



## 磁性体が乱れによって量子スピン液体に生まれ変わる

### 1. 発表者：

- 古川 哲也 (東京理科大学理学部第一部応用物理学科 助教 / 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：研究当時)
- 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)
- 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)
- 伊藤 美穂 (埼玉大学大学院理工学研究科物質科学部門大学院生：研究当時)
- 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)
- 斉藤 みく (東北大学金属材料研究所 大学院生：研究当時)
- 井口 敏 (東北大学金属材料研究所 准教授)
- 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)

### 2. 発表のポイント：

- ◆分子性結晶（注1）にX線を照射すると、電子スピン（注2）が規則的に整列している磁性体が量子スピン液体（注3）に変わることを発見した。
- ◆強く相互作用する電子集団に乱れを導入することによって量子スピン液体を発現させることに初めて成功した。
- ◆新規量子相を乱れによって発現させるというこれまでにない物質相の探索方法を提示した。

### 3. 発表概要：

結晶中の電子やスピンは高温では熱的なゆらぎにより無秩序状態を示しますが、低温になると磁気秩序、超伝導などさまざまな秩序化現象を示すことが広く知られています。このような秩序化現象に対して、結晶中の欠陥などに起因する乱れの効果は秩序化を曖昧なものにする場合が多く、電子状態の研究においては邪魔な存在だと多くの場合考えられてきました。一方で、電子同士が強く相互作用する電子集団においては、乱れの効果がどのような形で現れるかはよくわかっていませんでした。

今回、東京大学大学院工学系研究科の古川哲也学術支援専門職員（研究当時）、宮川和也助教、鹿野田一司教授、東北大学金属材料研究所の佐々木孝彦教授らを中心とする研究チームは、分子性結晶の磁性体にX線を照射することによって乱れを導入した結果、結晶がもともと示していた反強磁性磁気秩序（注4）が絶対零度（注5）に近い340 mKという極低温まで消失していることを核磁気共鳴（注6）実験により明らかにしました。この結果は、強く相互作用する電子集団に乱れを導入することで、量子スピン液体状態を生み出すことに初めて成功したことを意味します。本研究は、現在世界中で盛んに研究されている量子物質や量子液体相を乱れによって発現させるという、これまでにない物質相の探索方法を提示するものです。

本研究は、東京大学、東京理科大学、埼玉大学、東北大学の共同研究として行われ、米国科学誌「Physical Review Letters」（オンライン版2015年8月10日付、雑誌版8月14日付）に掲載される予定です。

#### 4. 発表内容：

(背景)

現代の物質科学、物性物理学においては、物質中の新しい量子状態の発見とその理解、応用が大きな目的の一つとなっています。物質中の量子状態を考える上で、結晶が持つ不完全性（不純物、欠陥等）に起因する乱れの効果が古くから研究されてきました。一般に、結晶中の電子やスピンは高温では熱的なゆらぎにより無秩序状態を示しますが、低温になると磁気秩序、超伝導など様々な秩序化現象を示すことが広く知られています。このような秩序化現象に対して、乱れの効果は秩序化を曖昧なものにしてしまう場合が多く、秩序化した電子状態の研究、あるいは新しい量子状態の探索においては、邪魔な存在だと多くの場合考えられてきました。一方で、電子同士が互いに強く相互作用する電子集団においては、相互作用とかけ合わさった乱れには、この負の効果を超越する効果が期待されます（図1）。それは、乱れという電子に対する局所的な効果が、電子同士の相互作用によって広く伝播し、系全体として質的に異なる状態を生む可能性があるからです。

(研究内容と成果)

今回、研究チームは、分子性結晶 $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Cl (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)と呼ばれる、低温で反強磁性磁気秩序を示す磁性体（反強磁性モット絶縁体）に注目しました。この物質はわずかな圧力を加えることで金属化することが知られており、結晶中の強く相互作用する電子が、金属になる寸前のところで絶縁体になっているのが特徴です。本研究ではまず、この物質に対しX線を500時間照射し、結晶中に乱れを導入しました。そしてこの結晶の磁性を絶対零度に近い340 mKという極低温まで、核磁気共鳴実験によって測定したところ、核磁気共鳴スペクトルが温度を下げても変化しないことを観測できました（図2）。これは、X線照射前の結晶が示していた反強磁性磁気秩序が、乱れによって完全に消失したことを示しています。一方、電子スピンは秩序化しないものの激しくゆらいでいることも核磁気共鳴実験でわかりました。これらの結果は現在世界中で探索が行われている量子スピン液体状態が実現していることを示唆するものであり、本来であれば互いに強く相互作用して秩序状態となる電子スピンの乱れによって量子スピン液体という新たな相に生まれ変わったことを意味します。

(本研究の意義、今後の展望)

本研究は、強く相互作用する電子の環境を乱すという、一見負の効果をもたらすと考えられる外部操作が、意外にも新しい量子相を発現させるという、新規な物質相の探索における逆説的で新しい方法を提示しています。

本研究は、東京大学、東京理科大学、埼玉大学、東北大学の共同研究として行われ、米国科学誌「Physical Review Letters」（オンライン版2015年8月10日付、雑誌版8月14日付）に掲載される予定です。

#### 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Physical Review Letters」（オンライン版2015年8月10日付、雑誌版8月14日付）

論文タイトル：Quantum Spin Liquid Emerging from Antiferromagnetic Order by Introducing Disorder

著者：T. Furukawa, K. Miyagawa, T. Itou, M. Ito, H. Taniguchi, M. Saito, S. Iguchi, T. Sasaki, and K. Kanoda

DOI 番号：10.1103/PhysRevLett.115.077001

アブストラクト URL：<http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.115.077001>

## 6. 問い合わせ先：

東京理科大学理学部第一部 応用物理学科  
助教 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）

東北大学金属材料研究所 低温電子物性学研究部門  
教授 佐々木 孝彦（ささき たかひこ）

## 7. 用語解説：

（注1）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2）スピン：電子の自転運動とみなせるような、角運動量を伴う電子の内部自由度。スピン磁気モーメントと呼ばれる磁石の最小構成単位と対応している。

（注3）量子スピン液体：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磁気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」、磁気秩序によって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、）量子スピン液体と呼ぶ。

（注4）反強磁性磁気秩序：物質中の結晶格子に局在している電子が持つスピン磁気モーメントと呼ばれるミクロな磁石が、隣同士向きを逆にして自発的に整列している状態、および、その秩序のこと。

（注5）絶対零度：熱力学における温度の下限值。絶対零度では、系に熱ゆらぎがまったく存在しない。

（注6）核磁気共鳴：結晶内部のミクロな磁性を知ることができる実験手法。物質を静磁場中に置くことで、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加える事で、核スピンの周囲に存在する電子スピンの情報を得ることができる。

8. 添付資料：

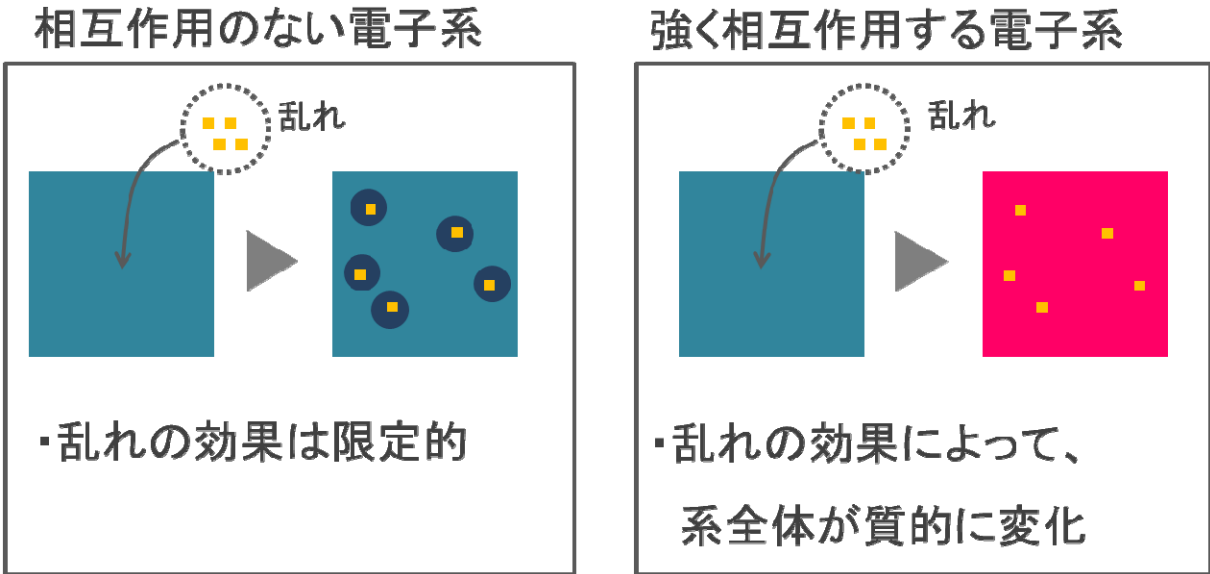


図1 強く相互作用する電子系に対する乱れの効果をあらわす概念図

電子間に相互作用がない系では乱れの効果は限定的である場合が多い。一方で、電子間に相互作用が強い系では乱れの効果と相互作用の効果がかけあわさって、系全体が質的に変化する可能性がある。

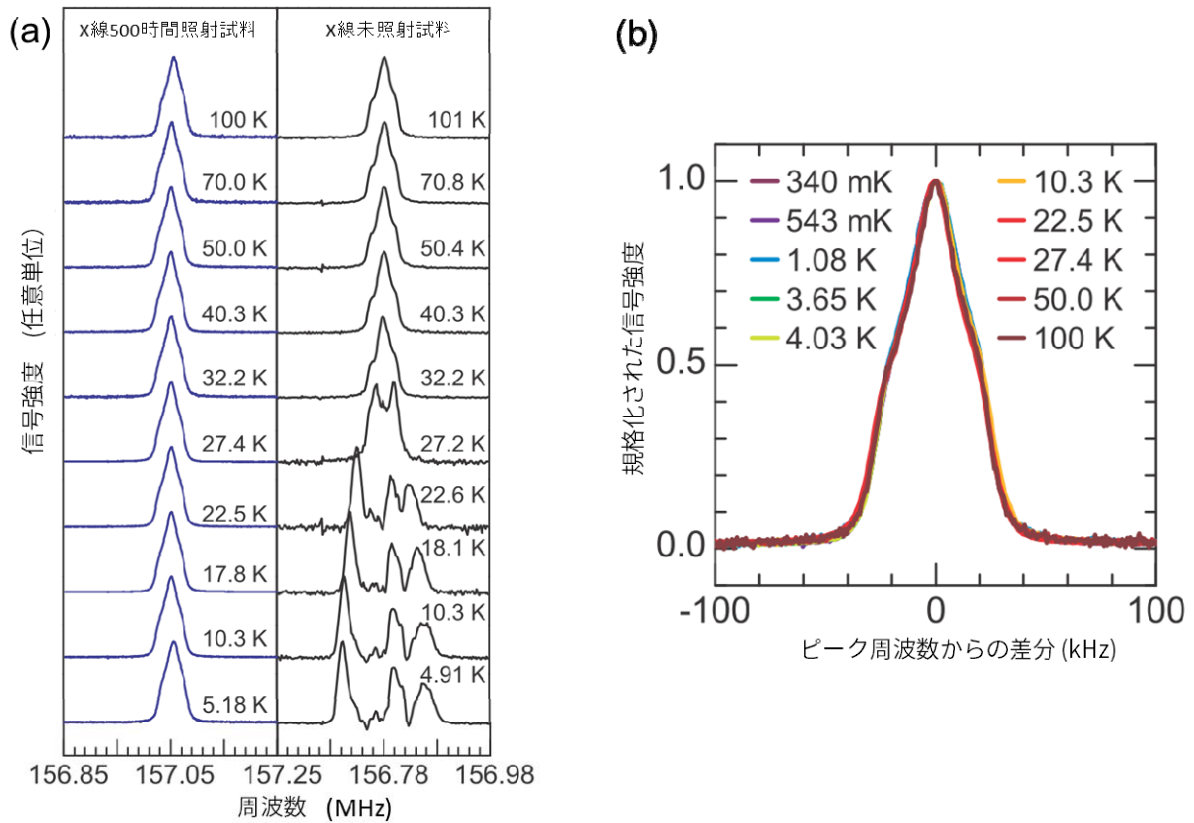


図2  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Cl の核磁気共鳴スペクトル

(a) X線未照射試料と500時間照射された試料における核磁気共鳴スペクトルの温度依存性。500時間X線を照射され、乱れを導入した試料では反強磁性磁気秩序によるスペクトルの分裂が消失している。

(b) 極低温領域における500時間照射された試料の核磁気共鳴スペクトル。スペクトルの形状が変化しておらず、反強磁性磁気秩序やその他の磁気秩序が絶対零度付近の極低温に至っても生じていないことを示している。