

## 研究課題名

高温超伝導銅酸化物における高エネルギースピンの揺らぎの研究

## 研究代表者名

総合科学研究機構・中性子科学センター・松浦直人

## 研究分担者名

総合科学研究機構・中性子科学センター・池内和彦  
日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・梶本亮一  
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究センター・脇本秀一

## 1. はじめに

J-PARC の本格的稼働が始まり、幅広い $(Q, \omega)$ 領域の情報を非常に効率よく測定できる実験が日本でも可能になった。幅広い $(Q, \omega)$ 領域の情報が必要不可欠な研究の一つに、高温超伝導銅酸化物におけるスピンの揺らぎの研究がある。高温超伝導銅酸化物では Cu スピン間の強い磁氣的相互作用によりスピンの揺らぎシグナルは 400meV の高エネルギーに及ぶ。高温超伝導には磁氣的相互作用が重要だと認識されており、ホールドープ型高温超伝導銅酸化物では共通して砂時計の形に類似した特徴的な磁気励起が観測されているが、超伝導機構に対する磁気揺らぎの具体的な役割は未だ明らかになっておらず、磁気励起全体の詳細で定量的な測定が求められている。J-PARC では、核破砕中性子源施設としては世界最大強度の中性子ビームが発生するようになり、高温超伝導体の微弱な磁気揺らぎの全体像の観測に挑戦する絶好の機会を迎えている。本研究課題では、J-PARC に設置された 4 次元空間中性子探査装置（四季分光器）を用いて行った高温超伝導体の磁気励起データについて、既に高温超伝導銅酸化物の磁気励起のモデリングおよびシミュレーションについて蓄積がある東北大学金属材料研究所にて、モデリングの詳細な議論を行い、超伝導組成領域の磁気相関の解明を目指した。

## 2. 研究経過

高温超伝導銅酸化物  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  について、母物質 ( $x=0$ )、不足ドープ組成 ( $x=0.075$ ) について、四季分光器を用いて幅広いエネルギー領域における磁気揺らぎの測定を行った。使用した不足ドープ組成では、電荷励起のスペクトラムの一部にギャップ構造が生じる擬ギャップ現象が 350K 以下で見られるが、磁気励起における擬ギャップの影響を調べる為に、擬ギャップ温度を超える 500K から超伝導状態の 5K までの幅広い温度領域で中性子非弾性散乱実験を行った。得られた実験結果について、金属材料研究所にて構築された減衰ハイゼンベルグスピン波モデルのシミュレーションと比較することにより、擬ギャップ温度、超伝導温度をまたいだ磁気励起パラメータの抽出を試みた。

## 3. 研究成果

不足ドープ組成 ( $x=0.075$ ) では、超伝導相において砂時計型の磁気励起を観測し、擬ギャップ温度 (~350K) より少し下の 300K において砂時計の下半分が反強磁性ゾーン中心に集まり、擬ギャップ温度以上の 400K、500K では砂時計の上半分も反強磁性ゾーン中心に集まる振る舞いが観測された。磁気揺らぎシグナルを高エネルギーまでエネルギー積分することによって得られる複素磁化率の虚数部分  $\chi''(q)$  から求めた相関長は 5K から 500K の間でほとんど変化していないことから、上記の変化は相関長の温度変化では説明できない。そこで、減衰ハイゼンベルグスピン波モデルによるシミュレーションと比較することにより、擬ギャップ温度以上の 400K、500K においては、反強磁性ゾーン全体で減衰因子が 70meV 程度、ギャップ温度以下では反強磁性ゾーン中心の減衰因子が 30meV まで低減すると仮定する事で、実験結果を良く再現することが明らかになった。この結果は、電荷励起スペクトラムに生じる変化が、主に反強磁性ゾーン中心付近の磁気励起の減衰係数として現れることを示している。

## 4. まとめ

J-PARC の四季分光器で得られた高精度でかつ幅広いエネルギー・温度領域にわたる磁気励起データを、定量的にモデルシミュレーションと比較することにより、電荷励起における擬ギャップがスピンの揺らぎに与える変化を抽出することが出来た。

## 研究課題名 電子ネマチック揺らぎによる光散乱理論

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 山瀬博之

研究分担者名

東北大学金属材料研究所 量子ビーム金属物理学研究部門 藤田全基

### 1. はじめに

銅酸化物高温超伝導機構の背後には、反強磁性相関、電荷秩序相関、軌道カレントの秩序相関、電子ネマチック相関等、マルチな相関が存在していることが明らかにされつつある。また、最近、鉄系高温超伝導体でも、反強磁性相関以外に電子ネマチック相関の存在が示唆された。電子ネマチック相関が、高温超伝導機構の新たな可能性として浮上してきただけでなく特異な物性発現にも深く関わっていることから、多くの研究者の興味を引きつけている。電子ネマチックとは、電子系において方向対称性のみが低下した新しい量子状態であり、超伝導や磁性と同様な自発的対称性の破れに伴うものである。電子ネマチックとして電荷の自由度を起源とする「電荷ネマチック」、軌道成分を起源とする「軌道ネマチック」、そしてスピン成分を起源とする「スピンネマチック」がある。電荷ネマチックは銅酸化物超伝導体で、残りの二つは鉄系超伝導体で生じている可能性が議論されている。自発的対称性の破れの概念が物質科学にとって極めて重要であることは周知の通りである。それ故に、電子ネマチックの学理形成もまた物性論の中で重要な位置を占め、新しいパラダイムを切開くことが期待される。しかし、これまでの電子ネマチックの報告は間接的な観測例であるため、幅広い物質に普遍的に適用出来、かつ電子ネマチックを直接的に観測する手段を確立することが急務である。本研究では、電子ネマチックを記述する相関関数がラマン散乱で直接観測出来ることに着目し、ラマン散乱理論を構築することで電子ネマチックを微視的に検証する手段を確立する。

### 2. 研究経過

電子ネマチックの特徴の一つはフェルミ面上にギャップが開かないことである。その状態でのラマン散乱理論は、電子の自己エネルギー効果を陽に取り込んで構築する必要があるため、一般には難しい理論テーマとして知られている。しかし、申請者は既に単バンドモデルでの電荷ネマチック揺らぎに対するラマン散乱理論の構築に成功した[PRB 83, 115116 (2011)]。昨年度は、この理論を基に軌道ネマチックを扱うミニマルモデル、つまり、鉄の  $d_{yz}$  と  $d_{zx}$  軌道を含んだ2バンドモデルへの拡張を行い、鉄系高温超伝導体に対して実験を先導する理論的基盤を与えた[PRB 87, 125120 (2013)]。申請者らの理論研究の後、鉄系超伝導体のネマチック揺らぎを観測した、というラマン散乱実験が報告され[PRL 111, 267001 (2013)]、 $B_{1g}$ の偏光配置に対してセントラルモードが現れるが、 $B_{2g}$ の偏光配置では現れない、という我々の理論的予言と一致していることが確認された。したがって、鉄系超伝導体においてネマチック揺らぎの存在が微視的な観点から支持されたと言える。一方で、セントラルモードの現れるエネルギースケールが理論的予言よりも10倍弱大きい、という定量的不一致も浮上した。

実験的には、軌道だけではなくスピンの自由度に伴う電子ネマチックも存在している可能性が議論されている。光はスピンネマチック揺らぎによっても散乱され、その効果の理論的考察に着手した。スピンネマチック揺らぎによる散乱は、高次のラマン散乱プロセス(Aslamazov-Larkin ダイアグラム)を通じて生じる。本年度は、Aslamazov-Larkin ダイアグラムのバーテックス部分の波数及びエネルギー依存性が小さい場合を想定して、それらを定数として近似した。特に  $B_{1g}$  対称性に注目した。その結果、本年度の計算はスピンネマチック感受率の解析に帰着した。

### 3. 研究成果

スピンネマチック揺らぎは反強磁性相近傍で強くなるが、驚くべきことにスピンネマチック揺らぎは、系の詳細には依存しない一般的な性質を持っていることが分かった。有限温度では軌道ネマチック揺らぎの場合と同様にセントラルモードが現れるが、絶対零度近傍ではセントラルモードが消失し、代わりにスピンネマチック揺らぎはソフトモードとして現れる。さらに、たとえ絶対零度であっても、スピンネマチック揺らぎは明確な分散関係を示さず、波数ゼロ、エネルギーゼロを中心にした散漫ピークとして現れることが分かった。これらの結果を踏まえて、鉄系超伝導体におけるスピンネマチック不安定性やその揺らぎの存在可能性を議論した。