

別紙1-1

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

氏 名 川口 功起

論 文 題 目 銅酸化物高温超伝導体における電子相関に由来する  
電子ネマティック秩序

### 論文審査担当者

主 査 名古屋大学大学院理学研究科 教授 博士(理学) 紺谷浩

委 員 名古屋大学大学院理学研究科 教授 Ph.D. 岡本祐幸

委 員 名古屋大学大学院理学研究科 教授 博士(理学) 宮崎州正

委 員 名古屋大学大学院理学研究科 准教授 博士(理学) 小林義明

委 員 名古屋大学大学院理学研究科 准教授 博士(理学) 大成誠一郎

## 論文審査の結果の要旨

別紙 1 - 2

銅酸化物高温超伝導体は 1986 年に発見されて以来、強相関電子系の代表的物質として、凝縮系物理学の重要な研究課題となっている。その状態相図では、スピン秩序相に隣接して高温超伝導相が出現する。そこで電子のスピン自由度に着目したスピン揺らぎ理論が提唱され、一定の成功を収めたものの、状態密度における擬ギャップ現象など未解明問題が山積していた。

2012 年以降、これまで無秩序相だと思われてきた高温  $T = T_{\text{CDW}}$  ( $\sim 200\text{K}$ ) において、波数ベクトル  $\mathbf{q} = (0.5\pi, 0)$  の非磁性のストライプ秩序が共鳴 X 線散乱や走査型トンネル電子顕微鏡によって発見された。更には  $T_{\text{CDW}}$  より高温の擬ギャップ温度  $T^*$  ( $\sim 300\text{K}$ ) で、回転対称性が破れる「電荷ネマティック秩序」が発見された。一連の発見は、これまで軽視されてきた電子の電荷の自由度の重要性を浮き彫りにし、従来理論を大幅に修正する必要性が生じた。

ストライプ秩序もネマティック秩序も、従来の平均場近似レベルの理論では説明できない。そこで申請者は、発達したスピン揺らぎ同士 (波数ベクトル  $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$ ) が干渉して、波数ベクトル  $\mathbf{Q}_1 - \mathbf{Q}_2$  の電氣的な秩序をもたらす「量子干渉機構」に着目し、平均場理論を超えた多体電子理論に基づく研究を展開した。この機構は、鉄系超伝導体における電子ネマティック秩序を説明する理論であるが、申請者により銅酸化物高温超伝導体に適用された。その結果、「ボンド秩序」と呼ばれるサイト間の重なり積分の変調が、温度  $T_{\text{CDW}}$  で発現することを見出した。ボンド秩序は、狭義の電荷秩序 (オンサイトの電子数の変調) とは異なりクーロン斥力により壊されないため、強相関電子系でも安定に出現し得る。本研究で得られたボンド秩序は、共鳴 X 線散乱で観測されたストライプ電荷秩序の特徴を良く説明する。

申請者は同じ理論に基づき、擬ギャップ温度  $T^*$  に相当する高温で、 $\mathbf{q} = \mathbf{0}$  の強的なボンド秩序が生じることを見出した。これは、実験で観測された電子ネマティック秩序の候補となる結果である。更に申請者は、電子ネマティック秩序の対称性が、 $B_{1g}$  対称性 ( $= d[x^2 - y^2]$  波対称性) の場合と、 $B_{2g}$  対称性 ( $= d[xy]$  波対称性) の場合があることを、理論的に見出した。前者は Y 系銅酸化物、後者は Hg 系銅酸化物超伝導体において報告された対称性に対応する。

以上のように、申請者は銅酸化物高温超伝導体における非従来型電荷秩序を説明するため、スピン揺らぎ同士の干渉機構を考慮した、平均場近似を超えた多体電子理論を構築した。その結果、室温から温度を下げるにつれて、最初に温度  $T^*$  で  $\mathbf{q} = \mathbf{0}$  の強的なボンド秩序が生じ、次に温度  $T_{\text{CDW}}$  でストライプ的ボンド秩序が生じ、最後に  $d$  波超伝導相が出現することを見出した。

これらの成果は、銅酸化物高温超伝導体の実験相図を多段  $d$  波ボンド秩序シナリオに基づき説明したものであり、高温超伝導体の多体電子状態の新たな本質を明らかにした意義のある研究である。また参考論文は、汎関数繰り込み群理論に基づき多段  $d$  波ボンド秩序を再現した研究であり、価値あるものである。以上の理由により、申請者は博士(理学)の学位を授与される十分な資格があるものと認められる。