



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                     |                                                                                                                                                                                     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | Spin and bond-charge susceptibilities in a correlated electron model of antiferromagnetism and superconductivity [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review] |
| Author(s)           | Rajabi, Muhammad Zafur Abror                                                                                                                                                        |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                                                                                                               |
| Degree Name         | 博士(理学)                                                                                                                                                                              |
| Dissertation Number | 甲第16084号                                                                                                                                                                            |
| Issue Date          | 2024-09-25                                                                                                                                                                          |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/93411">https://hdl.handle.net/2115/93411</a>                                                                                                   |
| Rights(URL)         | <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>                                                                             |
| Type                | doctoral thesis                                                                                                                                                                     |
| File Information    | Muhammad_Zafur_review.pdf, 審査の要旨                                                                                                                                                    |



## 学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 Muhammad Zafur Abror Rajabi

主査 客員教授 山瀬 博之  
審査担当者 副査 教 授 北 孝文  
副査 教 授 吉田 紘行

### 学 位 論 文 題 名

Spin and bond-charge susceptibilities in a correlated electron model of  
antiferromagnetism and superconductivity  
(反強磁性相と超伝導相近傍でのスピンとボンド電荷揺らぎに関する理論研究)

#### 博士学位論文審査等の結果について（報告）

銅酸化物高温超伝導体の母物質をはじめ、多くの反強磁性物質では最近接間の反強磁性相互作用が働いていることが知られている。そのような物質にキャリアをドーピングすると、金属状態が出現すると同時に超伝導も実現する。

著者の Muhammad Zafur は、最近接間の反強磁性相互作用には、ボンドの自由度に対応する電荷が含まれ、それがキャリアドーピングによって自由度を獲得した結果、スピンドायナミクスと同じエネルギースケールを持ったボンド電荷ダイナミクスが生じ得る、という理論的着想を得た。スピンとボンド電荷のダイナミクスを同等に扱い、両者のダイナミクスを同時に調べる理論研究は今まで行われてこなかった。そこで、Muhammad Zafur は、反強磁性金属状態、超伝導状態、ボンド電荷状態の 3 つの状態を記述し得る低エネルギーの有効モデルを提案し、その相図を明らかにした。得られた相図は、電子ドーピング系銅酸化物高温超伝導体のものと酷似していた。そこで、電子ドーピング系に着目してスピンとボンド電荷のダイナミクスを調べた。ボンド電荷ダイナミクスの研究そのものは新しいが、電子ドーピング系では、ホールドーピング系と違って、スピンドायナミクスの理論研究すらあまり行われていなかった。そこで、両者のダイナミクスを統一的に理論的に解明した Muhammad Zafur の学位論文の仕事は、先駆的な理論研究と位置付けられる。計算の結果、中性子散乱実験で観測された多くのスピンドાયナミクスをほぼ定量的に再現できるだけでなく、実験的に「パラマグノン」として議論されているスピン励起が、実は「個別スピン励起」として理解できる可能性も示した。共鳴 X 線散乱によって電荷秩序の傾向が報告されているが、それは d 波対称を持ったボンド電荷である可能性も示唆した。実験と良い一致を示す本理論研究の価値は高く、今後の物性研究の発展への寄与が期待される。

さらに、著者の Muhammad Zafur は、反強磁性金属状態で超伝導転移が生じた時に、反強磁性相と同じ波数を持つ縦スピン磁化率が、ジャンプを示すことも発見した。よく知られた比熱のジャンプとは異なる機構で、近似やモデルには依存しない一般的な性質である可能性を、反強磁性相での SU(2) 対称性の破れに着目して論じた。この理論的発見は、まだ実験では確認されていないが、近い将来、実験的にも発見されることが期待される。

著者の Muhammad Zafur は、以上の 2 つの理論研究の実施を通じて、現代物理学の広範囲かつ高度な学問的素養や理論を体系的に修得しただけでなく、科学者の卵として高い倫理観のもとに研究に取り組んできた。得られた結果を批判的に分析し、どのような科学的知見が得られたと言えるのか論理的に説明できる能力も身につけた。さらに、理論結果と実験結果との批判的検討を忍耐強く行い、自身の理論研究の範囲でどこまでを解き明かすことができたのか、同時に何が将来の課題として残っているのかを的確に把握する能力も身につけた。Muhammad Zafur は膨大な量の理論計算を行ったが、それらを適切に取捨選択し、何が重要で何が枝葉であるかを的確に判断

して、限られた時間で成果を非常に分かりやすい言葉で発表できる能力も磨いてきた。

以上の成果を踏まえ、著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。