

研究課題名 フェルミ面の自発的対称性の破れの物理

研究代表者名
物質・材料研究機構 超伝導物性ユニット 量子物性グループ 山瀬博之

研究分担者名
東北大学・金属材料研究所・藤田全基

1. はじめに

フェルミ面の対称性は一般に結晶の持つ点群の対称性を満たす。ところが驚くべき事に、電子相関効果によって、フェルミ面の対称性が自発的に破れることが申請者らによって世界で初めて理論的に示された[1]。この不安定性は金属物性の一般的性質であり超伝導や磁性と並ぶ電子系の自発的対称性の破れの一つである。それ故、物性論に新しいパラダイムを与える可能性がある。これまで、その実験的確認が困難であったために研究の進展には限界があったが、最近、この対称性の破れが原因であることを示唆する特異な実験結果が銅酸化物高温超伝導体[2]やルテニウム酸化物[3]で得られ始め、多くの研究者が興味を持ちだしている。本理論研究は、「フェルミ面の自発的対称性の破れ」という新しい研究分野への大きな流れをつくるため、銅酸化物で浮上した問題に焦点を絞り、理論と実験を結びつける基盤を構築する。中性子散乱はこの新興研究分野を発展させる上で有力な実験手法のひとつである。金研のグループは、銅酸化物高温超伝導体に対する中性子散乱実験を我が国で最も精力的に行っているグループの一つである。本研究課題を通して研究代表者と研究分担者の双方の研究を効果的に進めることを目指す。

[1] H. Yamase, Kohno, J. Phys. Soc. Jpn. **69**, 332 (2000); **69**, 2151 (2000)

[2] Hinkov *et al.*, Science **319**, 597 (2008)

[3] Borzi *et al.*, Science **315**, 214 (2007)

2. 研究経過

銅酸化物超伝導体に対する詳細な実験データが蓄積されるにつれ問題点が明確になって来た。すなわち、フェルミ面の対称性の破れと超伝導との競合が重要であり、それが従来の理論では理解出来ない特異な量子臨界的現象を引き起こしている。しかし、競合が生み出す現象の多様性と複雑さ故に実験データの容易な理解が阻まれている。ここに理論のメスを入れ研究の大きな進展をもたらしたい。そこで

『Y系銅酸化物高温超伝導体の“ $y=6.5$ 異常”：量子臨界点の存在可能性の研究』

というテーマに取り組む。YBa₂Cu₃O_yでは、 $y=6.5$ を境にして磁気励起スペクトラムが劇的に変化し、 $y<6.5$ では極めて強い磁気励起の異方性が観測されている。この背後に $y=6.5$ 近傍でフェルミ面の対称性の破れへの一次転移がある可能性がある[4]。

実際、平均場理論[5]では、フェルミ面の対称性の破れは低温で一次相転移によって生じる。ただし、高温では二次相転移になり、一次相転移の終点、三重臨界点が存在する。この平均場相図を基にして、臨界点近傍の揺らぎをスケーリング理論の観点から一般的に調べた。その結果、臨界点近傍では少なくとも2種類の臨界揺らぎが存在することが判明し、それらの臨界指数を整理した[6]。

また、平均場相図に対するフェルミ面の対称性の破れの揺らぎの効果を、汎関数繰り込み群という新しい手法を用いて調べた[7,8]。揺らぎが十分に強くなると平均場理論で見られた一次転移は消失して二次転移に変化すること[7]、更に、絶対零度でも強い揺らぎが残りフェルミ面の対称性の破れの秩序状態そのものが完全に破壊され得ること[8]が分かった。秩序状態が消失した時の基底状態は非フェルミ液体になっている可能性が示唆された[8]。

銅酸化物高温超伝導体でのフェルミ面の対称性の破れの効果が、中性子散乱[9]と輸送現象[10]で一見異なる、という奇妙な可能性が実験的に浮上した。そこで、フェルミ面の対称性の破れの揺らぎは B_{1g} 対称の電子ラマン散乱実験で直接観測出来ることに注目して、実験的検証に向けたラマン散乱理論を構築した[11]。

[4] H. Yamase, Phys. Rev. B **79** 052501 (2009)

[5] H. Yamase, Oganessian, Metzner, Phys. Rev. B **72**, 035114 (2005)

[6] H. Yamase, Jakubczyk, Phys. Rev. B **82** 155119 (2010)

- [7] Jakubczyk, Metzner, H. Yamase, Phys. Rev. Lett. **103** 220602 (2009)
- [8] H. Yamase, Jakubczyk, Metzner, Phys. Rev. B **83** 125121 (2011)
- [9] Hinkov *et al.*, Science **319**, 597 (2009)
- [10] Daou *et al.*, Nature **463**, 519 (2010)
- [11] H. Yamase, Zeyher, Phys. Rev. B **83** 115116 (2011)

3. 研究成果

中性子散乱実験のデータ[9]を理解するには、超伝導とフェルミ面の対称性の破れの競合が重要であり、特に超伝導が消失する近傍の低ドーブ領域では、後者の効果がより重要になることが理論的に議論されている[4]。一方、低ドーブ側では大きな擬ギャップが存在し、その起源の解明が大きな研究テーマになっている。そこで、フェルミ面の対称性の破れの揺らぎによる電子の自己エネルギーを調べた。摂動論的取り扱いが破綻することが判明したために、ワード恒等式に基づいた非摂動論的解析を行った。特にガウシアン揺らぎの領域では厳密解析である。その結果、角度分解光電子分光で観測されている、いわゆるフェルミアークは再現出来るものの、一粒子スペクトラムの擬ギャップは再現出来ないことが分かった[12]。

この研究結果を受け、なぜ中性子散乱実験と角度分解光電子分光を統一的に理解出来ないのか、その理由を探った。銅酸化物高温超伝導体の有効モデルは2次元 t-J 模型であることに注目し、t-J 模型に含まれているすべての電荷不安定性を、経路積分で定式化した $1/N$ 展開の理論を用いて系統的に調べた[13]。その結果、フェルミ面の対称性の破れの不安定性が有限の波数を持ち得ることが判明した。文献[12]では波数ゼロ周りの揺らぎだけを考察したので、有限の波数周りの揺らぎを考慮した上で実験データを論じる必要性が浮上した。さらに、フェルミ面の対称性の破れ以外に、電荷フラックスオーダーもほぼ同時に発達することが分かった。この電荷フラックスの効果も考えた上で実験データを論じていく必要性も示唆された。

これらの結果を金研での中性子散乱実験グループにフィードバックさせると共に、J-PARC という最先端施設における実験状況の逐次的報告を受けるために、金研にて議論を重ねた。

[12] H. Yamase, W. Metzner, arXiv: 1111.5818 (to appear in Phys. Rev. Lett.)

[13] M. Bejas, A. Greco, H. Yamase, in preparation

4. まとめ

本共同利用プログラムに支えられたことによって、フェルミ面の対称性の破れという新興分野の開拓を金研の中性子散乱実験グループと共に効果的に進めることが出来た。一方、銅酸化物超伝導体そのものは、既に得た理論的知見以上の物理を包含している可能性が、本課題を通じて如実に示された。更なる研究が理論、実験共々必要な状況であり、今後の研究に繋げていきたい。

研究課題名

研究代表者名

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・金子耕士

研究分担者名

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・山内宏樹、長壁豊隆、脇本秀一
東北大学・多元物質科学研究所・木村宏之、東北大学・金属材料研究所・平賀晴弘

1. はじめに

中性子は、物質中の静的・動的構造の研究に有効なプローブであるが、線源に大型施設を必要とし、高出力化は容易ではない。また線源としては、輝度だけでなく、高調波混入の有無等、質も重要な因子となる。これら入射中性子の特性を支配する重要な要素であるモノクロメーター結晶では、**pyrolytic graphite(PG)**が最も使われているが、反射能の点で優れる反面、高調波の混入や、使用波長の制約等の問題がある。一方 **Ge** は、PG と比べて反射能は劣るものの、消滅則から高調波の問題はなく、自由に入射波長を選択出来る。従って、線源の特性に合わせた波長を使用することで、反射率の低さをカバーすることも可能である。但し **Ge** 結晶そのものは結晶性が良すぎるため、使用にはモザイクを悪くするホットプレス処理が必要となる。金研では、これまでに **Ge** ホットプレスの多くの経験を有していることから、本共同研究を通じて **Ge** ホットプレスの最適処理条件を探索し、**Ge** 高効率モノクロメーターを開発することを目指した。

2. 研究経過

まず7月に金研で会合を持ち、最適化を進める手順について話し合った。その中で、(1)結晶の加工とホットプレス処理の順序及び、(2)ホットプレス条件の内、圧力をパラメーターの軸として最適化を進める、という2点の方針を定めた。その後、(1)について、7月から1月までに複数回の熱処理作業及びその評価を進め、既存のセットアップでは、加工後に熱処理を行う方がベターであるとの決断を得た。その決断に従い、一定温度(750℃)のもとで、(2) 圧力についての最適化を進めた。

3. 研究成果

今回のモノクロメーターは、研究炉 **JRR-3** に設置された3軸分光器 **TAS-2** で使用することを想定し、**TAS-2** で必要な幅 100 mm、高さ 200 mm に合わせて、幅 100 mm、高さ 20mm の結晶 9 枚により構成することとした。最適化に向けた1つ目の条件として、(a)結晶の高一様性を目指し、大型結晶円板をホットプレス後に結晶を切り出すべきか、(b) 幅 100 mm 高さ 20mm の結晶を複数回に分けてプレスすべきか、について調べた。様々な温度、圧力で処理を行った結果、既存のセットアップでは、大型結晶円板に十分なモザイクを入れる条件を実現することが困難であること、一方で複数回のホットプレスに分けても、高い再現性があることが確認された。そのため、(b)幅 100 mm 高さ 20mm の結晶についてホットプレスしていくこととし、その最適条件の探索を行った。過去の結果を踏まえ[1]、温度 750℃一定とし、圧力を変えていった結果、圧力 40MPa 以上でのホットプレスにより、モザイクが 0.15°程度まで広がり、高分解能モノクロとして十分な効果が得られることを明らかにした(図1)。今後、必要分のホットプレスを継続し、モノクロメーターとしてテストすることに加え、より大きなモザイクを持つ大強度用モノクロの開発と、**Ge** アナライザーの開発を進めていくことを予定している。

4. まとめ

高分解能モノクロメーターとして十分な性能を有する **Ge** のホットプレス条件をみつけ、再現性良く処理を行う環境の構築に成功した。今後、実際にモノクロメーターとして使用し、特性を調べていく。

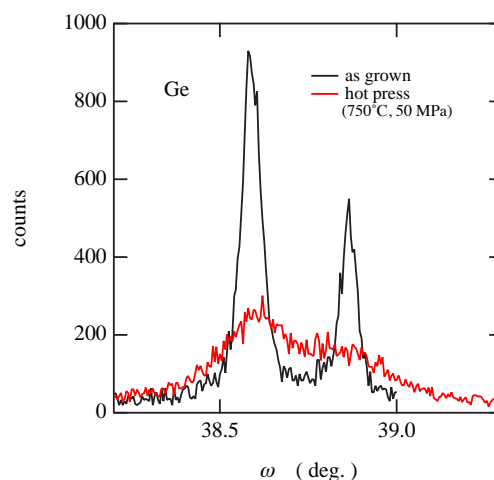


図1 ホットプレス前後の **Ge311** のロックンクカーブ。

[1] Y. Miyake *et al.*, *J. Phys.:Conf. Ser.* **200**, 112006 (2010).

マルチフェロイック物質の電場誘起磁気秩序と強誘電性の中性子散乱研究

研究代表者名

東北大学・多元物質科学研究所・木村宏之

研究分担者名

東北大学・多元物質科学研究所・福永守, 野田幸男, 東北大学・大学院理学研究科・山崎健太

1. はじめに

マンガン酸化物 RMn_2O_5 (R は Bi, Y, 希土類) は巨大な電気磁気効果を示す物質として知られ, 盛んに研究されている. この物質の特徴は, 強誘電性と反強磁性が共存し, その秩序変数が互いに強く結合しており, R サイトを様々な希土類元素に置き換える事で多彩な磁気誘起誘電性 (磁場印加による電気分極の増大, 減少, 向きの 90 度回転等) を示す事である. この系では長周期磁気秩序が起こり, その磁気伝播ベクトルの温度変化と強誘電電気分極の変化と密接に関係している. しかし, 強誘電性と反強磁性が微視的にどのように結びついているのか, 即ちスピンと電気分極 (原子変位) の相互作用の起源はまだ明らかにされていない.

2. 研究経過

RMn_2O_5 は常圧・低温で格子整合磁気秩序相が存在し, 希土類の種類により, 結晶格子に対して 1 倍・2 倍・3 倍・4 倍の周期を持つ事が明らかになっている. いずれの相においても強誘電が発現するが, その性質が質的に異なるのか, 量的に異なるのかは明らかになっていない. 希土類イオンのイオン半径が大きくなるほど磁気秩序周期が長くなる傾向にある事から, 希土類イオンがもたらす化学的圧力により格子が歪み, それにより磁気相互作用の拮抗状態が変化し, 磁気構造の周期が決定されていると考えられる. $YbMn_2O_5$ では他の RMn_2O_5 とは異なり, 格子整合磁気秩序相が無く, ネール温度以下最低温まで磁気秩序の周期が格子不整合のままである. 一方原子番号が一つ小さい希土類イオンを持つ $TmMn_2O_5$ では, 中間温度相で格子整合相が現れる. イオン半径が僅かに異なる事で格子整合相が不安定化している事が予想されるが, 具体的にどの磁気相互作用が変化して格子整合相が消失しているのかはまだ明らかになっていない. そこで我々は $Tm_{1-x}Yb_xMn_2O_5$ を作成し結晶構造と誘電性が x に依存してどのように変化して行くかを調べた.

3. 研究成果とまとめ

$Tm_{1-x}Yb_xMn_2O_5$ の $x=0, 0.38, 0.51, 0.68, 1$ について, フラックス法により単結晶を育成した. 誘電率測定および電気分極測定を行い, 更に韓国原子路研究所の中性子回折装置 (Bio-D) で結晶構造解析を行った. 上記の組成値 x は, 構造解析の結果から決定された値である. これらの実験から決定された磁気・誘電相図を図 1 に示す. 磁気相は, 誘電測定の結果から推定した相であり, まだ実験的に決定されていないが, Yb の濃度が 0.68 を超えても格子整合相が消失しない可能性が高いことが分かった. 現在 $0.7 < x < 1.0$ の組成の単結晶育成を試みており, 来年度の申請課題では, それらを用いて結晶構造と組成と決定し, 格子整合相が不安定になる起源について, 微視的に明らかにしたい. また, 各組成について磁気散乱実験を行い, 各誘電相で実現している磁気秩序相について, 実験的に明らかにしたい.

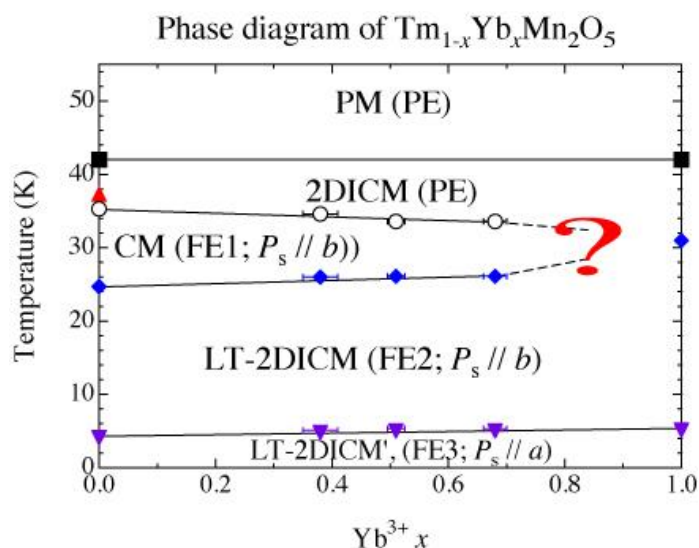


図 1: $Tm_{1-x}Yb_xMn_2O_5$ の磁気・誘電相図の温度—組成依存性. 図中の略称は 2DICM: 二次元変調格子不整合磁気相, CM: 格子整合磁気相, LT-2DICM: 低温二次元変調格子不整合磁気相, LT-2DICM': 低温二次元変調格子不整合磁気第 2 相, FE1: 強誘電第 1 相, FE2: 強誘電第 2 相, FE3: 強誘電第 3 相.