

強い磁場によって安定化する超伝導

超伝導と強磁性はきわめて相性が悪く、お互いに共存できないというのがこれまでの一般的な考え方だった。強磁性による強い内部磁場が超伝導電子対を容易に破壊してしまうからである。ところが最近、この二つの現象が微視的に共存する系が見つかって研究者の注目を集めている。これまで見つかっているのはすべてウラン化合物の重い電子系物質であり、圧力下における UGe_2 、大気圧下での URhGe 、 UCoGe などが知られている。超伝導転移温度 T_{sc} は強磁性転移温度 T_{Curie} よりもずっと低く、強磁性相内部で超伝導が実現している。これらの系では、従来の BCS 理論 (Bardeen, Cooper, Schrieffer) で説明される s 波超伝導ではなく、スピン三重項の奇パリティ超伝導が実現していると考えられている。その場合、超伝導が壊れる磁場 (上部臨界磁場、 H_{c2}) は、s 波超伝導から期待される H_{c2} よりも大きいことが期待される。一般に、超伝導が磁場によって破壊される理由は二つあり、一つはゼーマン効果によるスピン一重項の対破壊効果、もう一つはローレンツ力による軌道対破壊効果である。このうち前者の効果はスピン三重項超伝導には働かないので、強磁性超伝導体では高い H_{c2} が得られるのである。実際、 UGe_2 、 URhGe 、 UCoGe すべてにおいて s 波超伝導の限界 (パウリリミット) を越える高い H_{c2} が観測されている。とくに URhGe では、驚くべきことに高磁場下でリエントラント超伝導 (磁場再突入超伝導) がみつかっており、強磁性量子臨界点との関連から興味を持たれている。一方、 URhGe と同じ結晶構造を持つ弱い強磁性体 UCoGe では、これまでリエントラント超伝導が見つかっていなかった。



図 1. テトラーク炉による UCoGe の単結晶育成写真。

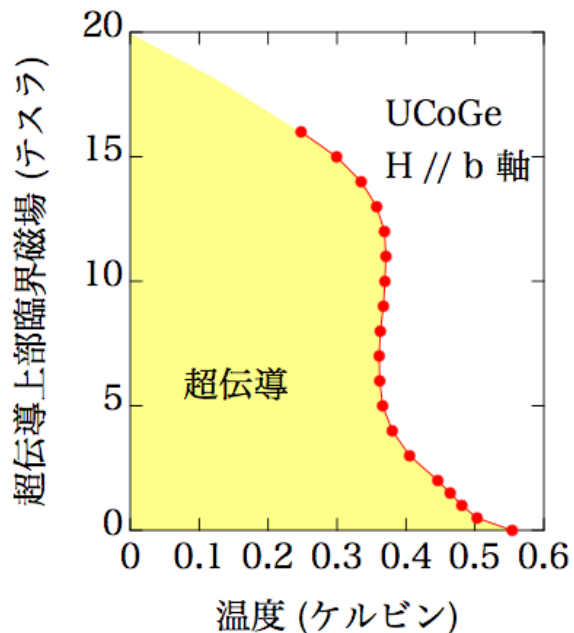


図 2: UCoGe の超伝導相図。S 字型のカーブを描き、超伝導が磁場によって安定化していることがわかる。

フランス原子力庁 (CEA-Grenoble) の青木 大 氏は、最新式の日本製テトラーク炉によって UCoGe の純良単結晶を育成し (図 1 参照)、極低温 ($T > 70$ mK)、強磁場 ($H < 16$ T) の極限環境下で磁場方向を精密に制御しながら超伝導の性質を電気抵抗によって調べた。その結果、これまでの報告とは異なって、特定の磁場方向において超伝導が磁場によって安定化していることが分かった。強磁性体ならではの風変わりな超伝導現象であり、超伝導発現の基本メカニズム解明につながるものと期待される。この成果は日本物理学会の英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2009 年 11 月号に掲載される。

本研究で得られた UCoGe の超伝導の磁場-温度相図を図 2 に示す。磁場方向は、斜方晶の結晶構造の b 軸方向であり、磁化困難軸に相当する。通常はほぼ直線的に変化するはずの H_{c2} 曲線が、ここでは S 字型の曲線を描き、0.4 K 付近で H_{c2} が急激に増大している。つまり超伝導が磁場によって安定化している。さらに 0 K 付近では、20 T もの巨大な H_{c2} を持つ。弱結合の BCS 超伝導から期待される H_{c2} は 1 T 程度なので、それに対して UCoGe の場合は実に 20 倍も強靱な超伝導が実現している。さらに S 字型曲線のあたりを詳しく調べると、その近傍で磁場によって強磁性の磁気モーメントが揺らいでいること、さらに、そこでは伝導電子の質量が見かけ上重たくなっており、これが超伝導の特性と深く関係していることが分かった。一方、もう一つの磁化困難軸である a 軸方向に磁場をかけると S 字型の H_{c2} 曲線は見られないものの、低温では H_{c2} が急激に増大しており 0 K 付近では約 30 T にも到達することが分かった。

URhGe の T_{Curie} は 9.5 K と比較的高く、量子臨界点からは遠いところにある。そのため T_{sc} は 0.25 K と低く、低磁場の超伝導相と高磁場のリエントラント超伝導相は完全に分離していた。一方、今回の UCoGe はもともと量子臨界点近傍にあり T_{sc} も 0.6 K と高い。このため低磁場の超伝導相と高磁場のリエントラント超伝導相が結合しており、結果として図 2 のような S 字型超伝導相図が得られたと考えられる。強磁性超伝導は純良単結晶と精密な磁場方向の制御がきわめて重要であり、今回の成果はこれによって磁気モーメントの揺らぎをうまくコントロールできた例だと考えられる。

超伝導の実用化には、高い超伝導転移温度とともに高い上部臨界磁場を持つことが重要である。UCoGe の超伝導転移温度は 0.6 K と低いものの、飛び抜けて高い上部臨界磁場を検証した本研究は多くの研究者の注目を集めている。この成果によって超伝導の基本メカニズム解明が進むとともに、実用化に向けた超伝導物質開発にも貢献することが大いに期待される。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) No. 11, p. 113709

電子版:<http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/113709> (11 月 10 日公開)

〈 情報提供: 青木 大、あおき だい Jacques FLOUQUET (フランス原子力庁 CEA-Grenoble) 〉