

磁性と「重い電子」は共存するか？ 極低温・高圧力下の電子の状態の直接観測

原子の構成要素のうち、電子の質量（静止質量）は、陽子や中性子の質量に比べて約 1/1800 である。しかしながら、ネオジム磁石のような強い磁石の原料として知られる希土類元素（レアアース）を用いて合金を作ると、その中を流れる伝導電子の質量（有効質量）が陽子や中性子の質量程度にまで増える現象が知られており、このような物質は「重い電子」系物質と呼ばれ盛んに研究が進められている。これらの強い磁石の性質である磁性と重い電子の伝導性のどちらも共通に、4f 電子という希土類元素の持つ特殊な電子が重要な役目を果たしている。

この 4f 電子が生み出す 2 面性である重い電子と磁性がどのような条件下で現れるか、また、どのように移り変わるか、これまでに数多くの研究がなされてきた。その結果、伝導電子と 4f 電子の混成（c-f 混成）の大小がこのような希土類化合物の 2 面性の移り変わりに関わっていることが分かってきた。その混成強度を横軸、温度を縦軸にとると、ドニアック相図と呼ばれる 1 つの普遍的な相図で表される（図 1）。ドニアック相図では、混成強度を強くしていくと、磁性が絶対零度で消える点があり、量子臨界点と呼ばれている。この量子臨界点の近傍では、従来の理論では説明できない超伝導など、これまでに解明されていない物理現象が現れるため、現在盛んに研究が行われている。その物理現象が現れる時の電子の状態を知ることは、量子臨界点での物理現象の理解のために重要である。

これまで、量子臨界点やその近くの磁性が現れる場合の電子の状態については、主に 2 つの考え方が提唱されてきた。1 つは、重い電子を形成したまま磁性を持つという考え（スピン密度波模型）、もう 1 つは磁性が現れるところでは重い電子は消えるという考え（近藤崩壊模型）である（図 1）。現在、このどちらが実際に現れるか、活発な議論がなされている。

混成強度を外部から加えた圧力で変化させると、磁性が現れる状態から磁性が現れない重い電子状態まで変化する物質の 1 つにインジウム化セリウム（ CeIn_3 ）がある。この物質は、大気圧では磁性を持った状態であるが、臨界圧力（2 万 6 千気圧）に達すると絶対温度 0.2 ケルビン以下で超伝導が出現し、更に高い圧力では重い電子で磁性を持たない状態になることが知られている。

最近、自然科学研究機構分子科学研究所のメンバーを中心とする研究グループは、インジウム化セリウムの重い電子を生み出す電子の状態が反強磁性相内でも存在し、スピン密度波模型と呼ばれる理論で説明できることを明らかにした。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 2012 年 4 月号に掲載された。

実験は、 $-267\text{ }^\circ\text{C}$ (6 ケルビン) の温度下と高圧力という複合環境下において電子の状態を決定できる低温高圧下テラヘルツ反射分光法という手法を、分子科学研究所・極端紫外光研究施設（UVSOR-II）のシンクロトロン光を組み合わせることで行われた。テラヘルツ帯は光と電波の狭間の領域であり、これまで強い光源がなかったために、「テラヘルツギャップ」と呼ばれていた領域である。UVSOR-II からのシンクロトロン光は、そのギャップを埋める強力な光源であり、この光を使うことではじめて低温・高圧下テラヘルツ反射分光が可能になったものである。

その結果、重い電子の存在を裏付ける c-f 混成は、磁性を持った状態からすでに現れており、c-f 混成の大きさは、圧力とともに連続的に増加することを観測した。このことは、圧力によって重い電子が成長することを直接観測したものである。また、c-f 混成が磁性を持った状態ですでに観測されることから、磁性のある状態ですでに重い電子が存在することを見出した。以上の結果は、インジウム化セリウムの電子の状態は、近藤崩壊模型ではなくスピン密度波模型で説明できることを示している。

この結果で、インジウム化セリウムの超伝導の元になる電子の状態は、スピン密度波模型で説明できることがわかった。このことから、インジウム化セリウムの超伝導を生み出す電子構造が明らかになり、この物質の超伝導の理解に1歩近づいたことになる。このような1歩1歩の積み重ねを進めて行くことで、将来は夢の室温超伝導が実現できるかもしれない。

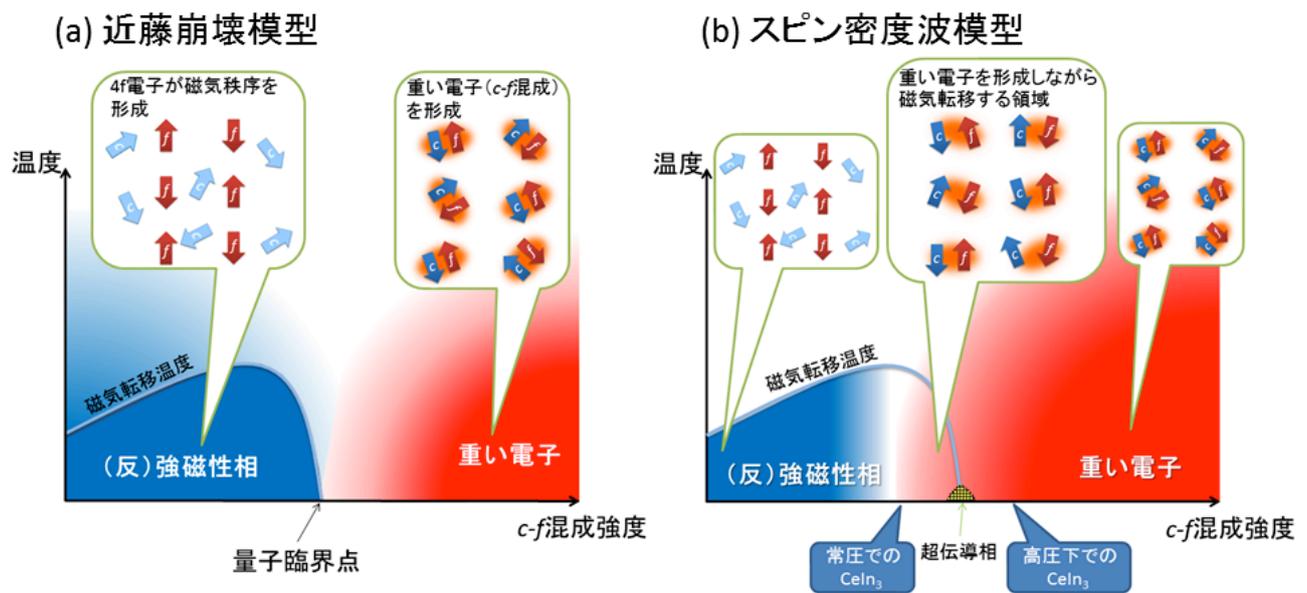


図1. 重い電子系希土類化合物の磁性を持った状態[(反)強磁性相]と重い電子状態の関係を示したドニアック相図。(a)は近藤崩壊模型での描像、(b)はスピン密度波模型での描像。近藤崩壊模型では重い電子系の起源である伝導電子(c)と4f電子の混成(c-f混成)が磁性の現れる(反)強磁性相で消えるのに対し、スピン密度波模型では、c-f混成が(反)強磁性相でも残っていると違うところがある。今回測定したインジウム化セリウムは、スピン密度波模型に合うと考えられる。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) No.4, p. 043703

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/81/043703> (3月22日公開済)

<情報提供：木村真一（自然科学研究機構分子科学研究所）>