

電子の粒子性と波動性の新たな狭間
～粒子性を持つ絶縁体状態と波動性を持つ金属状態の間を
ゆっくりと行き来する電子の発見～

東京理科大学
東京大学
理化学研究所

研究の要旨

東京理科大学理学部第一部 伊藤哲明准教授、京都大学人間・環境学研究科 前川覚教授（当時）、理化学研究所 加藤礼三主任研究員、東京大学工学系研究科 鹿野田一司教授らをはじめとする研究グループは、有機物質中の電子が、波動性を有した金属状態と粒子性を有した絶縁体状態の間でゆっくりと揺らぐ現象を発見しました。本研究成果は米国科学誌 *Science Advances* 誌に 8 月 11 日付けで掲載されます。

【発表者】

- 伊藤哲明（東京理科大学 理学部第一部応用物理学科 准教授 / 東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任講師：研究当時）
渡辺恵里（京都大学大学院 人間・環境学研究科 大学院生：研究当時）
前川覚（京都大学大学院 人間・環境学研究科 教授：研究当時）
田嶋陽子（理化学研究所 協力技術員：研究当時）
田嶋尚也（東邦大学 理学部物理学科 教授 / 理化学研究所 専任研究員：研究当時）
久保和也（北海道大学 電子科学研究所 助教：研究当時 / 理化学研究所 協力研究員：研究当時）
加藤礼三（理化学研究所 主任研究員）
鹿野田一司（東京大学大学院 工学系研究科 教授）

【研究の背景】

ミクロな世界の存在である電子は、粒子と波動の両面の性質を兼ね備えます。又、これら電子は電荷を持っているため、物質の中で互いに反発し合います。反発力が大きいと、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呼ばれる状態になります（図 1）。一方で反発力が小さくなると、電子は波として自由に動くようになり、絶縁体から金属へと性質を劇的に変えることとなります（図 2）。このように電子の粒子性と波動性が移り変わる領域をモット境界と呼び、この領域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きています。従ってこのモット境界の性質を理解することは現代物理学上の大きな課題となっています。

モット絶縁体状態
(電子はお互いの反発のため粒子として局在)

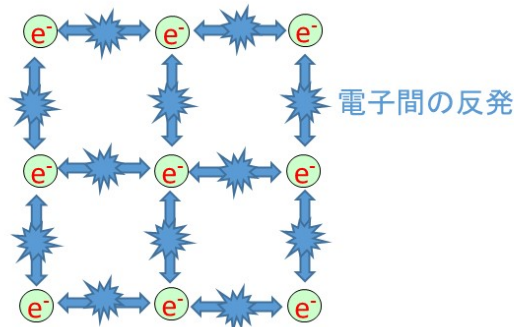


図1 モット絶縁体状態

電子はお互いの反発のため、粒子としての性質を持ち、局在している。

金属状態
(電子は波として自由に運動)

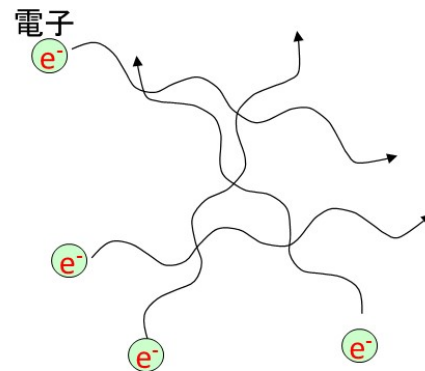


図2 金属状態

電子は波動としての性質を持ち自由に運動している。

【研究成果の概要】

従来、電子の粒子性と波動性が移り変わるモット境界は、水と水蒸気の移り変わりと同様に、十分低温では「相転移(注1)」という性質を持ち、不連続な変化があると考えられてきました。本研究グループは、結晶格子に乱れが導入された2次元モット絶縁体有機物質 $\text{EtMe}_3\text{Sb}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$ (図3) という物質に圧力をかけモット境界にいたらせ、絶対温度2 K (注2) という低温まで温度を変えながら、核磁気共鳴(注3) 実験によりそのときの電子状態を観測しました。その結果、この物質のモット境界においては、従来の常識(図4) に反して、粒子性を持つモット絶縁体状態と波動性を持つ金属状態の間を電子がゆっくりと行き来している現象を発見しました。すなわち、圧力-温度相図上で、従来の相転移描像ではなく、新たな電子相(粒子性と波動性の間をゆっくり揺らぐ電子グリフィス相と呼ぶべき新奇相)が実現していることを見出したこととなります(図5)。このようなモット境界は今まで観測されたことはなく、基礎学理上・応用上重要な立ち位置を占めるモット境界描像の新たな理解を与えるものです。

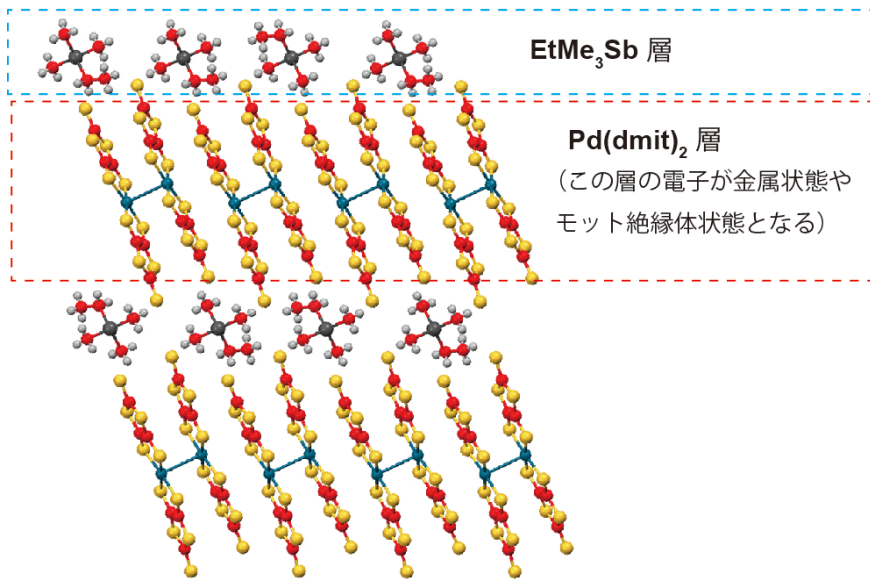


図3 2次元モット絶縁体有機物質 EtMe₃Sb[Pd(dmit)₂]₂

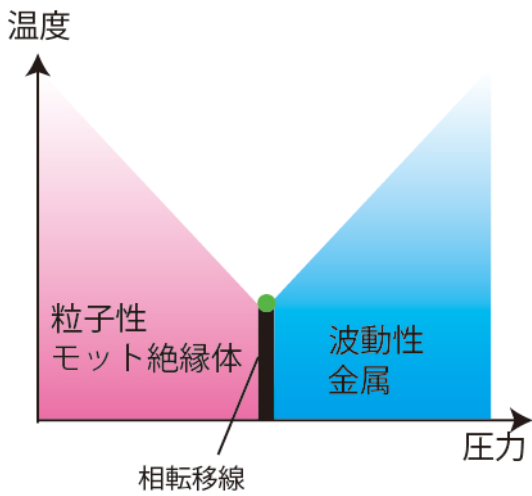


図4 従来のモット境界の相図
 粒子性 (モット絶縁体) と波動性
 (金属) は圧力により相転移を伴
 い瞬時に入れ替わる。

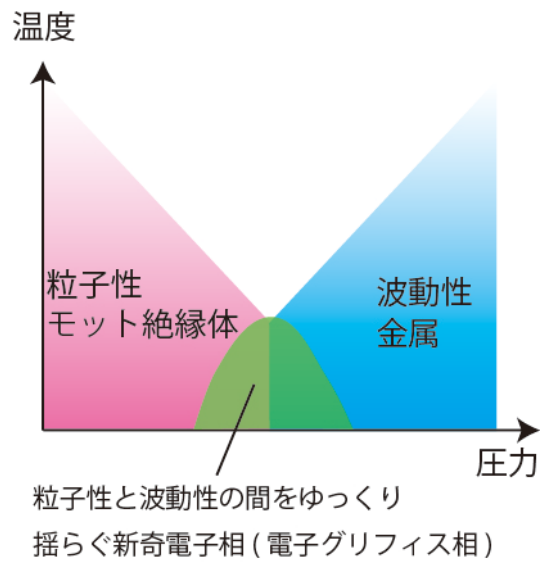


図5 本研究で見出した新たな
 モット境界の相図
 粒子性と波動性の間をゆっくり
 揺らぐ新奇電子相を発見。

【今後の展望】

高温超伝導、巨大磁気抵抗などの物理現象の背景には、モット境界があります。本研究はこのモット境界の基礎理解を書き換えるもので、これらの応用上重要な電子物性分野の研究に新たな視点を与えるものとなります。将来的に、高温超伝導の探索や次世代エレクトロニクス開拓の新たな指針となる可能性がありそうです。

【発表雑誌】

雑誌名：「Science Advances」

論文タイトル：

"Slow dynamics of electrons at a metal–Mott insulator boundary in an organic system with disorder"

著者：

Tetsuaki Itou, Eri Watanabe, Satoru Maegawa, Akiko Tajima, Naoya Tajima, Kazuya Kubo, Reizo Kato, Kazushi Kanoda

DOI 番号： 10.1126/sciadv.1601594

用語

(注1) 相転移：温度や圧力などの外部パラメーターの変化により、物質の状態が質的に異なる状態へ変化することを言う。例えば「水」は100℃以上にすると「水蒸気」という状態に瞬時に変わり、水と水蒸気との間の中間状態は存在しない。

(注2) 絶対温度：全ての熱運動が消失する温度を0 K（ケルビン）とし、そこから測った温度のことを言う。本実験で到達させた絶対温度2 Kはマイナス271℃に対応する。

(注3) 核磁気共鳴：物質中の原子核の共鳴現象を観測することにより電子の運動を知ることができる実験手法。物質を静磁場中に置き、物質中の核スピン磁気モーメントを歳差運動させ、その運動周期に等しい周波数を持つ電磁波を核スピンの周りに加える事で、核スピンの周囲に存在する電子の情報を得ることができる。

【本研究内容に関するお問合せ先】

- 東京理科大学 理学部第一部 応用物理学科准教授 伊藤 哲明

Tel : 03-5876-1398

e-mail : tetsuaki.itou@rs.tus.ac.jp

- 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

Tel : 03-5841-6830

e-mail : kanoda@ap.t.u-tokyo.ac.jp

- 理化学研究所 加藤分子物性研究室 主任研究員 加藤 礼三

Tel : 048-467-9408

e-mail : reizo@riken.jp

【当プレスリリースの担当事務局】

- 東京理科大学 研究戦略・産学連携センター (URA センター)

〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

Tel : 03-5228-7440 e-mail : ura@admin.tus.ac.jp

*本資料中の図等のデータはご用意しております。上記 URA センターまでご連絡頂ければ幸いです。