

— 研究成果発表 —

Pr(プラセオジウム)化合物中に電子と核の複合状態を発見

首都大学東京、富山大学、東京大学物性研究所、新潟大学、東京工業大学、神戸大学の研究グループは、充填スクッテルダイトと呼ばれる化合物の一つである $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ (Pr: プラセオジウム、Ru: ルテニウム、P: リン) において、Pr イオンの持つ 4f 電子が超微細相互作用^{注1)}を通して原子核スピンと結合し、両者が複合した特異な量子状態^{注2)}が形成されていることを発見しました。不純物の非常に少ない純良な $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の単結晶を用いて比熱と磁化の高精度測定を行い、この新奇な複合状態の証拠となる振る舞いの観測に成功したことによりなされました。

この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2011 年 5 月号に掲載される予定です。

注1) 超微細相互作用

4f 電子の磁気モーメント (マイクロな磁石) と核スピンの磁気モーメントの間に働く量子力学的効果で、Pr イオンでは、両者を平行にそろえようとします。量子力学的表現を用いるならば、両者の状態を混ぜることとなります。

注2) 4f 電子と核スピンの複合した特異な状態

Pr イオンの内部において、3重縮退した (3つの状態が同じエネルギーを持っている) 状態にある 4f 電子が、6重縮退した核スピンと超微細相互作用することにより、4重、6重、8重に縮退した3つの新たな多重項から成る複合準位系が形成されていることがわかりました。なお、ここで状態の数は、 $3 \times 6 = 18 = 4 + 6 + 8$ の関係を満たしています。(別紙2・図2右参照)。

当該研究の詳細については、別紙1「研究概要」及び別紙2「さらに詳しい解説」を参照ください。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2010) 5月号
電子版 <http://jpsi.ipap.jp/ec/index.html> (4月25日公開)
<http://jpsi.ipap.jp/link?JPSJ/80/054704/>

お問い合わせ先:

首都大学東京大学院 理工学研究科
電話/FAX: 042-677-2512/ 042-677-2483

【研究概要】

希土類化合物は、磁性や超伝導などの多彩な性質を示すことで知られているが、この特長は、希土類イオンが持つ 4f 電子の磁気モーメント（マイクロな磁石）によりもたらされる。一方、希土類イオンの原子核も同様に核スピン（核の自転）による磁気モーメントを持つが、その大きさは非常に小さい（電子の 1000 分の 1 程度）。さらに、両者の間に働く超微細相互作用の強さは、磁性や超伝導をもたらす相互作用に比べて非常に弱いため、核スピンが電子の振る舞いに影響を及ぼすことはこれまでなかった。

今回発見された複合状態が現れる低温では、外部磁場をかけると電気抵抗が 90% も減少する巨大磁気抵抗効果と呼ばれる現象が観測されており、電子の運動が磁場の影響を敏感に受けていることがわかる。他にも特異な性質が今後見出される可能性があり、新機能開発も視野に入れた研究の展開が期待される。

また、電子と核の複合状態は、冷却された原子気体を用いた高精度原子時計や将来の量子コンピュータへの応用において、重要な役割を持っている。空間の原子密度を高くするため、レーザー光を用いて作った格子（光格子）に原子を並べる技術も近年開発されているが、 $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ では、Pr イオンが約 8 オングストロームの間隔で完全格子を形成している超高密度状態にあるので（結晶構造を図 1 に示す）、このような次世代量子物理の基礎技術につながる可能性もある。

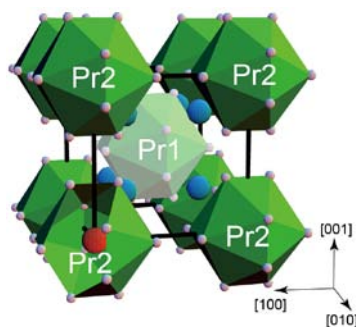


図 1. $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の結晶構造。Pr2 の印がついたカゴ状構造の中央に、複合状態を持つ Pr イオン(赤球)が入っている。

【さらに詳しい解説】

測定された比熱の温度依存を図 2 に示すが、ゼロ磁場中では 0.3 K に比熱の山が見られる。これは、磁場がないときに、分裂した複数の多重項が形成されていることに対応する。磁場を印加していくと、約 0.3 T を境にこのピークが高温側へ移動し始めるが、この振る舞いも、超微細相互作用が支配的な低磁場領域から、外部磁場が支配的な高磁場領域への移り変わりとして理解できる (Paschen-Back 効果と呼ばれる現象である)。磁化の温度依存や磁場依存に見られる特徴的な異常も、同様にほぼ定量的に説明された。

充填スクッテルダイト $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ は温度を下げていくと 63 K で金属から絶縁体へと転移するが、本現象はこの低温側における絶縁体相内で観測された。この絶縁体相は、4f 電子の結晶場準位が相内で激しく温度依存することから、4f 電子の関与した特異な電荷秩序相であるとして研究者の注目を集めている。この相内では Pr イオン間の相互作用が抑制されることと、Pr イオンが希土類の中でも比較的大きな超微細結合定数を持つことの 2 つの条件が組み合わさることにより、この相内の低温領域において超微細相互作用が顕在化し、極めて珍しい 4f 電子と核の複合状態の形成がもたらされたものと考えられる。

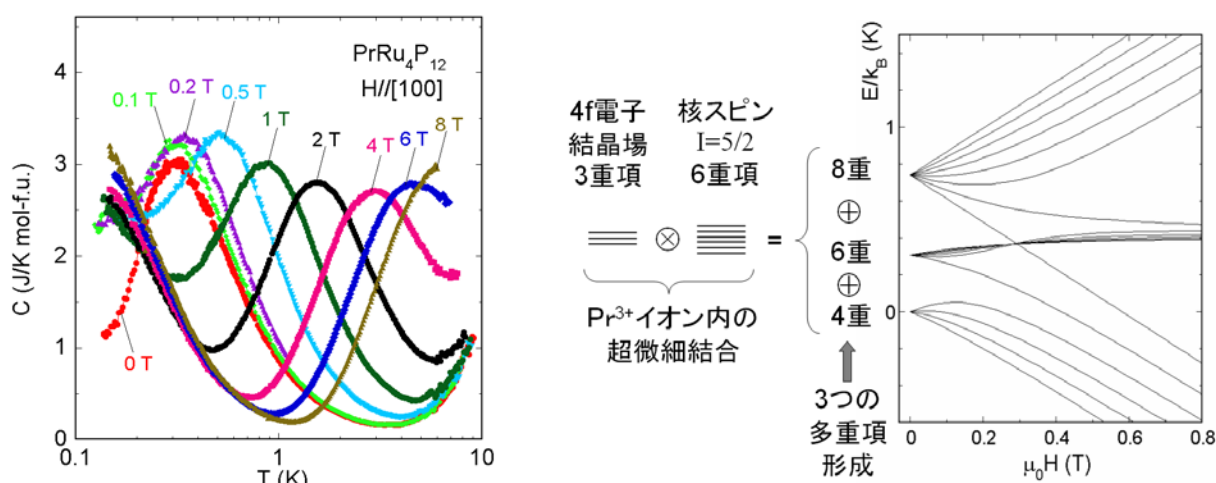


図 2. (左) $\text{PrRu}_4\text{P}_{12}$ の磁場中における比熱の温度依存。ゼロ磁場で 0.3 K に現れる比熱の山は、磁場増大に伴い高温側に移動する。この振る舞いは、4f 電子と核の複合状態の形成の証拠である。(右) 4f 電子の結晶場 3 重項状態が、核スピンと超微細結合して形成される 3 つの多重項の磁場依存性は、観測された比熱データの特徴を良く再現する。