

「極限環境状態における現象」
平成 8 年度採択研究代表者

佐藤 正俊

(名古屋大学大学院理学研究科 教授)

「低次元異常金属の開発」

1. 研究実施の概要

銅酸化物高温超伝導の起源について、これまで打ち出してきた統一的描像を確立するため、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 系に対する中性子散乱および核磁気共鳴実験を行った。特に、この系における低エネルギーの動的“ストライプ”の有無に注目した。核磁気共鳴では、その存在を示す実験的証拠が全く見られなかった。中性子散乱実験では、観測された磁気励起スペクトルが、バンド描像をベースにした計算で具体的に再現された。これは、これまでなかったことである。“ストライプ”の導入は必要がない。得られた結果は、銅酸化物の電子系の理解に明確な枠をはめることになる。

パイロクロア型化合物 $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ に発見された、異常ホール効果の特異な振舞が、スピнкаイラル秩序を備えた特殊な磁気構造に由来するものかどうかについて、パイロクロア化合物だけでなく、特殊な磁気構造が期待されるスピネル化合物やその他の強磁性化合物についても研究した。この結果、単純な強磁性スピン構造からのはずれに際して現れる特異な異常ホール効果が、いくつかの系で発見された。

2. 研究実施内容

銅酸化物高温超伝導体系や多元遷移金属化合物系に対する物質探索と物理研究をすすめた。この一年間の研究のポイントは、(i)銅酸化物高温超伝導体系に対して提案した相図に基づいて、その異常物性や超伝導発現機構を完全に理解するため、残った問題と思われる動的“ストライプ”の有無と(もし存在するなら)超伝導発現に対するその役割に注目したこと、(ii)non-collinearな、もしくはスピンのカイラル秩序があるような、いわゆるnontrivialな磁気構造を持つ化合物金属系を多数作成して、その輸送特性、特に、異常ホール効果の振舞を調べたこと、等である。

我々は、擬ギャップを中心にした超伝導発現メカニズムを考えてきたが、動的“ストライプ”の役割を重要視する考えは、それといろいろな点で相容れないように思われる。 $\text{La}_{2-x-y}\text{Nd}_y\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ や $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ では、静的もしくはゆっくりとした“ストライプ”が確かに存在し、超伝導発現を妨げたり、いわゆる1/8異常と呼ばれる種々の物性異常を出している。もしこのような“ストライプ”の影響が他の銅酸化物系でも、同様に現れるものなら、超伝導機構研究において、それを最初か

ら考慮しなければならない。はたして、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ でもその影響が見えるであろうか。この問題に対して、我々は核磁気共鳴 (NMR/NQR) と中性子散乱実験を手段にして取り組んだ。

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 系ではその T_{c-y} 曲線にいわゆる60Kプラトーと呼ばれる (T_c が抑制されたように見える) 異常がある y の値の領域で現れる。これが上記の1/8異常だとする主張に対して、NQR (厳密には核四重極共鳴) を行って調べた。もしこれが、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の場合と同様の1/8異常なら、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ に見られたよりもっと顕著な効果が、NQR信号強度のwipeout現象としてはっきり、観測されるはずである。しかし、そのようなことは全くなかった。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 系だけではなく、Bi2212と呼ばれる系でも T^* 系と呼ばれるものでも、1/8異常の存在を示唆するものは見つからなかった。NQRのような極めてゆっくりとした物性測定手段で、“ストライプ”の存在が全く感じられないことは、もしそれがあったとしても、はやく変動しているものでなければならないことを意味する。

中性子散乱実験では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 系の磁気励起スペクトル $\chi''(q, \omega)$ と “ストライプ”の存在に敏感と思われるフォノンとを調べた。これは、NMR/NQRと異なりかなりはやく揺らいでいるものを見る手段である。“ストライプ”の物理描像をとることは、電荷の一次元的秩序 (もしくはそのゆらぎ) をまず第一に考え、それによって誘起されたスピン秩序 (もしくはそのゆらぎ) の状態をつぎに考えることである。このような電荷秩序が、超伝導発現の舞台を提供しているとき、バンド描像から出発した場合と比べて、その磁気励起スペクトルにどのような違いが出るであろうか。この考えに立って、バンドモデルをもとにした表式でスペクトルを計算し、その結果を自身の実験結果と比較してみたところ、スペクトルの波数 q やエネルギー ω 依存性ばかりでなく、温度依存性まで、具体的に大変よく実験の $\chi''(q, \omega)$ が再現された。これはこれまでなかったことである。“ストライプ”の導入を全く必要としないことは注目すべきことである。また、本質的にはバンド描像をとるこの簡単な計算が実験を説明することは、この電子系の本質の理解に大きな寄与をもたらすように見える。一方、“ストライプ”モデルで本当に $\chi''(q, \omega)$ が再現できるであろうか。その大まかな特徴はともかく、具体的な部分の挙動までの説明は、むしろ、困難なのではないか。現在はそのように感じられるいくつかの事実をあげることの出来る段階であるが、エネルギー $\omega = 50\text{meV}$ の領域でのこの結果は、“ストライプ”が低エネルギー物性、さらには超伝導出現に対して大きな役割をもつことがないことを示唆している。

パイロクロア型化合物は磁気フラストレーションによる異常物性が期待される系として取り上げたものである。現在、 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ や “スピンアイス”系と呼ばれる $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の磁氣的挙動が解明されつつあり、話題になり始めたが、ここでは、 Nd_2

Mo₂O₇の特異な異常ホール効果について述べる。この系ではMoの磁気モーメントとNdのそれが、ほとんど別々な温度でオーダーする。このときに現れる異常ホール効果の振舞は極めて特異で、従来の理論的取り扱いではなかなか説明がつかない。non-collinearでスピнкаイラル秩序があるという特異な磁気構造に起因するのではないかとの提案もなされたが、中性子散乱による磁気構造の決定や、50mKまでのホール抵抗の測定結果をもとにすると、それでも単独での説明は困難に見える。

このような発見に基づき、nontrivialな磁気構造を持つ系の探索と異常ホール効果の研究をはじめた。これまでに、スピネル型化合物のCuCr₂O₄やCu_{0.5}Zn_{0.5}Cr₂O₄、さらにはCr₃Te₄においてnontrivialな磁気構造への移行に伴うと思われる異常が見つかった。中性子散乱実験による磁気構造の決定等を進め、スピнкаイラル秩序の果たす役割等をきちんと割り出す作業が現在、続いている。

以上のことに加えて、光学測定を手段にした、銅酸化物や遷移金属酸化物の研究、量子スピン系の中性子散乱による研究、さらには有機物電気伝導体の研究がすすめられた。

3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

J. Takeda , T .Inukai and M .Sato. Electronic Specific Heat of La_{2-x-z}Nd_zCu_{1-y}Zn_yO₄ up to Room Temperature. J .Phys .Soc .Jpn .69 (2000) 2917-2922 .

Y .Kobayashi , T .Miyashita , M .Ambai , T .Fukamachi and M .Sato. Absence of the "Wipeout" phenomenon in the NQR Spectra of YBa₂Cu₃O_{6.61}. J . Phys .Soc .Jpn .69(2000)2435-2438

Y .Yasui , Y .Kondo , M .Kanada , M .Ito , H .Harashina , M .Sato and K .Kakurai. Magnetic Structure of Nd₂Mo₂O₇. J .Phys .Soc .Jpn .70 (2001)284-289 .

S .Iikubo , S .Yoshii , T .Kageyama , K .Oda , Y .Kondo , K .Murata and M .Sato. Magnetic and Transport Properties of Pyrochlore Molybdate. J .Phys . Soc .Jpn .70(2001)212-218 .

M .Sato , M .Ito , H .Harashina , M .Kanada. On the Electronic and Magnetic Excitation Spectra of High-Tc Cu Oxides in the Normal and Superconducting States. J .Phys .Soc .Jpn .70(2001)No 5 .

S .Yoshii , S .Iikubo , T .Kageyama , K .Oda , Y .Kondo , K .Murata and M .Sato. Anomalous Hall Effect of Pyrochlore Molybdate Nd₂Mo₂O₇. J .Phys .Soc . Jpn .69(2000)3777-3780 .

Y .Kobayashi , T .Miyashita , M .Ambai , T .Fukamachi and M .Sato.. Cu NQR Study on the "Wipeout" Phenomenon in YBa₂Cu₃O_y. J .Phys .Soc .Jpn .

70(2001)No.4.

K. Takenaka, S. Kashima, S. Sugai, Y. Yasui, S. Shamoto and M. Sato. Anisotropic Optical Spectra of $\text{BaCo}_{1-x}\text{Ni}_x\text{S}_2$: Effect of Ni Substitution on the Electronic Structure of the $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{S}$ plane. Phys. Rev. B 63(2001)115113(1-7).

S. Sugai, N. Yamane, S. Kashima, and K. Takenaka, H. Sasaki, M. Sato and S. Shamoto. Raman and infrared studies of the metal-insulator transition in $\text{BaCo}_{1-x}\text{Ni}_x\text{S}_2$. Physica B 281&282(2000)627-628.

S. Sugai and T. Hosokawa. Relation between the superconducting gap energy and the two-magnon Raman peak energy in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$. Phys. Rev. Lett. 85(2000)1112-1115.

K. Takenaka, Y. Sawaki, R. Shiozaki, and S. Sugai. Electronic structure of the double-exchange ferromagnet $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$ studied by optical reflectivity. Phys. Rev. B 62(2000)13964-13867.

K. Takenaka, K. Nakada, A. Osuka, S. Horii, H. Ikuta, I. Hirabayashi, S. Sugai, and U. Mizutani. Anisotropic optical spectra of $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$: possible Tomonaga-Luttinger liquid response of the quasi-one-dimensional metallic CuO double chains. Phys. Rev. Lett. 85(2000)5428-5431.

Y. Sawaki, K. Takenaka, and S. Sugai. Al-Substitution Effect on Resistivity in Paramagnetic Phase of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$: Comparison with Magnetoresistive $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. J. Phys. Soc. Jpn. 70(2001)602-603.

K. Takenaka, S. Kashima, A. Osuka, S. Sugai, Y. Yasui, S. Shamoto, M. Sato. Anisotropic optical spectra of $\text{BaCo}_{1-x}\text{Ni}_x\text{S}_2$: Effect of Ni substitution on the electronic structure of the $\text{Co}_{1-x}\text{Ni}_x\text{S}$ plane. Phys. Rev. B 63(2001)115113-1-7.

S. Sugai and N. Hayamizu. Dynamical properties of the spin and charge stripes in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$. Physics in local lattice distortions. edited by H. Oyanagi and A. Bianconi, American Institute of Physics(2001)84-91.

K. Kakurai, M. Nishi, K. Nakajima, T. Yosihama, M. Isobe, Y. Ueda, T. Kato, H. Tanaka, A. Hoser and H.A. Graf. Neutron Scattering Studies on Quantum Spin Systems Spin Excitations in KCuCl_3 and NaV_2O_5 . J. Phys. Soc. Jpn. 69 Suppl. B(2000)78-82.

T. Yosihama, M. Nishi, K. Nakajima, N. Aso, K. Kakurai, Y. Fujii, S. Itoh, C.D. Frost, S.M. Bennington, M. Isobe and Y. Ueda. Magnetic neutron scattering in the quarter-filled spin-ladder system NaV_2O_5 . Physica B 281&282(2000)654-655.

H. Ichikawa, J. Akimitsu, M. Nishi and K. Kakurai. Direct observation of orbital ordering in YTiO_3 . *Physica B* 281&282(2000)482-484.

H. Nakamura, T. Yamasaki, S. Giri, H. Imai, M. Shiga, K. Kojima, M. Nishi, K. Kakurai and N. Metoki. Incommensurate magnetic ordering and spin liquid state in a triangular lattice BaVS_3 : Neutron diffraction and scattering study. *J. Phys. Soc. Jpn.* 69(2000)2763-2766.

K. Takeda, M. Mito, K. Nakajima, K. Kakurai and K. Yamagata. Magnetic Correlations in the $S=5/2$ Quadratic Lattice Heisenberg Antiferromagnet $\text{Mn}(\text{HCOO})_2(\text{ND}_2)_2\text{CO}$. *Phys. Rev. B* 63(2000)24425-24428.

A. Zheludev, M. Kenzelmann, S. Raymond, E. Ressouche, T. Masuda, K. Kakurai, S. Maslov, I. Tsukada, K. Uchinokura and A. Wildes. Energy separation of single-particle and continuum states in a $S=1/2$ weakly-coupled chains antiferromagnet. *Phys. Rev. Lett.* 85(2000)4799-4802.

M. Nishi, K. Kakurai, Y. Fujii, S. Katano and J. Akimitsu. Lattice dynamics of CuGeO_3 by inelastic neutron scattering. *J. Phys. Chem. Solids* 62(2001)355-356.

H. Tanaka, S. Oosawa, T. Kato, H. Uekusa, Y. Ohashi, K. Kakurai and A. Hoser. Observation of Field-Induced Transverse Neel Ordering in the Spin Gap System TlCuCl_3 . *J. Phys. Soc. Jpn.* 70(2001)3501-3504.

O. Cepas, K. Kakurai, L.P. Regnault, T. Ziman, J.P. Boucher, N. Aso, M. Nishi, H. Kageyama and Y. Ueda. Dzyaloshinski-Moriya Interaction in the 2D Spin Gap System $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$. submitted to *Phys. Rev.*.

A. Tsuruta, A. Kobayashi, K. Deguchi, Y. Ono, T. Matsuura and Y. Kuroda. Fermi liquid and non-Fermi liquid in M-channel N fold degenerate Anderson Lattice. *Physica B* 281&282(2000)408-409.

Y. Ono, A. Tsuruta, T. Matsuura and Y. Kuroda. Non-Fermi Liquid and Mott Transition in the Multi-Channel Two-Band Hubbard Model in Infinite Dimensions, *Physica B* 281&282(2000)410-411.

A. Kobayashi, A. Tsuruta, T. Matsuura and Y. Kuroda. Pseudo-gap Induced by Superconducting Fluctuation and Anomalous Metallic Phase in the High-Tc Superconducting Materials. *Physica B* 284&288(2000)661-662.

A. Tsuruta, A. Kobayashi, T. Matsuura and Y. Kuroda. Fermi liquid and non-fermi liquid in Andeson lattice. *J. Phys. Soc. Japan* 69 No.10(2000)3342-3355.

A. Kobayashi, A. Tsuruta, T. Matsuura and Y. Kuroda. Pseudogap phenomena and phase diagram in the 2-band Hubbard model. to be published in *J. Phys. Soc. Japan* 70(2001)

M. Tsuchiizu, H. Yoshioka and Y. Suzumura. Correlation gap in one-dimensional quarter-filled electron system. Proc. Int. Conf. 22th Low Temp. Phys., Helsinki 1999, Physica B 284-288 (2000) 1547-1548.

M. Tsuchiizu and Y. Suzumura, Confinement by charge gap in organic conductor Bechgaard salts. Proc. Int. Conf. on Strongly Correlated Electron Systems, Nagano 1999, Physica B 281-282 (2000) 684-685.

T. Itakura and Y. Suzumura. Transverse Incommensurability in Two-Coupled Chains of Quarter-Filled Spin-Density Waves. J. Phys. Soc. Jpn. 69 No.12 (2000) 3896-3903.

M. Tsuchiizu, P. Donohue, Y. Suzumura and T. Giamarchi. Commensurate-incommensurate transition in two-coupled chains of nearly half-filled electrons . The European Physical Journal B 19 No.2 (2001) 185-193.

E. Orignac, Y. Suzumura and T. Giamarchi. Role of interchain hopping in two disordered chains of spinless fermions. J. Phys. Soc. Jpn. 69 No.11 (2000) 3642-3649.

P. Donohue, M. Tsuchiizu, T. Giamarchi and Y. Suzumura, Spinless fermions ladders at half-filling. Phy. Rev. B. 63 No. 4 (2001) January 045121- 1-045121-8.

H. Yoshioka, M. Tsuchiizu and Y. Suzumura, Effects of Next-Nearest-Neighbor Repulsion on One-Dimensional Quarter-Filled Electron Systems. J. Phys. Soc. Jpn. 70 No. 3 (2001) 762-773.