

## スペクトロスコピーを用いた遷移金属化合物の物性探索

### 研究代表者名

京都大学・基礎物理学研究所・遠山 貴巳

### 研究分担者名

東北大学・金属材料研究所・藤田 全基

東北大学・金属材料研究所・松浦 直人

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・森 道康

### 1. はじめに

銅酸化物高温超伝導体の発見以降も、新しい超伝導体を発見しようとする努力は続いており、高温超伝導発現機構の解明と共に、今なお固体物理学の重要な研究テーマの一つとなっている。最近では、鉄を含んだ超伝導体が日本で発見され、新しい超伝導体の激しい研究競争が再び進行中である。鉄系超伝導体の母物質は金属であり、銅酸化物のようなキャリアドーピングされたモット絶縁体という描像は成り立たない。また、複数の軌道やバンドが電子物性・超伝導に寄与することが分かってきている。銅酸化物とは異なった新しい高温超伝導発現機構の可能性があり、その解明を目指して多くの物性研究者がしのぎを削っている。

銅酸化物は、キャリアドーピングされたモット絶縁体で生じる異常量子伝導現象という問題を提起した。それに対し、鉄系超伝導体は多軌道・多バンドに起因する物理現象に光を当てることとなった。遷移金属化合物には、電子間相互作用に加え軌道自由度が寄与することで発現する物性が多くある。例えば、キャリアをドーピングしたコバルト酸化物で見られる巨大熱起電力が挙げられる。強い電子間相互作用とコバルト d 電子の軌道縮重度がエン트로ピー輸送、つまり巨大熱起電力を引き起こしている可能性が提案されている。また、バナジウム酸化物では、熱勾配と磁場を加えることで試料にスピントラップが生じる「マグノンホール効果」が観測された。この現象では、d 電子のスピントラップ相互作用が不可欠となる。

このように、遷移金属酸化物における電子相関と軌道自由度から生まれる物性は実に多様であり、これらの現象を解明するためには各種スペクトロスコピーを用いた相補的実験研究が不可欠である。本ワークショップは、電子相関と軌道自由度から生まれる物性に関して、様々な遷移金属化合物の物質開発を行っている研究者、各種スペクトロスコピーを用いた実験研究者、さらに理論研究者とが最新の成果を持ち寄り討論することで、新しい物性の発見と解明を目指すことを目的として開催された。

### 2. 研究経過

この分野の研究は世界各国の研究者との協力や競争によって急激に進展している。そこで、世界各国の著名な研究者を含めた国際会議として開催することが望ましいと判断し、ICC-IMR からの財政的支援を得て共同開催として、海外からの講演者を5名招待することとした。その他、研究の内容で緊密な関係を持っている日本原子力研究開発機構先端基礎研究センターから海外講演者3名の財政的支援を、また、京都大学基礎物理学研究所から海外講演者1名の財政的支援を受けた。さらに、日中韓交流フォーサイト事業からは若手研究者を中心に15名の国内旅費を支援して頂いた。講演者の選定に当たっては、研究の最前線に立つ若手、中堅からの発表を中心とし、議論の時間を長く取るよう配慮した。

### 3. 研究成果

ワークショップは2011年7月28日(木) – 30日(土)に金属材料研究所講堂で開催した。参加者は87名で、その内、外国人は13名であった。30名程度の学生が参加しており、この分野の活発な様子が伺われる。セッションは全て招待講演による口頭発表で、35件の発表があった。海外からの招待講演者は8名である。29件が実験に関する講演、6件が理論に関する講演であった。

以下に、プログラムを掲載する。

July 28 (Thurs.)

13:20-13:30 Opening: M. Fujita (Tohoku Univ.)

Chair: T. Tohyama (Kyoto Univ.)

13:30-13:55 Multiple broken symmetries in the cuprate pseudogap phase

S. Uchida (Univ. of Tokyo)

13:55-14:20 Competition between superconductivity and pseudogap in copper oxide high temperature superconductor

T. Kondo (Univ. of Tokyo)

14:20-14:45 Low-energy muon measurement of T' non-doped superconductor

K. M. Kojima (KEK)

Coffee Break

Chair: M. Sato (CROSS)

15:05-15:30 Superconducting transition in background antiferromagnetic order: NMR studies on multilayered high- $T_c$  cuprates  $Ba_2Ca_4Cu_5O_{10}(F,O)_2$

S. Shimizu (Univ. of Tokyo)

15:30-15:55 Diminished in-plane anisotropy and prevailing multi-carrier charge transport in the ordered phase of undoped  $BaFe_2As_2$  with improved quality

S. Ishida (Univ. of Tokyo)

15:55-16:20 Specific-heat study of the superconductivity and electronic state in  $FeSe_{1-x}Te_x$  single crystals

Y. Koike (Tohoku Univ.)

Coffee Break

Chair: J. Akimitsu (Aoyama Gakuin Univ.)

16:40-17:05 "111" type iron pnictide superconductors: Properties characterizations

C. Q. Jin (IOP, Beijing)

17:05-17:30 Superconductivity induced by bond-breaking in the Ir triangular lattice of layered chalcogenide  $Ir_{1-x}Pt_xTe_2$

M. Nohara (Okayama Univ.)

17:30-17:55 Electronic phase diagram of the layered cobalt oxide system  $Li_xCoO_2$

T. Motohashi (Hokkaido Univ.)

18:00-20:00 Banquet

July 29 (Fri.)

Chair: K. Yamada (Tohoku Univ.)

9:00-9:25 Recent results of neutron and x-ray scattering investigations of magnetic excitations and

spin-phonon coupling in Fe-based superconductors

D. Reznik (Univ. of Colorado)

9:25-9:50 Hole doping dependence of incommensurate magnetic excitation in Bi2201 cuprates

M. Enoki (Tohoku Univ.)

9:50-10:15 Magnetic properties of lightly doped antiferromagnetic YBCO

O. P. Sushkov (Univ. of New South Wales)

Coffee Break

Chair: S. E. Barnes (Miami Univ.)

10:35-11:00 Magnon Hall effect in ferromagnetic insulators

Y. Onose (Univ. of Tokyo)

11:00-11:25 New three-dimensional Dirac electron systems:  $\text{Ca}_3\text{PbO}$  and its family

M. Ogata (Univ. of Tokyo)

11:25-11:50 Nonequilibrium dynamics of many-body systems, driven by a constant electric field

J. Bonca (Josef Stefan Inst., Ljubljana)

11:50-12:15 Raman scattering near an electronic nematic instability

H. Yamase (NIMS)

Lunch

Chair: T. Yoshida (Univ. of Tokyo)

13:50-14:15 Fermi surfaces, electron correlation, and superconducting gap in Fe pnictides studied by ARPES

A. Fujimori (Univ. of Tokyo)

14:15-14:40 Spins, pseudo spins and angular momenta in Dirac bands

C. Kim (Yonsei Univ.)

14:40-15:05 Superconducting gap and pseudogap in pnictides

K. Nakayama (Tohoku Univ.)

Coffee Break

Chair: M. Fujita (Tohoku Univ.)

15:25-15:50 Manipulating charge stripe order in  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  in high magnetic fields

M. Hucker (Brookhaven National Lab.)

15:50-16:15 Inelastic neutron scattering study of dynamical spin susceptibility on  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$

S. Shamoto (JAEA)

16:15-16:40 Structure and excitations of the Fe-based high- $T_c$  superconducting materials

W. Bao (Renmin Univ., Beijing)

Coffee Break

Chair: S. Maekawa (JAEA)

17:00-17:25 STM/STS studies of defects and vortices in  $\text{LiFeAs}$

T. Hanaguri (RIKEN)

17:25-17:50 NMR studies on Fe pnictide superconductors of  $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$  and  $\text{Ca-Fe-Pt-As}$

Y. Kobayashi (Nagoya Univ.)

17:50-18:15 Orbital order and its fluctuation in iron pnictide superconductors

Y. Ono (Niigata Univ.)

July 30 (Sat.)

Chair: Y. Koike (Tohoku Univ.)

9:00-9:25 Origin of  $T_c$  suppression and residual conductivity in high- $T_c$  cuprates

S. Tajima (Osaka Univ.)

9:25-9:50 Evolving electronic structure of high- $T_c$  cuprates revealed by Compton scattering

Y. Sakurai (JASRI, SPring-8)

9:50-10:15 Superconductivity of Fe-based superconductors investigated by microwave to THz conductivity measurement, and comparison with cuprate superconductors

A. Maeda (Univ. of Tokyo)

Coffee Break

Chair: J. Mizuki (Kansei Gakuin Univ.)

10:35-11:00 Polarization-analyzed resonant inelastic x-ray scattering of the orbital excitations in  $KCuF_3$

K. Ishii (JAEA, SPring-8)

11:00-11:25 Orbital ordering of intermediate-spin state of  $Co^{3+}$  in  $Sr_3YCo_4O_{10.5}$  studied by resonant x-ray scattering

H. Nakao (KEK)

11:25-11:50 Soft and isotropic phonons in  $PrFeAsO_{1-y}$

T. Fukuda (JAEA, SPring-8)

Lunch

Chair: T. Ziman (CNRS, Grenoble)

13:30-13:55 Non-magnetic impurity effect on Dirac cone states in  $Ba(Fe_{1-x}Ru_xAs)_2$  studied by magnetoresistance and Hall coefficient

Y. Tanabe (Tohoku Univ.)

13:55-14:20 Flux-line lattice state in FeAs-based superconductor  $(Ba,K)Fe_2As_2$ ; Current  $\mu$ SR results and future SANS experiments at J-PARC/MLF BL15 (TAIKAN)

K. Ohishi (CROSS)

14:20-14:45 Resonant inelastic x-ray scattering studies of the iron pnictides ? a slow start but a strong finish?

I. Jarrige (JAEA, SPring-8)

14:45-15:10 Spin and orbital characters of excitations in iron arsenides revealed by simulated Fe L-edge RIXS

T. Tohyama (Kyoto Univ.)

15:10-15:30 Closing: M. Mori (JAEA)

初日は、組織委員長の藤田氏（金研）より、震災の状況とそこからの復興についての報告と、様々なサポートに対する感謝の意が述べられた。その後、セッションが始まり、まず銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップに関するSTM/STS や角度分解光電子分光(ARPES)の最新の結果が報告された。また T構造を有する銅酸化物高温超伝導体の異常に関するミュオン測定からの知見が示された。銅酸化物や鉄系高温超伝導体に対する核磁気共鳴実験(NMR)の結果や、鉄系超伝導体の低温比熱の結果が紹介され、その物理的意義に対する議論が活発に行われた。初日最後のセッションでは、物質探索という観点から、新物質や良質な試料を開発している研究者による講演があった。

第二日目は、非弾性中性子散乱実験から見た鉄系超伝導体や銅酸化物超伝導体の磁気励起の議論があった。銅酸化物の磁気励起に対する理論成果も報告された。新物質、新量子現象という観点からは、強磁性絶縁体に対するマグノンホール効果の実験結果や、3次元のディラック電子を有する新物質の理論からの提案、強相関電子系の外部電場のもとでの非平衡ダイナミクス理論、さらにフェルミ面に起源も持つネマティック不安定性とその電子励起へ

の寄与など、多彩な現象が報告され、活発な討論が行われた。午後は、鉄系超伝導体に対する ARPES 実験の結果が三つのグループから報告された。また中性子散乱実験のセッションもあり、ストライプ秩序を持つ銅酸化物高温超伝導物質や、鉄系超伝導物質に対する結果が三つのグループから報告された。どの発表も最新のホット・トピックスを扱っており、活発な討論が繰り広げられた。二日目最後のセッションでは、鉄系超伝導の起源を、STM/STS や NMR、さらに理論から解明しようとする発表が行われた。特に、軌道自由度という新しい視点が議論された。

第三日目は、光学伝導度やマイクロ波測定、さらにコンプトン散乱実験など様々なスペクトロスコピー手法を用い

て、銅酸化物超伝導や鉄系超伝導の起源を探る研究が紹介された。共鳴非弾性 X 線散乱や共鳴 X 線散乱、さらに非共鳴非弾性 X 線散乱など高輝度放射光を用いた手法を、軌道秩序がある物質系や鉄系超伝導体に適用した最新結果も報告された。そのほか、磁気伝導測定による鉄系超伝導物質中のディラック電子の物性や、鉄系超伝導物質のフラックス格子のミュオン測定、さらに鉄系物質に対する共鳴非弾性散乱の理論研究など、スペクトロスコピーや新現象に関する多彩な講演が行われた。どの講演に対しても活発な討論が行われ、参加者のモチベーションの高さが伺われた。研究会は、森氏（原研）によるまとめで幕を閉じた。



#### 4. まとめ

本研究会では、銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体のようなスペクトロスコピーがその物性研究に多大な貢献をしている物質群だけでなく、今後、スペクトロスコピーを用いて研究が進展すると思われる物質群も含めた総合的なものとなった、研究会を通じて、個々の物質の物性研究について最適な量子ビーム研究が明らかにされた。さらに、試料作成、測定、理論の研究者のコミュニケーションが図られたことにより、新たに発見された物質を量子ビーム施設に持ち込む道筋を議論できたことは大変有意義であった。金属材料研究所は、強相関電子系のスペクトロスコピーの研究、特に高温超伝導体の非弾性中性子散乱の研究で世界をリードしている。スペクトロスコピーを用いた遷移金属化合物の物性探索の新しい方向性を金研から発信していくことは、この分野を世界的にリードしていくためにも重要であると考えられる。