

強磁場中で重い電子を発見：近藤絶縁体の磁場中電子状態を解明

附属国際超強磁場科学研究施設 松田 康弘、寺島 拓、小濱 芳允

【背景】 多体電子相関は新奇物性発現の鍵であり、その理解のため様々な物質を対象として研究が行われている。「重い電子金属」は、そのような相関効果の典型である高濃度近藤効果によって遍歴電子の有効質量が大きくなった系であり、CeやYb、U系の希土類金属間化合物を中心に長年にわたって研究が行われている。これらの物質では4f、5f電子が磁性を担う。f軌道の局在性、強いスピン軌道相互作用、結晶場効果に加えて、より遍歴的なs、p、d電子との多体相関である近藤効果が、多彩な電子・磁気状態を実現する。多極子秩序や量子臨界的挙動、エキゾチックな超伝導の発現が多くの研究者の興味を集め、現在も盛んに研究が行われている。

このような多彩な電子・磁気状態の中に、低温で絶縁体化がおこる、近藤絶縁体もしくは近藤半導体と呼ばれる重い電子金属が存在する。ここでは、強い近藤効果がエネルギーギャップ形成に関係していると考えられているが、詳細なメカニズムは十分明らかになっていない。最近、近藤絶縁体の表面金属状態がトポロジカル絶縁体との関連で注目されている[1]。ここでは、バルクの状態にも非自明な量子振動が発見され、3次元的な準粒子の存在が電気的絶縁体相で示唆されるなど、近藤絶縁体の電子状態の理解には再び大きな注目が集まっている[2]。

近藤絶縁体の電子状態を理解する上で外部磁場の効果を調べることは極めて興味深い。その理由は、磁場が近藤効

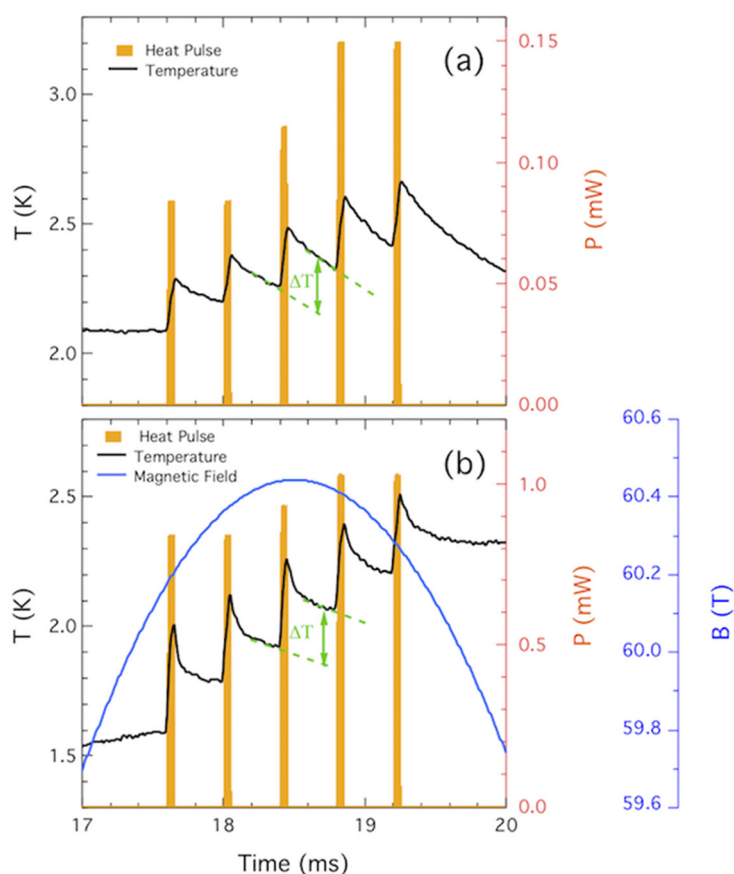


図 1. (a)ゼロ磁場中での熱パルスとそれによる試料温度の変化を時間の関数でプロットした。 ΔT は1つの熱パルスによる試料の温度上昇。(b)約 60 T での熱パルスとそれによる試料温度の変化を、磁場の波形と共に時間の関数でプロットした。 ΔT は1つの熱パルスによる試料の温度上昇。磁場中では同程度の ΔT を得るために10倍程度の熱量が必要であることに注意すると、試料の比熱が磁場中で大きくなっていることがわかる。

果を量子力学的に抑制できるためである。近藤束縛状態では、遍歴電子集団と局在 f 電子がスピンスिंगレット状態を形成するが、十分強い磁場下ではトリプレットなどの磁気状態がより安定となり近藤効果が効かなくなると期待される。実際、典型的な近藤絶縁体の 1 つである YbB_{12} では、約 50 T の磁場で絶縁体状態が壊れて金属化が起こるなど顕著な磁場効果が発見されている[3]。しかしながら、この磁場誘起金属状態が果たして近藤効果が壊れた通常金属なのか、または、近藤効果の残った重い電子金属なのかは、基本的な問いであるにもかかわらず、磁場誘起金属相の発見から 30 年にわたり不明であった。その理由は、50 T が定常磁石では達成不可能な磁場であったため、検証するための実験が不可能であったためである。今回、最近可能となったパルス強磁場中の比熱測定技術を用いることで、 YbB_{12} の磁場誘起金属相が「重い電子金属」であることを明らかにすることに成功した[4]。

【実験方法】 実験はパルス幅 35 ms の非破壊型のパルス磁石を用いた。時間幅 $\Delta t = 80 \mu\text{s}$ の熱パルス $\Delta P[\text{mW}]$ で生じる試料の温度上昇 $\Delta T[\text{K}]$ を 400 μs 後に計測することで、磁場中の試料の熱容量 $(\Delta P \times \Delta t) / \Delta T$ を求めることができる。図 1 には、ゼロ磁場と 60.1 – 60.4 T での測定結果を時間の関数で示してある[4]。磁場のパルス頂上付近で実験することで、測定時の磁場の変化率を 1% 以下程度にすることが可能である。磁場方向は単結晶の [001] 方向に平行である。

このような高速の熱測定は最近まで不可能であったが、ヒーターや温度計の薄膜化などの計測システムの開発によって実現した[5]。ミリ秒領域のパルス強磁場中での様々な熱測定が行われるようになったことは、最近のパルス磁場中計測技術の大きな発展の 1 つである。

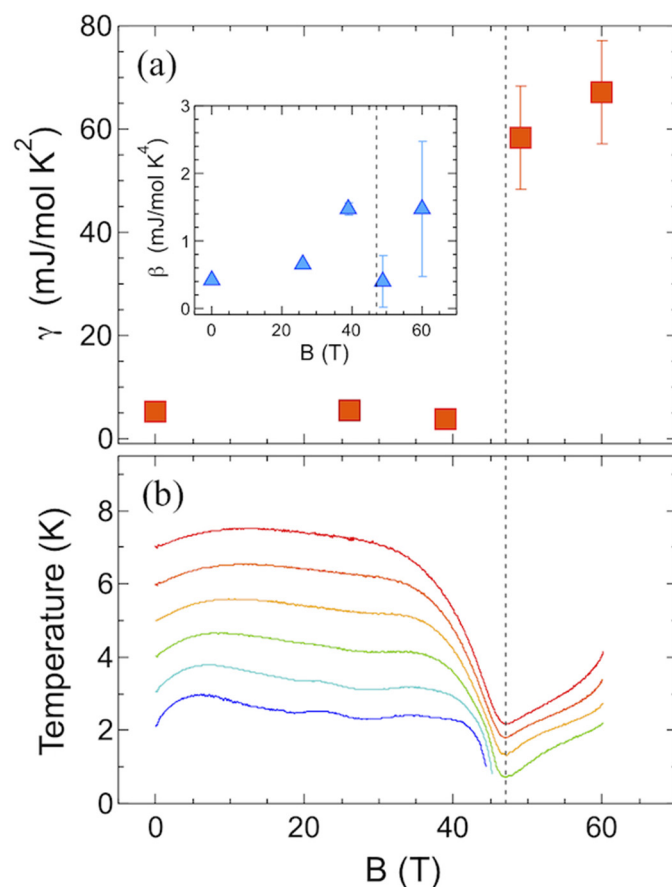


図 2. (a) $C = \gamma T + \beta T^3$ を用いて実験結果から得られた YbB_{12} の電子比熱係数 γ の磁場依存性。挿入図は、同様にして得られた β の磁場依存性。(b) 比熱測定とは独立に測定した YbB_{12} 磁気熱量効果の結果。点線は [001] 方向に磁場をかけたときの相転移磁場を示す。



