

## 金属と絶縁体の狭間で電子が見せる特異な臨界状態を捉えた

### –モット転移の量子臨界現象の発見–

#### 1. 発表者：

古川 哲也 （東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 学術支援専門職員）  
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）  
谷口 弘三 （埼玉大学大学院理工学研究科物質科学部門 准教授）  
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物理工学専攻 教授）

#### 2. 発表のポイント：

- ◆電子間の相互作用によって起こる金属から絶縁体への転移の量子臨界現象（注1）を、分子性結晶（注2）を用いた実験によって明らかにした。
- ◆電子の集団が金属と絶縁体の境界で普遍的な性質をもつようになることを実験的に初めて見出した。
- ◆量子臨界状態が持つ大きなゆらぎを背景に、新しい電子状態の探索や、特異な電子的応答の開拓が期待される。

#### 3. 発表概要：

電子は電荷を持つために、物質中で互いに反発し合っています。反発力が大きいとき、電子は粒子として互いにぶつかることを避けるため自由に動けず、モット絶縁体と呼ばれる状態になります。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、電子の集団は絶縁体から金属へとその性質を劇的に変えます（モット転移；図1）。この現象は、銅酸化物高温超伝導（注3）をはじめとする多くの特異な現象が生じる起源になっています。特に近年、モット転移の量子臨界現象（注1）と呼ばれる、金属とモット絶縁体の間のマイクロなスケールの量子力学的ゆらぎ（注4）がマクロなスケールまで波及する現象が理論的に研究されており、その実験的な検証が待ち望まれていました。

今回、東京大学大学院工学系研究科の古川哲也博士（学術支援専門職員）、宮川和也助教、鹿野田一司教授らを中心とする研究チームは、高圧力・低温環境下において、低温極限における性質が異なる三種類の分子性結晶（注2）の電気抵抗を測定し、各物質の電気抵抗が数十ケルビン程度の温度領域で量子臨界現象に特有のスケーリング則（注5）を高い精度で満たしていることを示し、モット転移の量子臨界現象を実験的に初めて明らかにしました（図2）。この結果は、金属と絶縁体の狭間にある物質は、低温になると物質ごとの個性を反映した多様な金属あるいは絶縁体状態のいずれかに陥るのに対し、温度が上がると物質によらない普遍的な性質を持つ特異な電気伝導状態になるという新しい見方を提示するものです。

今回の研究成果を元に、新しく見つかった量子臨界領域が持つ大きなゆらぎを背景にした、新しい電子状態、物性機能の開拓が今後期待されます。本研究は、埼玉大学、理化学研究所と共同で行われ、2015年2月10日（日本時間）に英国科学誌「Nature Physics」のオンライン版で公開されました。

#### 4. 発表内容：

電子は負の電荷を持つため互いに反発し合うので、物質の中の電子の集団は、お互いに影響を及ぼし合いながらひしめき合っています。電子は粒子性と波動性を両方兼ね備えています。反発力が弱い（電子相関が弱い）ときには波動性が優り、電子が結晶中を自由に動き回ること、電気を流す金属状態が実現されます。一方、反発力が強くなる（電子相関が強い）と粒子性が優り、電子は互いの衝突を避けるため動けず、電気を流さない絶縁体状態が生じます。この金属と絶縁体との劇的な状態の変化（図1）はモット転移と呼ばれており、加圧などの実験的手法により電子同士に働く実効的な反発力を変化させモット転移が生じると、いわば電子の集団が作る社会の体制が波動的なものから粒子的なものへと劇的に変わる「革命」のような状況が実現します。このような電子状態の劇的な変化がひとつの物質内で起きることを明らかにすることは、私達の物質観をより豊かなものにし、大きな学術的価値を持ちます。またこのモット転移は、銅酸化物高温超伝導をはじめとする多くの興味深い電子物性の基礎概念にもなっており、物質科学の発展を促すエンジンとも位置づけられる現象です。

半世紀以上にわたって研究され続けてきたモット転移ですが、近年注目されている現象のひとつに、モット転移の量子臨界現象があります。すなわち、絶縁体と金属の狭間で、電子の集団が量子力学的なゆらぎを持つ特異な臨界流体になっている可能性です。このような状態が実現すると、結晶中においてミクロなスケールで生じる量子力学的なゆらぎが、マクロなスケールにまで拡大されるという臨界的な振る舞いが生じると考えられており、その存在が注目されてきました。しかし、モット転移の量子臨界現象は理論的には精力的に研究されてきたものの、実験的な検証はこれまでされてきませんでした。

今回、東京大学大学院工学系研究科の古川哲也博士（学術支援専門職員）、宮川和也助教、鹿野田一司教授らを中心とする研究チームは、高圧力・低温環境下において、三種類の異なる分子性結晶 $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub>、 $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Cl、EtMe<sub>3</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>（ET：ビス（エチレンジチオ）テトラチアフルバレンの略、Cu：銅、C：炭素、N：窒素、Cl：塩素、Et：エチル基、Me：メチル基、Sb：アンチモン、Pd：パラジウム、dmit：1, 3-ジチオール-2-チオン-4, 5-ジチオレート）の電気抵抗を測定し、各物質の電気抵抗が量子臨界現象に特有のスケール則を高い精度で満たしていることを示し、モット転移の量子臨界現象を実験的に初めて明らかにしました（図2）。

研究チームが用いた三種類の分子性結晶は、低温極限でそれぞれ、金属、超伝導、反強磁性秩序状態（注6）、スピン液体（注7）などの異なる状態を示し、加圧によってモット転移を起こすことが知られていました。個々の物質の個性が際立つ低温極限の状態とは対照的に、数十ケルビン程度の温度領域では三種類の物質が共通してスケール則を満たすことが今回わかり、量子臨界性を持つ、物質に依らない普遍的な状態が実現していることが明らかになりました。これは、結晶中の電子が、温度が下がるほど物質の個性を反映した状態へと陥るのに対し、温度が上がると物質の個性によらない普遍的な性質を反映するようになるという、物質科学ひいては物理学全般に適用できる概念をあらためて提唱するものです。

また得られた結果を、動的平均場理論（注8）という手法によって計算された理論的な予測と比較した結果、臨界指数と呼ばれる量子臨界現象を特徴付ける値が実験と理論で近い値を取ることが明らかになり、モット転移を理論的に研究する上での重要な指針を提供することができました。今回の研究成果を元に、新しく見つかった量子臨界領域を持つ大きなゆらぎを背景にした、新しい電子状態、物性機能の開拓が今後期待されます。

本研究は、埼玉大学、理化学研究所と共同で行われ、2015年2月10日（日本時間）に英国科学誌「Nature Physics」のオンライン版で公開されました。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Physics Advance Online Publication」2月10日（日本時間）

論文タイトル：

Quantum criticality of Mott transition in organic materials

著者：

Tetsuya Furukawa\*, Kazuya Miyagawa, Hiromi Taniguchi, Reizo Kato, and Kazushi Kanoda\*

DOI 番号：10.1038/nphys3235

アブストラクト URL：

<http://www.nature.com/nphys/journal/vaop/ncurrent/abs/nphys3235.html>

## 6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科

物理工学専攻 学術支援専門職員 古川 哲也（ふるかわ てつや）

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）

## 7. 用語解説：

（注1）量子臨界現象：臨界現象とは複数の相（気体や液体など互いに区別されるマクロな状態）が連続的だが特異性を持って移り変わる場合に、系のゆらぎが非常に大きくなる現象である。気体-液体相転移における、臨界点近傍の密度ゆらぎの発散などが広く知られている。量子臨界現象では、増大するゆらぎの起源が、通常の臨界現象の起源である熱ゆらぎではなく、量子力学的ゆらぎ（注4）に起因する。そのため、量子臨界現象は、本来ミクロなスケールでのみ観測される量子力学的な効果がマクロなスケールまで及ぶ特異な現象とされている。

（注2）分子性結晶：ダイヤモンドなどの原子を構成単位とする結晶と異なり、分子を構成単位とする結晶。分子同士は共有結合などに比べて弱い分子間力によって結合するため、結晶が圧力変化などの外部環境の変化に応答しやすい特徴を持つ。

（注3）銅酸化物高温超伝導体：超伝導と呼ばれる、物質の電気抵抗がゼロになり、物質内に磁場の侵入を許さない状態が生じる銅酸化物のこと。その中に、超伝導となる温度が、既知の超伝導体に比べ遥かに高い絶対温度 100 ケルビン（摂氏マイナス 173 度）を超える物質が存在することから、高温超伝導と呼ばれる。その母物質である銅酸化物がモット絶縁体であることから、超伝導の発現にモット転移の物理が深く関係していると考えられている。

(注4) 量子力学的ゆらぎ：量子（電子や光子など）が持つ、位置と運動量などが、不確定性原理により同時に確定できない性質に基づくゆらぎのこと。熱的なゆらぎと異なり絶対零度でも存在する。

(注5) スケーリング解析：ある物理量が二つの変数  $A, B$  によって決まっている時、それらの変数を組み合わせた一つのスケーリング変数（例えば、 $A/B$ ）によって、その物理量が単一の曲線に表されるかを検証する解析。もし物理量が単一の曲線に乗っていれば、もともとの二つの変数の間には、一定の関係が満たされていることになる。量子臨界現象においては、量子力学的ゆらぎをコントロールする変数  $\delta g$  と、絶対温度  $T$  に対して、物理量  $X$  が、 $X = f(T/|\delta g|^{z\nu})$  という臨界指数  $z\nu$  とスケーリング関数  $f$  を用いて表されることが知られている。

(注6) 反強磁性秩序状態：磁石の最小単位は個々の電子が持つスピン磁気モーメントである。物質中の結晶格子に局在している電子が持つこのマイクロな磁石が、隣同士向きを逆にして自発的に整列している状態を反強磁性秩序状態と呼ぶ。

(注7) スピン液体：電子のスピン磁気モーメントが互いに強く相互作用しているものの、絶対零度においても反強磁性秩序を起こさない状態。高温において熱ゆらぎによってスピン磁気モーメントが無秩序に動いている状態をスピンの気体、反強磁性秩序のようにスピン磁気モーメントが整列し止まっている状態をスピンの固体とみなすとき、スピン同士の向きの相関が強いが無秩序の状態を、短距離的な位置の相関があるにもかかわらず無秩序状態にある液体状態を模して、スピン液体状態と呼ぶ。

(注8) 動的平均場理論：強く相互作用した電子系を、ある結晶格子点上の電子がそれを取りまく有効媒質と相互作用するという描像で取り扱う理論。空間次元が仮想的に無限次元であるとする厳密な結果を与えるとされ、モット転移を正確に取り扱うことができる理論として有力視されている。

8. 添付資料：

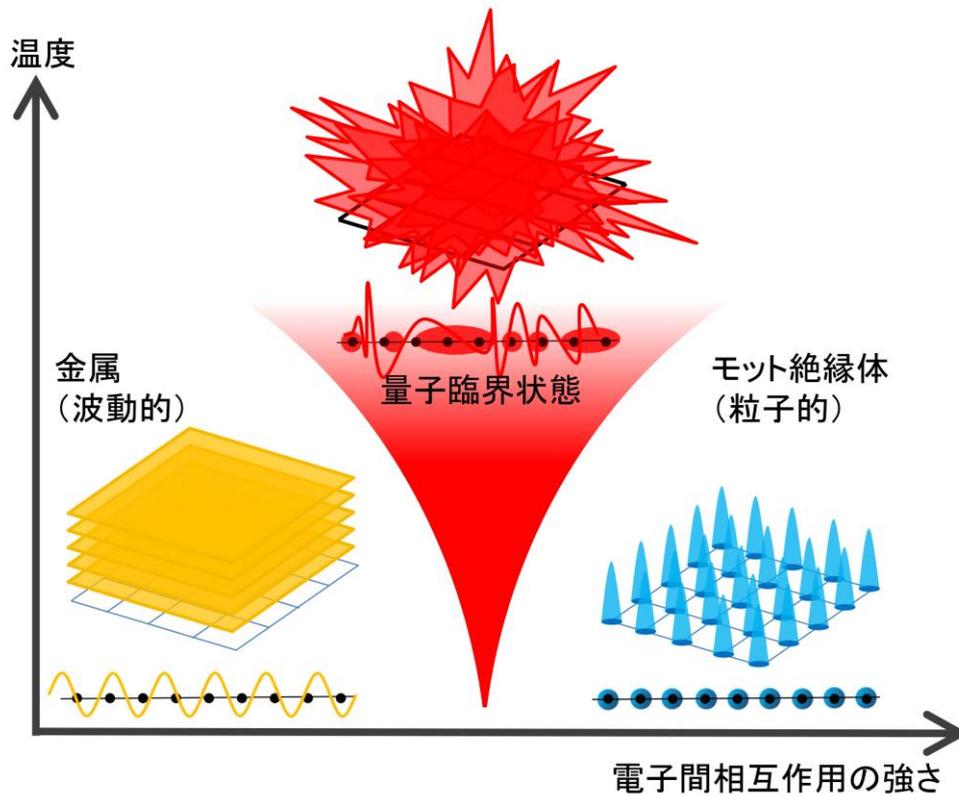


図1 モット転移の量子臨界現象をあらわす概念図

電子間の反発力が小さい、電子相関が弱い領域では、電子の集団は波動的な性質を示し、結晶中に広がった金属状態になる。一方、電子間の反発が強い、電子相関が強い領域では、電子の集団は粒子的な性質を示し、空間的に局在したモット絶縁体になる。両者の間ではモット転移が生じるとともに、電子の集団が強い量子力学的なゆらぎにさらされ、量子臨界状態が生じる。

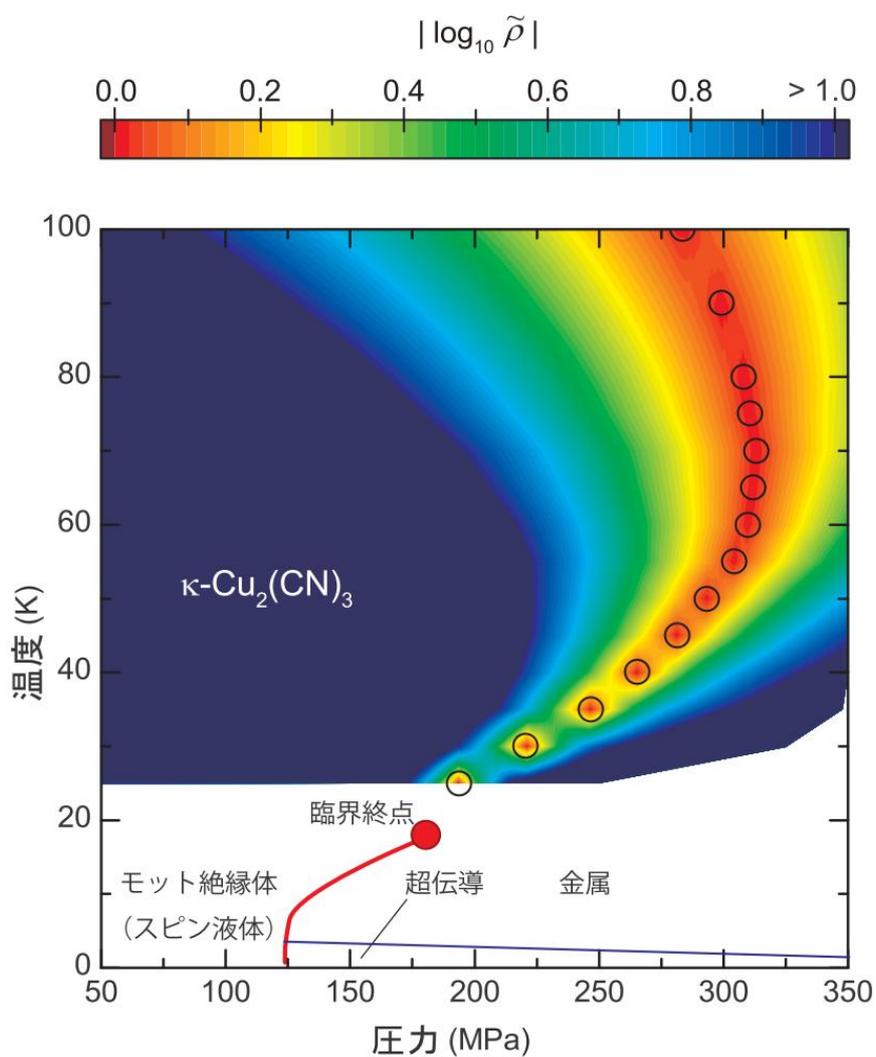


図2  $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}_2\text{(CN)}_3$  の温度-圧力相図

加圧するほど電子相関が弱くなる。図中の色は、金属と絶縁体の境界の値で規格化された電気抵抗率（の常用対数の絶対値）の値に対応している。明るい色の領域がモット転移の量子臨界領域に相当する。