する電子状態についても興味をもたれるが、これまで多極子秩序を除いてあまり研究例はなかった。特に、 $c$ - $f$  混成により多極子が遍歴性を獲得してゆく中でどのような電子状態が実現するのか、そしてそれらはどのように理解すれば良いか、ほとんど明らかではなかった。

最近、東京工業大学理学院のメンバーを中心とするグループは、電気四極子の自由度が活性なプラセオジウム ( $\text{Pr}$ ) 化合物  $\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$  の極低温高磁場環境下における輸送係数の測定をおこない、その結果をもとに磁場・温度相図を構築した (図1)。さらに得られた相図およびそこに見られる4つの特異な電子状態の磁場方向に対する異方性から、それら4つの電子状態に見られる遍歴的性質が、その対極にある局在した  $f$  電子の結晶場基底状態 (非クラマース二重項) の磁場によるエネルギー分裂幅  $\delta(B)$  により決まっていることを突き止めた。これは、この系が遍歴性と局在性の二面性をもち、その双対性が新奇物性を生み出していることを如実に表しており、これまで実験的に明らかではなかった非クラマース二重項のもつ四極子自由度と特異な遍歴電子状態との関係を明らかにするものである。さらにこのことから四極子自由度により創出される新奇物性の統一的理解には、スピン自由度の場合に議論されていたドニアック描像ではなく、別の枠組みが必要であることを指摘し、そのための概念的な相図を提案している。

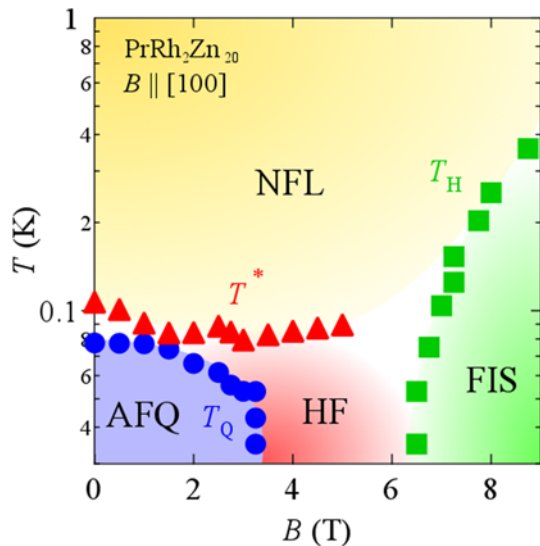


図 1 [100]方向に磁場をかけた時の  $\text{PrRh}_2\text{Zn}_{20}$  の温度・磁場相図。NFL、AFQ、HF、FIS はそれぞれ非フェルミ液体状態、反強四極子秩序状態、新奇重い電子状態、磁場誘起結晶場一重項状態を表す。

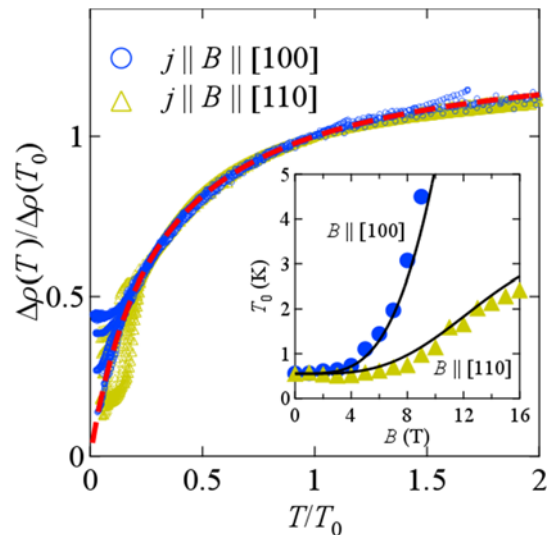


図 2 電気抵抗率に見られるスケーリング。破線は四極子近藤格子モデルに基づく計算結果。挿入図は[100]方向と[110]方向に磁場をかけた時の特性温度  $T_0$  の磁場依存性。実線は  $T_0$  を  $\delta(B)$  で表した表式を用いた計算結果である。

この成果は、日本物理学会が発行する英文雑誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2017 年 4 月号に掲載された。

輸送係数の測定は、 $-272^\circ\text{C}$  (1 ケルビン) 以下の極低温で行われた。その結果、図 1 に示すように最低温付近において反強四極子秩序 (AFQ) 状態、新奇重い電子 (HF) 状態、磁場誘起結晶場一重項 (FIS) 状態に加え、それらの高温側に非フェルミ液体 (NFL) 状態が広がっていることが明らかになった。特に、NFL 状態では電気抵抗率の温度依存性がある特性温度  $T_0$  によりスケールし、そのスケーリング曲線が四極子近藤格子モデルに基づく理論式と非常に良く一致することを見出した (図 2)。これらの特徴は、関連物質である  $\text{PrIr}_2\text{Zn}_{20}$  においても見られることから、四極子自由度が活性な系に共通した特徴であると考えられる。さらに本研究では、図 2 挿入図に示すように、 $T_0$  が磁場方向に関して異方的な磁場依存性を示すこと、そして、その  $T_0$  に見られる異方性が、磁場依存性も含めて、非クラマース二重項のエネルギー分裂幅  $\delta(B)$  を用いて再現できることを初めて明らかにした。これは、輸送係数に関わる「遍歴」電子のエネルギースケールが、「局在」状態の性質、つまり四極子自由度により決まっていることを明確に示している。さらに、NFL 状態以外の 3 つの状態においても同様に非クラマース二重項のエネルギー分裂幅  $\delta(B)$  でその電子状態が特徴付けられることも明らかとなった。このことは、この系における電子状態が  $\delta(B)$  により統一的に整理できる可能性を示唆している。

本研究において、これまで未解明であった四極子自由度と特異な遍歴電子状態の関係が明らかになり、 $\delta(B)$  を用いて電子状態を整理した概念的な相図が提案されたことは、今後の四極子自由度により創出される電子物性研究の進展のきっかけになると期待される。そして、四極子由来の新奇物性の発見やスピンにおけるドニアック描像のような多極子の物理における普遍的描像の確立など、今後の研究の展開が期待される。

## 原論文

[Anisotropic  \$B\$ - \$T\$  Phase Diagram of the Non-Kramers System  \$\text{PrRh}\_2\text{Zn}\_{20}\$](#)

Taichi Yoshida, Yo Machida, Koichi Izawa, Yuki Shimada, Naohiro Nagasawa, Takahiro Onimaru, Toshiro Takabatake, Adrien Gourgout, Alexandre Pourret, Georg Knebel, and Jean-Pascal Brison: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86**, 044711 (2017).

問合わせ先：吉田 太地（東京工業大学理学院）  
井澤 公一（東京工業大学理学院）