

2020年2月3日

報道関係各位

ソフトマターのように振る舞う電子の発見とその機構解明
～電子物性物理学とソフトマター物理学の架け橋～

東京理科大学
東北大学金属材料研究所
東京大学大学院工学系研究科

研究の要旨とポイント

- 電子が粒子としての性質を持つ絶縁体の状態から、波としての性質を持つ金属の状態への転移をモット転移と呼び、モット転移近傍では高温超伝導や巨大磁気抵抗など、産業応用上重要な物理現象が観測されています。
- 本研究では、モット転移近傍に位置する有機物質に乱れを導入すると、電子がソフトマターのように振る舞い、動きが極端に遅くなることを明らかにしました。
- この研究結果は、電子物性物理学とソフトマター物理学の懸け橋となる重要な成果であると同時に、モット転移近傍で起こる多彩な物理現象に新たな光を当てるものです。

東京理科大学理学部応用物理学科の大学院生の山本陸氏（博士後期課程2年）と古川哲也助教（研究当時。現在は東北大学金属材料研究所 助教）、伊藤哲明教授、東北大学金属材料研究所の佐々木孝彦教授、東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の宮川和也助教、鹿野田一司教授の研究グループは、ある種の有機固体物質の中で、電子の動きが極端に遅くなり電子がソフトマターの挙動を示していることを見出し、さらにその発現メカニズムを解明することに成功しました。

硬い固体の中の電子の振る舞いを調べる研究分野として、電子物性物理学があります。一方、高分子やゲル、コロイドといったやわらかい物質中の構成粒子の振る舞いを調べる研究分野としてソフトマター物理学があります。この両学問分野は、これまではほとんど関連の無い物理分野と認識されてきていました。

本研究グループは電子間の相互作用が重要な役割を果たすモット転移近傍に位置する有機物質にエクス線を500時間照射すると、結晶格子に乱れが生じ、電子の運動が通常の固体中に比べて100万倍から1億倍も遅くなることを明らかにしました。ソフトマターにおいては、構成粒子間の相互作用により、構成粒子が極端にゆっくりと運動することが知られていますが、この結果は、固体中の電子がまさにソフトマター的な振る舞いをしていることを示したものです。

この研究結果は、これまでほとんど独立に発展してきた電子物性物理学とソフトマター物理学の懸け橋となる重要な成果です。また、モット転移近傍は、高温超伝導や巨大磁気抵抗など、産業応用上重要な現象が観測されているため、今後、本研究を発展させることで、次世代のエレクトロニクス開発において欠かせない物理現象の理解につながると期待されます。

本論文は、Physical Review Letters 誌の Editors' Suggestion（編集部による注目論文）に選定されました。

【研究の背景】

電子は電荷をもっているため、物質の中で互いに反発しあっています。この反発力が大きい場合、電子は自由に動けず、粒子としての性質を持つモット絶縁体という状態になります。反対に、反発力が小さい場合は、電子は波として自由に動き、金属状態になります。このように電子相関の大きさに応じて電子の粒子性と波動性が移り変わることをモット転移とよびます。モット転移近傍では、高温超伝導や巨大磁気抵抗など、産業応用上重要な現象が実験的に観測されているため、モット転移近傍の性質の解明は基礎分野だけでなく、応用分野からも強く期待されています。このモット転移は、結晶構造に乱れが無い理想的な場合では、水から水蒸気への変化と同質の急激な変化である「1次相転移」となることが知られていましたが、乱れのある現実物質でどのような変化となるかは未解明でした。

【研究結果の詳細】

本研究グループは、結晶構造の乱れを制御した実験系において電子の振る舞いを検証するために、電子相関と結晶構造の乱れを、加圧とエックス線照射によって、それぞれ独立に制御できる擬二次元有機物質 κ -(ET)₂Cu[N(CN)₂]Cl（以下、 κ Cl）を試料として用いました。

その結果、核磁気共鳴（NMR）実験で、500時間エックス線照射することで乱れを導入した κ Cl とエックス線照射を行っていない κ Cl の電子状態を調べた結果、500時間エックス線照射された κ Cl では電子の動きが100万倍から1億倍も遅くなっていることが明らかになりました。

この結果は、乱れの導入によって、モット転移近傍に位置する κ Cl において、電子がソフトマターのように振る舞う特異な状態が生じていることを意味しています。さらに、500時間エックス線照射された κ Cl に圧力を加えることによって、ソフトマター的な振る舞いを示す電子状態は消失しました。

これらの結果から、本研究グループは、試料が（1）モット転移近傍に位置する、（2）結晶構造に乱れを有する、という2つの要因を同時に満たすことが、電子がソフトマター的な振る舞いを示す条件であると結論付けました。

水から水蒸気への変化に代表されるような、物質がある状態から別の状態への急激な変化は「1次相転移」と呼ばれます。モット転移も結晶構造に乱れが無い場合は、この「1次相転移」になることが知られていました。本研究においては、結晶構造に乱れを導入した場合には、このモット転移の「1次相転移」性が消失し、代わりに「ソフトマター」性が現れることを見出したこととなります。これは磁性物理学において議論されてきた「磁気グリフィス相」という概念に類似しており、電子のグリフィス相ということで「電子グリフィス相」と呼ぶべき特異概念により、ソフトマター性が現れたと解釈することが出来ます（図1）。

今回の成果について伊藤教授は、「これまで電子物性物理学とソフトマター物理学はほとんど独立に発展してきましたが、本研究は両学問分野をつなぐ重要な成果で、今後、分野間の垣根を超えた議論が展開されると期待されます。また、モット境界近傍では高温超伝導や巨大磁気抵抗など、多彩な物理現象が生じます。今回の成果は、こうした現象の解明に向けた重要な一歩です。」として、今後の研究・開発への期待を示しています。

※ 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (25220709, 17K05532, 18H05225, 19H01833) の助成を受けて実施したものです。

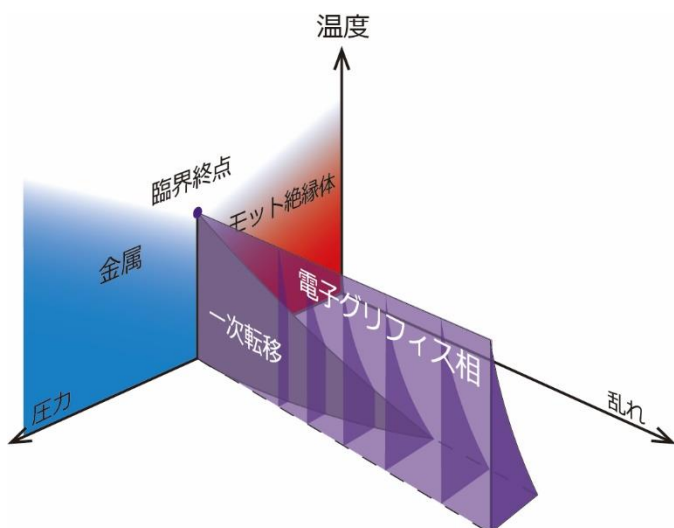


図1 本研究で提唱されたモット転移系の温度-圧力-乱れの3パラメーター相図。電子グリフィス相と書かれている領域で電子にソフトマター性が現れる。

【論文情報】

雑誌名： Physical Review Letters 2020年1月31日 オンライン掲載
 論文タイトル： Electronic Griffiths Phase in Disordered Mott-Transition Systems
 著者： Riku Yamamoto, Tetsuya Furukawa, Kazuya Miyagawa, Takahiko Sasaki, Kazushi Kanoda, and Tetsuaki Itou
 DOI： 10.1103/PhysRevLett.124.046404

【発表者】

山本陸 東京理科大学大学院 理学研究科応用物理学専攻 後期博士課程 (筆頭著者)
 古川哲也 東京理科大学 理学部第一部応用物理学科 助教 (当時。筆頭著者)
 東北大学金属材料研究所 助教 (現在)
 宮川和也 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 助教
 佐々木孝彦 東北大学金属材料研究所 教授
 鹿野田一司 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授
 伊藤哲明 東京理科大学 理学部第一部応用物理学科 教授 (責任著者)

【研究に関する問い合わせ先】

東京理科大学 理学部第一部応用物理学科 教授
伊藤 哲明 (いとう てつあき)

東北大学 金属材料研究所 教授
佐々木 孝彦 (ささき たかひこ)

東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 教授
鹿野田 一司 (かのだ かずし)

【報道・広報に関する問い合わせ先】

東京理科大学 広報部 (担当：清水)

国立大学法人東北大学 金属材料研究所 情報企画室 広報班

国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科・工学部 広報室