

高精度磁歪測定で明らかになった UTe_2 のメタ磁性転移の正体

[1] 要旨

東大物性研の強磁場施設で開発された世界最高峰の磁歪測定技術によって、 UTe_2 の超伝導発現に深く関わっているメタ磁性転移の詳細が明らかにされた。このメタ磁性転移は、印加磁場方向によって超伝導を抑制あるいは誘起するといった特異な現象を示しており、その起源と超伝導への影響に興味もたれてきた。本研究によって、メタ磁性転移に伴う体積磁歪、異方的磁歪が明らかにされ、ウランの価数転移を伴っている可能性が見出された。本論文は、今までウラン化合物では露わでなかった価数揺らぎが超伝導転移に関わっていることを指摘し、新たな研究の方向性を示した重要な結果を示している。

[2] 本文

UTe_2 は、様々な実験からスピン三重項超伝導が実現していることが確実視されており、世界中でしのぎを削る研究競争が巻き起こっている。トポロジカル超伝導としても注目を集めており、「次世代量子コンピューターのシリコン」としても期待されている。常圧下では、ウラン系超伝導としては高い $T_{sc} = 1.5\text{-}2.0\text{ K}$ で超伝導転移が起きる。磁場を磁化困難軸である b 軸に印加すると、 $H_m \sim 35\text{ T}$ で $0.5\ \mu_B/U$ 程度の大きな磁化の増大を伴う一次のメタ磁性転移が起きる[図 1(a)]。 T_{sc} は磁場と共に減少するが、 15 T 以上で増大するリエントラントな振る舞いを示す。そして、 H_m に到達すると同時に超伝導は消失する。さらに興味深いことに、磁場方向を c 軸に傾けた[011]方向の近傍では H_m 以上で超伝導が再び現れる。このように、磁場方向に依存して、メタ磁性転移が超伝導を抑制あるいは誘起する。そのため、メタ磁性転移の起源、超伝導転移との関連性を明らかにすることは超伝導発現の機構解明に不可欠である。これらは、強磁場研究者への挑戦状とも言える難題である。

この問題に対して、東京大学物性研究所の三宅、東北大学金属材料研究所の青木、CEA-Grenoble (フランス原子力庁) の Flouquet を中心とする東京大学新領域、電気通信大学基盤理工学部、大阪大学理学部、九州大学 RI センターの国際共同研究グループは、独自に発展させた高精度の磁歪測定をパルス磁場中で行い、メタ磁性転移に伴う格子定数の変化を精密に測定した。その結果、メタ磁性転移で負の体積変化、異方的な格子歪みを示すこと、さらには、メタ磁性転移はウランの価数転移で説明できることを明らかにした。この成果は JPSJ の 2022 年 6 月号に掲載された。

UTe_2 のメタ磁性転移は 35 T で起きるため、パルス強磁場測定の出番となる。この論文で着目した磁歪とは、磁場による試料の伸び縮みのことである。詳細な議論のためには、直方晶構造をとる UTe_2 の全軸方向の線磁歪、それらの総和である体積磁歪の情報が必要である。著者の一人、池田(現電気通信大)らが東京大学物性研究所で発展させたファイバー・ブラッグ・グレーティング (FBG) 法を用いて磁歪測定が行われた。光学測定であるため、パルス磁場発生時の電磁ノイズや機械的振動という劣悪なノイズの影響を受けないという利点がある。さらに、著者の一人である巖(現理研)による慎重なサンプルセッティング[図 1 (b), 内挿図参照]によって、縦・横磁歪を同時に測定することに成功し、一つの UTe_2 単結晶で各結晶軸方向の線磁歪、体積磁歪の詳細が明らかにされた。このように、直方晶で体積磁歪、線磁歪の異方性が明らかにされた例は、定常強磁場中での測定も含めてほとんどない。まさに、State-of-the-art (レフェリーコメントより) な実験と言えるだろう。

図 1(b)に示すように、磁歪は結晶軸方向に大きく依存するが、全ての方向で H_m において不連続な変化を示す。体積磁歪と磁化から H_m および磁化率の圧力依存性を熱力学的に求めることができる。その結果は、実際の圧力実験結果をよく再現することから、定量性の良い高精度な実験と言える。各軸線磁歪から線磁歪平均(図中点線)を引くことにより求められた異方的線磁歪が、 b , c 軸は逆符号で同程度の大きさの変化を示すこと、つまり、メタ磁性転移で bc 面内で異方的な歪みが生じていることを明らかになった。さらに、ウランの $5f$ 電子の「局在・遍歴性二重性」描像に基づき、 UTe_2 のメタ磁性転移はウランの価数変化で説明できることを指摘された。このことは価数揺らぎがメタ磁性転移近傍の磁場に堅牢な超伝導発現に関わっていることを示唆しており、新たな視点での研究発展を促すことが期待される。価数転移の実験的証明や磁場角度依存性の解明など、多くの未解決問題は、著者達が自らに課した新たな難題として残っている。

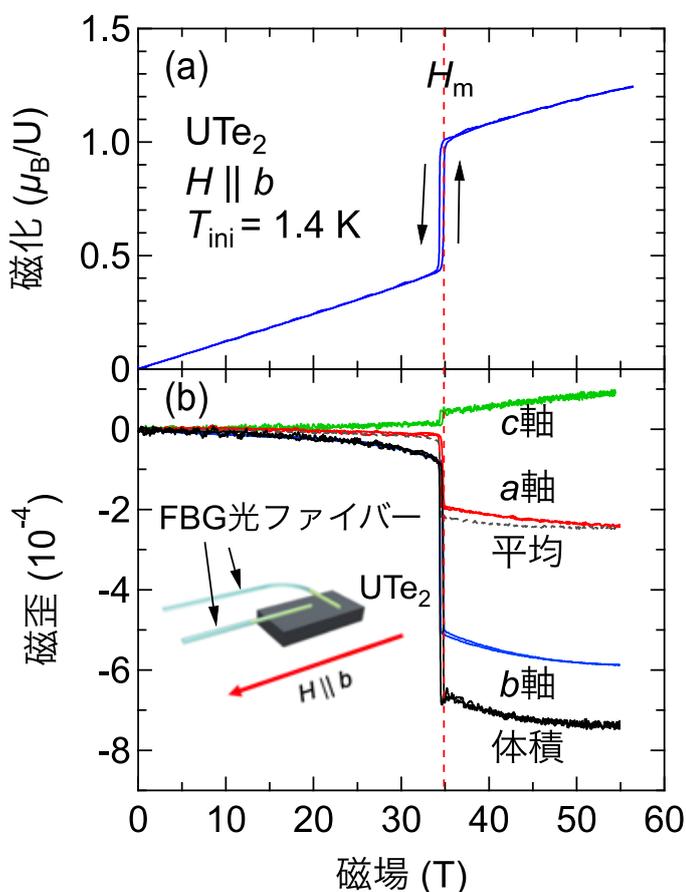


図 1. UTe_2 の b 軸に磁場(H)を印加したときの初期温度 1.4 K での(a)磁化と(b)各結晶軸方向の線磁歪と体積磁歪。内挿図は縦・横磁歪同時測定用セットアップの概念図。

原論文 (2022 年 5 月 17 日公開済)

[Magnetovolume Effect on the First-Order Metamagnetic Transition in \$UTe_2\$](#)

Atsushi Miyake, Masaki Gen, Akihiko Ikeda, Kazumasa Miyake, Yusei Shimizu, Yoshiki J. Sato, Dexin Li, Ai Nakamura, Yoshiya Homma, Fuminori Honda, Jacques Flouquet, Masashi Tokunaga, and Dai Aoki: J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 063703 (2022).

<情報提供：三宅厚志（東京大学物性研究所）>