

## EuNi<sub>2</sub>P<sub>2</sub> の重い電子状態は、やはり近藤効果か？

希土類化合物の 4f 電子の局在モーメントと伝導電子のスピンとは、磁氣的交換相互作用を通して、Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) 相互作用がはたらき、磁気秩序が起きる。4f 電子数が多くなるにつれて磁気秩序温度は増大し、4f<sup>7</sup> の Gd 化合物、あるいは 2 価の Eu 化合物で最大値をとり、4f<sup>1</sup> の Ce や 4f<sup>13</sup>、すなわち充足の 14 個より 1 個不足している Yb 化合物で最小となる。Ce や Yb 化合物では上述の磁氣的交換相互作用を通じた近藤効果が優勢になり、重い電子異常が起きることはよく知られたことである。すなわち、近藤温度  $T_K$  以下では 4f 電子の局在モーメントは伝導電子のスピンによって遮蔽され、それを通して局在 4f 電子は伝導電子と一体となって結晶中を遍歴し、重い電子系が形成される。重い電子系の形成過程はいろいろな物性に反映されるが、熱膨張、すなわち試料の体積  $V$  の相対変化  $\Delta V/V$  は、磁気秩序のない重い電子系 CeRu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> では降温とともに  $T_K$  ( $= 20$  K) 以下で著しく収縮することが知られている。

EuNi<sub>2</sub>P<sub>2</sub> は ThCr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> 型の正方晶の化合物で、メスbauer分光から、室温付近では 2 価に近い電子状態であることが報告されている。つまり、4f<sup>7</sup> でスピン角運動量  $S = 7/2$ 、軌道角運動量  $L = 0$  なので、Gd と同じ磁性状態である。ところがこれは一定ではなく、100 K 以下から降温とともにこれが 3 価へと近づくことが明らかにされている。3 価のときは 4f<sup>6</sup> なので  $S = L = 0$  で、全角運動量  $J = 0$  の非磁性状態である。驚くべきことは、高温ではこの物質中の Eu 原子の電子状

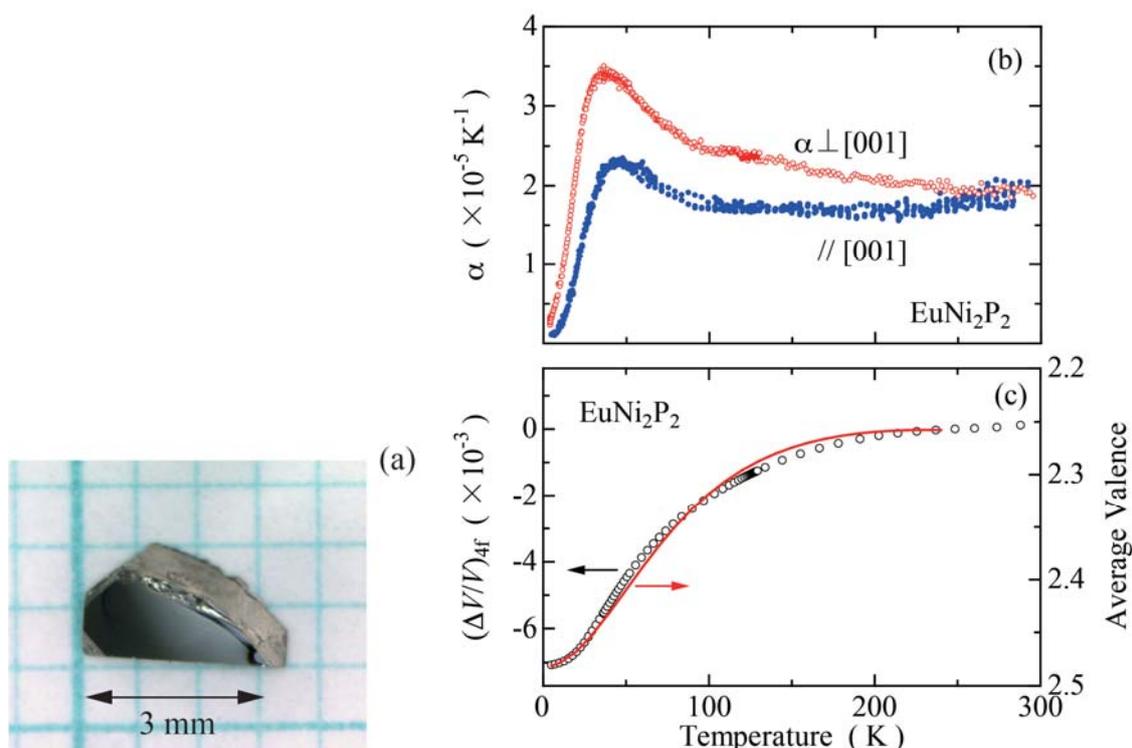


図1 EuNi<sub>2</sub>P<sub>2</sub> の (a) 単結晶、(b) 熱膨張係数の温度依存性、及び (c) 4f 電子が関与する体積変化  $(\Delta V/V)_{4f}$  とメスbauer分光で決定した Eu の平均価数の温度依存性

態が Gd のそれに近いにもかかわらず、低温での電子比熱係数が  $\gamma = 100 \text{ mJ}/(\text{K}^2 \cdot \text{mol})$  と大きい値をとることであった。しかしながら、これまでの多結晶での研究では、この重い電子状態の起源がわからないでいた。

これに対し、琉球大学理学部、大阪大学低温センターなどの研究グループは、Sn フラックス法で  $\text{EuNi}_2\text{P}_2$  の単結晶を育成し、比熱・熱膨張などの実験を行った。図 1(a) に単結晶試料の写真を示す。平らな面が正方晶の (001) 面である。[001] 方向の長さ  $l$  の相対変化  $\Delta l/l$  と (001) 面内での  $\Delta l/l$  を測定し、その温度に関する微分  $d(\Delta l/l)/dT$  である熱膨張係数  $\alpha$  の温度依存性が図 1(b) である。熱膨張係数は約 100 K まではほとんど一定で、40 K で最大値をもって、降温とともに急激に減少することがわかった。これまでに詳しく研究された近藤温度  $T_K = 20 \text{ K}$  の  $\text{CeRu}_2\text{Si}_2$  の実験結果を踏まえ、 $\text{EuNi}_2\text{P}_2$  の近藤温度は上述の 40 K の 2 倍の  $T_K = 80 \text{ K}$  と決定した。80 mK までの比熱測定から決定した  $\gamma = 93 \text{ mJ}/(\text{K}^2 \cdot \text{mol})$  と  $T_K = 80 \text{ K}$  は、 $\text{CeRu}_2\text{Si}_2$  の  $\gamma = 350 \text{ mJ}/(\text{K}^2 \cdot \text{mol})$  と  $T_K = 20 \text{ K}$  に良く整合する。熱膨張係数には格子による寄与、磁気 (4f 電子) による寄与があるが、熱膨張係数と比熱とは比例関係で結ばれているので、室温から低温まで測定した比熱を使って熱膨張係数の中の格子による寄与を差し引き、磁気 (4f 電子) による寄与を求めた。その体積の相対変化  $(\Delta V/V)_{4f} = (\Delta l/l)_{4f}^{[001]} + 2(\Delta l/l)_{4f}^{\perp[001]}$  が図 1 (c) のデータである。同図にはメスバウアー分光で決定した Eu の平均価数も示してあり、両者は見事に良くスケールすることが分かった。この結果は、 $\text{EuNi}_2\text{P}_2$  の重い電子状態が、Eu 原子の大きな価数変化と強い相関を持っていることを明らかにしている。これまで、希土類化合物の重い電子異常は、上述のように主として f 電子数 (ホール数) が 1 つの Ce (Yb) 化合物で多く見られていたが、最近になっていくつかの Pr あるいは Sm 化合物においてもこの現象が発見され新たな研究の展開がなされている。本研究では、さらに f 電子数の多い Eu 化合物においても、近藤効果によると考えられる重い電子異常が存在することを単結晶試料を用いた実験によって示した。この研究成果は、日本物理学会発行の英文学術誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2013 年 8 月号に掲載された。今後の研究の進展が待たれる。

## 原論文

[Heavy Fermion State Based on the Kondo Effect in  \$\text{EuNi}\_2\text{P}\_2\$](#)

[Yuichi Hiranaka, Ai Nakamura, Masato Hedo, Tetsuya Takeuchi, Akinobu Mori, Yusuke Hirose,](#)

[Katsuya Mitamura, Kiyohiro Sugiyama, Masayuki Hagiwara, Takao Nakama, and Yoshichika Ōnuki: J.](#)

[Phys. Soc. Jpn. 82 \(2013\) 083708](#)

問合せ先：辺土 正人 (琉球大学理学部)

竹内 徹也 (大阪大学低温センター)

大貫 惇睦 (琉球大学理学部)