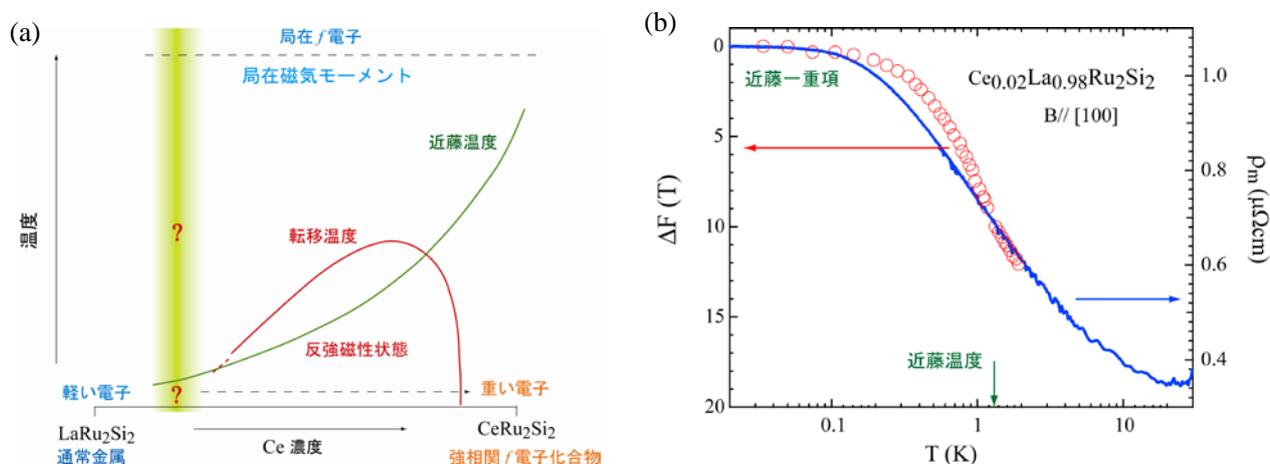


重い電子はどこで、どのようにして生まれるのか？

強相関 f 電子系物質と呼ばれる Ce などの希土類化合物などでは、しばしば電子の静止質量より 100 倍以上大きい有効質量を持つ伝導電子が見出されている。このような重い電子が形成されるメカニズムとして近藤効果が重要だと考えられている。近藤効果は、希薄磁性合金の電気抵抗が温度の低下とともに減少した後、再び $-\log T$ に比例して上昇し、さらに低温では一定となる現象である。LaRu₂Si₂ の La 元素を少量 Ce に置き換えることによって同様な振る舞いが観測される。希土類は s 、 p 、 d 電子以外に f 電子を持つ元素である。室温近傍の温度では、 f 電子は局在磁気モーメントを持ち、あたかも局在した電子のようにふるまう。最低温では近藤効果により近藤一重項と呼ばれる伝導電子と f 電子がお互いに結合した状態が形成される。



(a) Ce_xLa_{1-x}Ru₂Si₂ の Ce 濃度-温度相図の概要 (b) 左軸：ド・ハース-ファン・アルフェン効果信号周波数の温度変化。周波数変化 $\Delta F(T)$ は最低温における周波数の値を基準とし、下向きを正の方向に取っている。信号はホール面から生じているので、温度降下に伴う周波数の減少はホール面が小さくなっていることを示している。右軸：磁気散乱による電気抵抗率 ρ_m の温度依存。

図(a)に示すように La を Ce で 100% 置き換えると、CeRu₂Si₂ という強相関 f 電子化合物が形成され、その物質では重い電子が観測されている。どこの Ce 濃度から、伝導電子は重くなっているのか？そもそも、La 元素 1 個を Ce で置き換えた場合には、すでに、重い電子ができていたのだろうか？また、近藤効果はどのような役割を果たしているか？これらを明らかにするためには、近藤効果の強さの目安となる近藤温度よりも高い温度から、近藤一重項が形成される低い温度までの伝導電子状態の変化を連続的に観測する必要がある。実際には、元素 1 個だけの違いの寄与を観測することは不可能なので、ある程度濃度を増加させる必要があるが、あまり、多くしすぎると、今度は磁性元素間の相互作用の効果が効いてきて、純粋な近藤効果の寄与を見ることができない。したがって、置換量をできるだけ少なくし、非常にわずかな電子状態の変化を精密に測定する必要がある。

ド・ハース - ファン・アルフェン効果は物質中の伝導電子の状態を極めて精密に調べる手段であり、この目的のために使用できる唯一無二の手段である。しかし、その測定のためには数 K 以下の低温と強磁場が必要である。したがって、温度とともに電子状態がどのように変化をするか、また、近藤効果はその変化にどのように寄与しているかを観測するためには、近藤温度が数 K 程度以下であることが必要

である。一方、磁場は近藤効果を抑制する効果があり、近藤温度が低いと近藤効果の寄与が見えなくなってしまう。このため、近藤効果を示す希薄合金に関する膨大な数の研究が行われてきたが、これまで、伝導電子状態の温度変化を直接観測する測定は成功していなかった。

東北大学、物質・材料研究機構のグループは、 LaRu_2Si_2 の La を 2%Ce に置き換えた合金において、ド・ハース - ファン・アルフェン効果の振動の周波数の温度変化を精密に測定した。周波数はフェルミ面の大きさに対応し、その変化から伝導電子数の変化を推定できる。図(b)に示すように周波数は電気抵抗変化とほぼ対応した連続的な変化をしていることが見出された。この変化から温度の降下に伴い、伝導電子数がしだいに増加していることが示された。また、信号強度の温度変化の解析から、有効質量が温度の降下とともに次第に増加し、近藤一重項が形成される最低温度では、有効質量は LaRu_2Si_2 の有効質量の約 2.5 倍になっていることが見出された。この有効質量の大きさは CeRu_2Si_2 で観測される重い電子の有効質量の約 2% である。この結果は近藤温度よりも十分高い温度領域では局在していた f 電子が温度の降下とともに近藤効果によって次第に遍歴的となり、十分低い温度では遍歴する重い電子となっていることを示している。この観測の成功は、これまで開発した実験・解析方法により伝導電子数のわずかな変化を見積もることが可能になったこと、また、(1) この濃度では、Ce 元素同士の相互作用の効果が効いてはいない、(2) 近藤温度が適度に小さい、(3) この合金では、結晶のある方向（磁化困難軸方向）へ磁場を加えた場合では磁場の近藤効果への影響がほとんどない、など観測に必須な条件を幸運にも満たしていることを最大限に利用したことによる。この成果は日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2012 年 5 月号に掲載された。

この結果は、本研究で用いた試料のみならず、一般的に近藤効果が重要な働きをしている希薄合金では、低温で遍歴する重い電子が形成されていることを示唆する。Ce などの磁性元素の濃度を増やしていくと、磁性元素同士の相互作用により、磁気秩序が発達する。図(a)の相図に示すように本合金の場合では、反強磁性状態となった後、さらに Ce 濃度を増やすと磁気秩序がなくなり常磁性状態となる。磁気秩序の 2 次の相転移が絶対零度で消えるところは量子臨界点と呼ばれており、その近傍における電子状態、とくに f 電子は局在しているか、遍歴しているか、の解明は重要な課題となっている。本研究結果は磁気秩序状態でも多くの場合 f 電子は遍歴的であることを示唆しており、単に希薄合金の電子状態のみならず、量子臨界点近傍および強相関 f 電子系物質の電子状態の理解の進展に重要な貢献をすると期待される。

論文掲載誌 *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 054703

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/81/054703> (4月11日公開済)

<情報提供：青木晴善（東北大学大学院理学研究科）

松本裕司（日本原子力研究開発機構先端基礎研究所）>