

電子が凍るモット絶縁体を「溶かす」新しい方法を発見 —一定常電流で現れる巨大反磁性—

概要

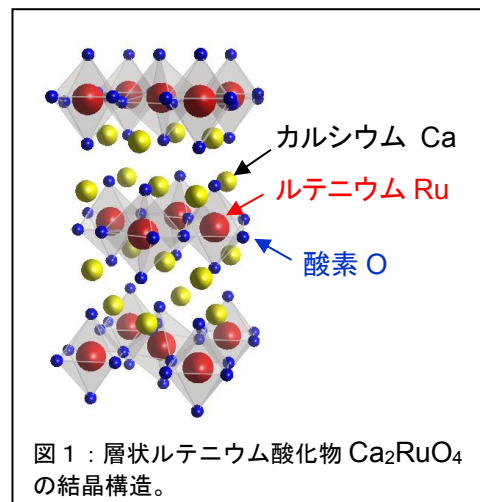
電子を通さない絶縁体の中で、電子同士の反発で身動きが取れず、電子が凍った状態に例えられるのがモット絶縁体です。モット絶縁体の構成元素を一部置き換えたり、また高い圧力をかけることで、凍った電子が「溶けて」電気が流れ始めると、高温超伝導やスピン三重項超伝導、また超巨大磁気抵抗効果などの目立った性質が現れることがよく知られています。チャンチャル・ソウ 日本学術振興会外国人特別研究員、米澤進吾 理学研究科助教、前野悦輝 同教授らは、元素置換や高圧より簡便な方法として、ルテニウム酸化物のモット絶縁体に電流を流すことで、磁場をはねのける巨大反磁性が現れることを発見しました。このような簡単な方法でモット絶縁体から新たな性質を引き出したことは驚くべきことで、他の物質にも応用できると考えています。

論文は米国 AAAS 発行の Science に掲載されました。本研究は、北村想太 マックスプランク研究所（ドレスデン、ドイツ）博士研究員、岡隆史 同グループリーダー、黒木和彦 大阪大学教授、そして中村文彦 久留米工業大学教授との共同研究です。

1. 背景

現代社会を支える電子技術は、半導体や金属（導電体）中の伝導電子をコントロールすることが基本となっています。これらに対し、伝導電子が凍った状態に例えられるモット絶縁体は、将来的な電子技術の材料のひとつとして期待されています。互いに身動きが取れず凍った電子を、その絶縁体の一部の元素の入れ替えや高圧環境に置くことで「溶かす」と、電子同士の結びつきの強い「強相関金属」となり、高温超伝導や超巨大磁気抵抗といった新しい性質が生まれます。

本研究で用いた層状ルテニウム酸化物 Ca_2RuO_4 （図1）は、1997年に前野教授のグループが初めて合成に成功した典型的なモット絶縁体です。カルシウムをストロンチウムで置き換えた強相関金属 Sr_2RuO_4 の超伝導は、画期的なスピン三重項超伝導と考えられています。モット絶縁体 Ca_2RuO_4 に乾電池程度の電圧をかけることで金属に変化することは、2013年に本研究の共同研究者の中村教授らから報告されていましたが、その詳しい過程はまだ検証されていませんでした。



2. 研究手法・成果

本研究では、久留米工業大学で作製したルテニウム酸化物 Ca_2RuO_4 の単結晶に電流を流し、電気抵抗と磁性を測定しました。その結果、電流の増加に伴いモット絶縁体の凍った電子がまさに溶け始める状態を作ることができるだけでなく、非常に大きな反磁性という驚くべき性質が現れることがわかりました。反磁性とは、外からかけた磁場をはねのける性質のことで、超伝導体や、グラファイト、ビスマスなどで大きな反磁性が知られています。今回の最も大きな発見は、電流を流すだけでモット絶縁体の電氣的・磁氣的性質を大きく変化させることができた点です。また、超伝導体以外ではこれまでで最大の反磁性を創り出すことにも成功しました (図 2)。

さらに理論解析を進めると、このルテニウム酸化物の絶縁性を次第に弱くしていくことで、グラファイトやビスマスと類似の非常に動きやすい伝導電子が現れて大きな反磁性を示すことも明らかになりました。

さらに理論解析を進めると、このルテニウム酸化物の絶縁性を次第に弱くしていくことで、グラファイトやビスマスと類似の非常に動きやすい伝導電子が現れて大きな反磁性を示すことも明らかになりました。

3. 意義・波及効果

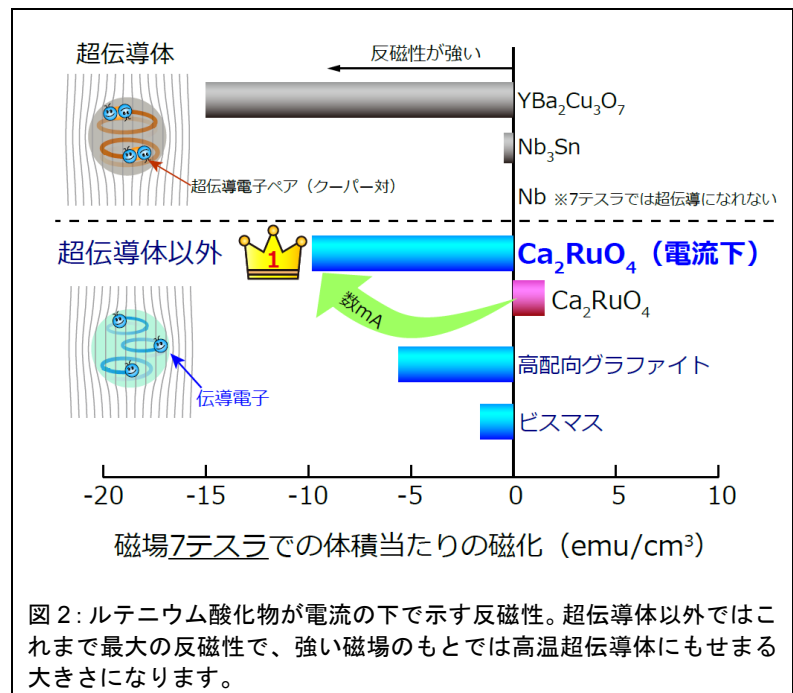
電流を流すだけでモット絶縁体の「凍った」電子を「溶かす」ことができ、元素置換や高圧では得られない新たな性質を創り出したことは、物性物理学の基礎研究にとってだけでなく、将来の電気・磁気信号のスイッチング・デバイス等への応用の観点からも極めて大きな意義があります。

今後の研究展開に関しては、まず、この新たな方法によって、今回発見のルテニウム酸化物以外のモット絶縁体からも、さらなる面白い性質を引き出せる可能性があります。また、電流が流れた「非平衡状態」という通常の熱平衡とは異なる状態を利用することで生まれた新現象は、新たな学術分野の開拓にもつながると期待できます。

4. 研究プロジェクトについて

この研究は、主に以下のプロジェクトによる支援を受けました。

- ・ 日本学術振興会 科学研究費補助金・基盤研究 S 「直流電場・電流：強相関電子系の新しい制御パラメータ」 (H29-33 年度) No. JP17H06136。
- ・ 同 科学研究費補助金・新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」 (H27-31 年度) Nos. JP15H05851, JP15H05852, JP15K21717。
- ・ 同 研究拠点形成事業 A (JSPS Core-to-Core program A) (H29-33 年度)。
- ・ 同 外国人特別研究員 (Chanchal Sow: H29-30 年度) No. JP17F17027。



<論文タイトルと著者>

タイトル : Current-induced strong diamagnetism in the Mott insulator Ca_2RuO_4

著者 : Chanchal Sow¹, Shingo Yonezawa¹, Sota Kitamura^{2, 3}, Takashi Oka^{3, 4}, Kazuhiko Kuroki⁵, Fumihiko Nakamura⁶ & Yoshiteru Maeno¹

チャンチャル・ソウ¹, 米澤進吾¹, 北村想太^{2,3}, 岡隆史^{3,4}, 黒木和彦⁵, 中村文彦⁶, 前野悦輝¹

¹京都大学 理学研究科, ²東京大学 理学系研究科, ³マックスプランク 複雑系物理学研究所, ⁴マッ

クスプランク 固体化学物理学研究所, ⁵大阪大学 理学研究科, ⁶久留米工業大学 教育創造工学科

掲載誌 : Science (Nov. 24, 2017)