

「高度情報処理・通信の実現に向けたナノ構造体材料の制御と利用」
平成14年度採択研究代表者

永長 直人

(東京大学大学院工学系研究科 教授)

「相関電子コヒーレンス制御」

1. 研究実施の概要

強相関電子に期待される革新的機能の一つは電場や磁場に対する巨大応答である。ナノスケールの物理学を基礎として、その学理を確立するために、(a) 電子の持つ量子位相情報をミクロな結晶構造等を用いて設計するトポロジカルコヒーレンス制御と、(b) 種々の秩序間で生じる(量子)臨界性を利用したクリティカルコヒーレンス制御という両者から迫るのがねらいである。両者はそれぞれ、ボトムアップとトップダウンの方向性に対応する。

これまでに、(a)に関しては、(i)量子位相(ベリー位相)を用いた電場によるスピンの生成の理論を構築し、内外の大きな注目を集め、(ii)フラストレーションを持つ3角格子有機導体の研究で低温まで磁気秩序を持たない量子スピン液体を発見し、(iii)強磁性体の輸送現象の一つである異常ホール効果の研究を行い、それが運動量空間における“磁気単極子”の構造に由来する散逸を伴わない電流により起こっていることを詳細な理論・実験により確立した、などの成果を挙げた。(b)に関しては、(i)走査型トンネル顕微鏡法/分光法(STM/STS)の開発を行い、相競合および多重臨界現象をナノスケールで実空間観察する道を開き、具体的成果として高温超伝導体における電子結晶を発見し、(ii)高温超伝導体における軌道状態の磁場制御、(iii)有機導体におけるモット転移と電荷秩序の臨界圧力制御などに成功し、(iv)理論的にも多重臨界現象において乱れの効果が巨大応答をもたらすことを、マンガン酸化物の巨大磁気抵抗を具体例に、モンテカルロシミュレーションで示すことができた。

今後は、(a)に関しては、さらにスピン流がもたらす物理現象の探索と、絶縁体における量子コヒーレンスの研究をすすめる。また3角格子有機導体における超伝導の研究を深め、その機構を研究する。(b)に関しては、多くの遷移金属酸化物における秩序間の競合現象のナノスケールSTM観測を進める。また、チップを用いて秩序を局所的に制御する方法を開発する。

2. 研究実施内容

1. 電子の運動に対する量子位相の効果を記述する方程式

$$\frac{d\vec{r}(t)}{dt} = \frac{\partial \varepsilon_n(\vec{k})}{\partial \vec{k}} - \vec{B}_n(\vec{k}) \times \frac{d\vec{k}(t)}{dt}$$
$$\frac{d\vec{k}(t)}{dt} = \frac{\partial V(\vec{r})}{\partial \vec{r}} - \vec{B}(\vec{r}) \times \frac{d\vec{r}(t)}{dt}$$

において k - 空間のベリーの曲率 $B_n(\vec{k})$ を詳細な第一電子計算でもとめる方法を開発し、具体的には強磁性金属 SrRuO_3 に適用し、その異常ホール効果の実験を定量的に再現した。その際に運動量空間における磁気単極子がベリーの曲率を支配していることを見出した。このアイデアを、Ge, GaAsなどの半導体に拡張し、磁性がなくとも電場印加によってスピンプン流が生成されることを予言した。

2. 複雑な電子相の競合によりナノスケールで生じる電子相分離や自己組織化を直接観察するために走査型トンネル顕微鏡法/分光法 (STM/STS) を開発した。その具体的成果として、高温超伝導酸化物 $(\text{Ca, Na})_2\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ において、新しい電子結晶状態を発見した。銅酸化物の相競合や擬ギャップの微視的起源解明に直接繋がる結果として注目を集めている。また、強磁性に極めて近い金属 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ において、Mn不純物とそれに誘起された周囲の電子状態変化、特に軌道状態変化を実空間で観察することに成功し、ナノ簿世界の物理と強相関機能の実験的橋渡しが見界に入ってきた。

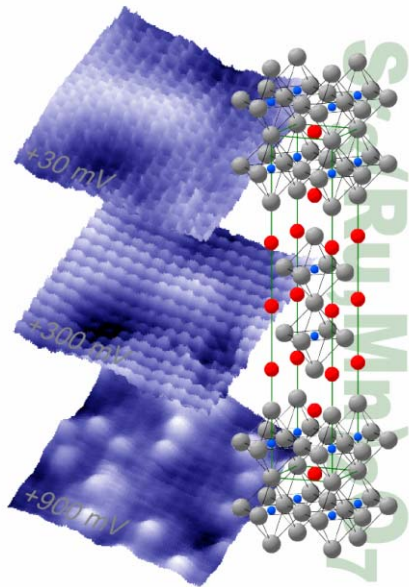


図1 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 中のMn不純物まわりのトンネルスペクトロスコピー

3. 強相関 π 電子系におけるモット転移は、ヤーンテラー不安定性や軌道自由度などの関与がなく、系の対称性を保ったままクーロン相互作用のみで引き起こされるという意味で、モット転移の原型である。にもかかわらず、長い間その臨界性は明らかでなかった。クリティカルコヒーレンス制御の足がかりとしても、この臨界性の解明は急務である。我々は、

ガス圧下における電気抵抗の測定を平成14年度から続けてきたが、本年度その臨界挙動の全貌が明らかになった。電気抵抗-温度-圧力ダイアグラムを図に示す。1次転移とその臨界終点の存在が確認され、さらに臨界性を特徴づける臨界指数が異常な値をもつことが示唆された。これは、統計力学の根本問題としても興味ある発見であり、現在、その再現性を慎重にチェックしている。

この他、3角格子のフラストレーションによる電荷のガラス的な凍結の発見においても成果があった。

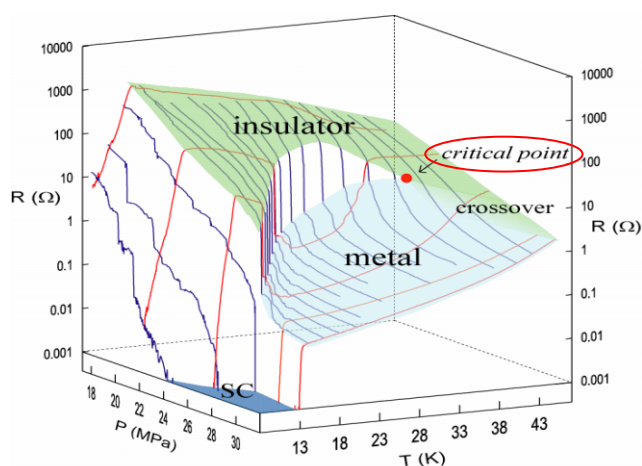


図2 温度-圧力平面における電気抵抗の変化。モット臨界性が見える。

3. 研究実施体制

理論グループ

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 (永長 直人)

産業技術総合研究所強相関電子技術センター

研究実施項目 相関電子コヒーレンス制御の理論

概要：強相関電子系における量子コヒーレンスの理論的研究を行う。場の理論に基づく原理提案とそれを検証し物質設計にまで推し進めるための第一原理電子状態計算を行う。これにより実験グループの研究を有機的に組織しプロジェクトを主導する。

π 電子制御グループ

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 (鹿野田 一司)

研究実施項目： π 電子多体系のコヒーレンス制御

概要：相関電子コヒーレンス制御の研究を分子性固体中の π 電子系を対象に展開する。その際、分子性固体の特徴である分子という自由度と格子系としての柔らかさを十二分に生かす。すなわち、分子を化学的に修飾すること（いわばサイトエンジニアリング）により、分子の構造を微調し、分子間の配置、すなわちバンド幅やバンド構造も精巧に制御する。また、格子系の柔らかさは圧力に対する分子間移動積分敏感性を意味するが、本研究では静水圧と異方的な圧力を組み合わせることにより移動積分ネッ

トワークにフラストレーションを導入することも試みる。このような手法で π 電子の舞台を制御し、相関 π 電子系が示す拮抗する相のコヒーレンスのクリティカル制御とトポロジカル制御を通して新しい機能を開拓する。また、有機と無機の特徴を併せ持つ π -dハイブリッド系を対象に、d電子と π 電子が織り成す独特の相関電子相と新しい機能を探索する。

d電子相制御グループ

東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻 (高木 英典)

理化学研究所磁性研究室

研究実施項目：d電子多体系のコヒーレンス制御

概要：相関電子コヒーレンス制御実践の場としての強相関d電子系の高いポテンシャルに注目し、遷移金属酸化物・硫化物を舞台とするコヒーレンス制御の実験を担当する。当該グループは遷移金属酸化物の物質合成と物性開拓の分野において、世界をリードしてきたグループの一つである。理論グループとの緊密な連携のもと、舞台となる遷移金属酸化物・硫化物を積極的に発掘し、多彩な物性測定・制御手法を駆使して、コヒーレンス制御の方法論を確立するとともに、そこから生み出される新機能・物性の開拓を強力に推進する。d電子系に特徴的な軌道の自由度を常に意識しながら、量子臨界相の創製と新奇な物性の探索、ナノスケールでの量子臨界相の直接観察、幾何学的フラストレーション系の示すスピン・電荷・軌道の協奏現象などの項目に特に重点を置いて研究を進める。

4. 主な研究成果の発表 (論文発表および特許出願)

(1) 論文発表

整理番号：160502016

著者氏名：K. Ueno, I. H. Inoue, H. Akoh, M. Kawasaki, H. Takagi

論文題名：Field-Effect Transistor on SrTiO₃ with sputtered Al₂O₃ Gate Insulator

書誌事項：Applied Physics Letters, Vol. 83, No. 9, P. 1755-1757 (2003)

発表日付：20030701

整理番号：160503015

著者氏名：Patrick A. Lee, and Naoto Nagaosa

論文題名：Collective Modes in the Superconducting Ground States in the Gauge Theory Description of the Cuprates

書誌事項：Physical Review B, Vol. 68, No. 2, 024516 (2003)

発表日付：20030729

整理番号：160503017

著者氏名 : Shuichi Murakami, Naoto Nagaosa, and Shou-Cheng Zhang
論文題名 : Dissipationless quantum spin current at room temperature
書誌事項 : Science, No.301, P.1348 (2003)
発表日付 : 20030808

整理番号 : 160501016

著者氏名 : Yasuhiro Shimizu, Kazuya Miyagawa, Kazushi Kanoda, Mitihiko Maesato,
and Gunji Saito
論文題名 : Spin Liquid State in an Organic Mott Insulator with a Triangular
Lattice
書誌事項 : Physical Review Letters, Vol.91, No.10, 107001 (2003)
発表日付 : 20030905

整理番号 : 160503020

著者氏名 : Shigeki Onoda, and Naoto Nagaosa
論文題名 : Mott Transition vs. Multicritical Phenomenon of Superconductivity
and Antiferromagnetism — Application to κ -(BEDT-TTF)₂X
書誌事項 : Journal of the Physical Society of Japan, Vol.72, No.10, P.2445-
2448 (2003)
発表日付 : 20031015

整理番号 : 160502014

著者氏名 : Hiroki Yamazaki, Yasuyuki Hikita, Hiroki Hori, and Hidenori Takagi
論文題名 : Correlation between the superconducting and structural properties
in MgB₂ thin films prepared by molecular-beam epitaxy
書誌事項 : Applied Physics Letters, Vol.83, No.18, P.3740-3742 (2003)
発表日付 : 20031103

(2) 特許出願

H15年度特許出願件数 : 0 件