

高純度結晶によって解き明かされるモンスターの正体

-URu₂Si₂の「隠れた秩序」にせまる-

東日本大震災による福島原発の事故をきっかけに、原子力や放射性物質に対する市民の不安・関心が高まっている。応用面ではもちろんのこと、基礎研究においても、これら放射性物質の性質を調べて学術的な発展を図り、将来の原子力政策の判断材料を市民に提供することは、研究者に課せられた使命だと考える。ウランやプルトニウムといった元素は放射性物質、あるいは核燃料として一般に広く知られている。一方、これらの化合物では、アクチノイド元素に特徴的な外殻電子 5f 電子に由来した実にバラエティに富んだ物性を示す。特に興味深い点は、遷移金属等の他の金属間化合物にはない特異な超伝導状態や磁性等が発見されていることである。そのため、物性物理の研究対象としても重要性が認識され、その歴史も長い。中でも URu₂Si₂ はその典型例である。この物質は 1985 年に発見され、比熱測定から 17.5 K での 2 次相転移と、より低い温度約 1.4 K の超伝導状態への相転移が報告されている。問題は 17.5 K での 2 次相転移を特徴付ける秩序変数、つまり「自発的対称性の破れ」に関して何の対称性が破れたか不明なことである。発見から約 26 年経過し、膨大な研究が行われた現在でも世界的な論争となっている。これは「隠れた秩序」と呼ばれるいわば正体不明のモンスターであり、この物質固有の問題としてではなく、凝縮系の新しい状態をどう解き明かすという重要な問題として認識されている。既に多くの実験研究によって明らかにされてきた物質の状態図が図 1 に示されている。またこの物質は、発見初期の頃から大きな試料依存性があることが知られてきたが、このことが常にこの物質の本質を探る研究にとって妨げとなってきたのも問題の一つである。

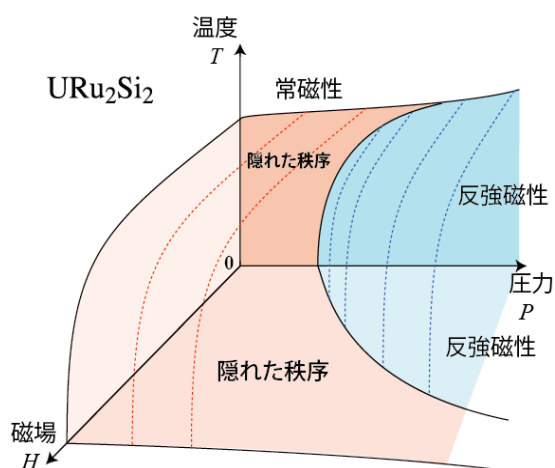


図 1 URu₂Si₂ の磁場・圧力・温度相図。

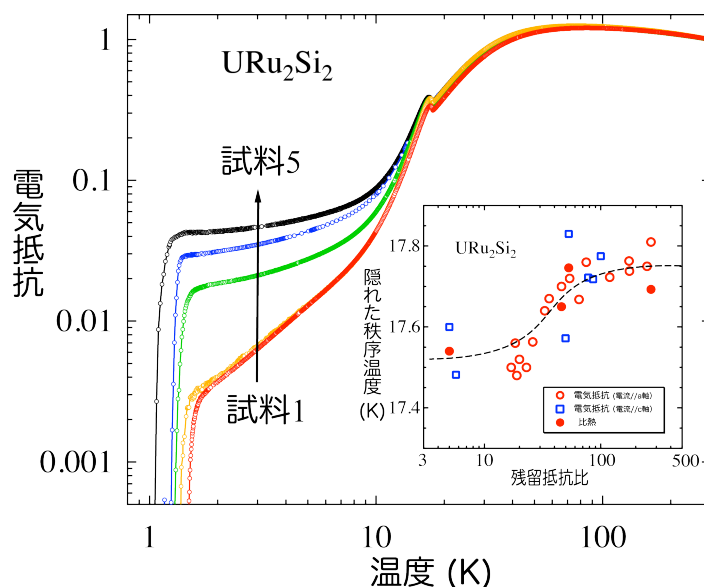


図 2 異なる純度の単結晶の電気抵抗。挿入図は、秩序転移温度の残留抵抗比依存性。

最近、日本原子力機構・先端基礎研究センター及びフランス原子力庁(CEA-Grenoble)のメンバーを中心とする研究グループは、URu₂Si₂ に関する非常に多くの単結晶を電気抵抗と比熱測定に

よって系統的に評価するとともに、世界最高純度の単結晶育成に成功し、この物質の試料依存性について詳細に明らかにした。一般にアクチノイド化合物の研究は厳しい規制のため、世界的にも研究施設が限られる中、国際研究協力による地道な研究がこの物質の本質に迫る結果を与えている。この成果は日本物理学会の英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan(JPSJ)*の 2011 年 11 月号に掲載された。

図 2 には、本研究から得られた異なる純度の試料の電気抵抗の温度依存性が示されている。純度の違いは明確に低温の振る舞いに現れており、残留抵抗の低い高純度試料 1 では、超伝導転移温度も高くなっている。また内挿図には、「隠れた秩序」転移温度と試料の純良性との関係が示されている。内挿図の横軸は残留抵抗比と呼ばれるもので、ここでは室温の抵抗を温度 2 K での抵抗で割った値である。これは試料の純度の指標となるが、一般に金属では高純度試料ほど低温の残量抵抗が小さくなり残量抵抗比は大きくなる。隠れた秩序転移温度の変化としてはわずかな変化ではあるが、明確な純度依存性を示している。この純度の変化は中性子や核磁気共鳴実験等の微視的な測定では大きな変化として観測され、またフェル面の観測実験等には特に高純度結晶が必要不可欠になっている。このような結晶中の不純物や結晶格子の乱れに非常に敏感な特性は、この物質の示す不思議な電子状態と図 1 に示した圧力に敏感な特性が密接に関連している可能性を強く示唆する。驚くべきことは、彼らが育成した最高純度の結晶では、ドハース・ファンアルフエン効果測定から見積もられた電子の平均自由行程が $1\mu\text{m}$ 以上にもおよぶ驚異的な純度であることである。このような実験技術と地道な研究成果から得られた高純度結晶は、近年の磁気トルク測定[1]あるいは、高分解能光電子分光実験[2]に用いられており、大きなインパクトを与える結果が示されている。また、理論的にも新しいタイプの相転移としてモデルが提案されている[3]。「隠れた秩序」の解明は URu_2Si_2 にとどまらず、固体物理における 2 次相転移に対する考え方を大きく変える可能性を秘めている。そのため、今回の研究成果は大いに注目を集めるものと期待される。

- [1] R. Okazaki, T. Shibauchi, H. J. Shi, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Ikeda, Y. Matsuda: *Science* 331 (2011) 439.
- [2] R. Yoshida, Y. Nakamura, M. Fukui, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki, M. Okawa, S. Shin, M. Hirai, Y. Muraoka, and T. Yokoya: *Phys. Rev. B* 82 (2010) 205108.
- [3] H. Harima, K. Miyake, and J. Flouquet: *J. Phys. Soc. Jpn.* 79 (2010) 033705 及び「科学新聞」2010 年 3 月 26 日

論文掲載誌 *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) No.11, p 114710

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/80/114710> (10 月 17 日公開済)

< 情報提供 : 松田 達磨 (日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター)
芳賀 芳範 (日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター)
青木 大 (フランス原子力庁 CEA-Grenoble) >