

古崎物性理論研究室

主任研究員 古崎 昭 (D.Sci.)



(0) 研究分野

分科会:物理

キーワード:トポロジカル相、強相関電子系、フラストレート磁性体

(1) 研究背景と研究目標

多数の電子が相互作用している多電子系は、自発的に対称性の破れた秩序相や非自明なトポロジカル相などの多彩な相を持っている。遷移金属酸化物や分子性導体などの強相関電子系における超伝導や磁性は対称性の破れた相の典型例で、これらの量子現象の理解は研究室の主要研究課題の一つである。磁性に関しては、三角・籠目・パイロクロア格子上的反強磁性体などのフラストレーションの強い量子スピン系における非自明な秩序状態やスピン液体状態について研究している。また、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体などの電子波動関数の非自明なトポロジーに起因する新しい量子相の研究を行っており、新しいトポロジカル物質の探索やその物性解明にむけた研究に取り組んでいる。

(2) 2021年度成果と今後の研究計画

(A) トポロジカル相の理論

トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体に代表される物質のトポロジカル相に関する理論研究として、スピン軌道相互作用が無視できる軽元素を念頭に、時間反転と回転対称性に守られた脆い3次元トポロジカル絶縁体のモデルを構成した。このトポロジカル絶縁体は、自明なバンド絶縁体を追加することにより全体としてトポロジカルに自明な絶縁体になってしまうために脆いトポロジカル絶縁体といわれる。ギャップレス表面状態の安定性を吟味した。また、トポロジカル超伝導体/常伝導金属/トポロジカル超伝導体の接合系における分数ジョセフソン効果について考察した。接合面に局在したマヨラナ・ゼロモードが常伝導領域の離散準位を介して結合することによる共鳴的なジョセフソン電流を計算した。さらに、1次元量子多体系の基底状態に関するLieb-Schultz-Mattis定理を、反転対称あるいは回転対称な2次元系や3次元系に拡張した。

今後の計画 1) トポロジカル結晶超伝導体におけるマヨラナ・ゼロモードについて研究する。

2) 対称性に守られたトポロジカル相のパラメータ空間の高次トポロジーについて研究する。

(B) フラストレート磁性体

1) 実験の研究者らと協力し、スピンネマティック相出現の候補物質であるクロムスピネル酸化物 HgCr_2O_7 と2次元ダイマー系 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_4$ において、磁場中における熱容量測定を行い、スピンネマティック相が出現すると理論的に予想される磁場領域で新たな量子相の存在を確認した。また、実験データの理解のため、スピンネマティック相近傍における比熱と核磁気緩和率の振る舞いを、ボーズ気体理論を用い理論的に再考した。2) さらに、フラストレート磁性体をはじめとする量子格子モデルの低エネルギー有効モデルを非摂動的に導出する手法開発を行った。有限系のハミルトニアンをブロック対角化する数値計算手法を用い相互作用を求め、その強さを数値的級数展開法により非摂動的に求めることが出来る。

今後の計画 1) ボーズ気体理論を用いた動的物理量の取り扱いをスピンネマティック相の内部へも拡張する。Hartree-Fock近似を用い相互作用の効果を取り入れ、動的構造因子 $S(\mathbf{k}, \omega)$ や核磁気緩和率の温度依存性の振る舞いの解析を行う。2) また、新たに開発した、非摂動的有効モデルの導出法をフラストレート磁性体やKitaevモデルに当てはめ、低エネルギー自由度を非摂動的に評価する研究を進める。

(C) 量子スピンアイス系における磁気励起および磁気弾性の理論

量子スピンアイスと呼ばれる磁性希土類パイロクロア $R_2T_2O_7$ (R : 希土類元素、 T : 遷移金属元素) の磁性絶縁体群は、磁化のモノポール励起を電荷に見立てた仮想電磁気学を発現するU(1)量子スピン液体の舞台として研究されている。特に、 $Tb_2Ti_2O_7$ はU(1)量子スピン液体と電気四重極秩序相との間の量子相転移の可能性を示唆する実験結果が報告されている。これらの系はU(1)量子スピン液体相近傍にあり、磁気励起や磁気弾性的性質は従来の理論では容易に説明できない。超交換相互作用と磁気双極子相互作用をもつ局在 f 電子系が格子歪みと線形に結合したモデルにもとづく $Tb_2Ti_2O_7$ の磁気弾性的性質に対する高温RPA解析を低温量子スピンアイス領域に拡張することにより、四重極秩序相への相転移を理論的に記述し、 $Tb_2Ti_2O_7$ における超音波測定結果を説明した。

今後の計画 Tb系、Yb系だけでなく、Ce系、Pr系を含む量子スピンアイス系全般に上記の理論的枠組みを適用し、U(1)量子スピン液体を実現している可能性を理論的に探究し、量子スピン液体相と古典的秩序相との間の量子相転移を記述し、実験的検証の方法を提案していく。

(D) 有機・無機反強磁性体におけるスピン電荷交差相関現象

電子の持つ電荷とスピン自由度が絡み合う量子現象は、スピントロニクスや強相関電子系などの分野において広く発展している。その中で、上向き/下向きスピンの互いに反平行に揃う共線 (コリニア) 型の磁気秩序を示す物質において、非自明なスピン分裂バンド・スピン流伝導・異常ホール効果といった現象が実現する可能性を理論的に追求している。今年度は有機反強磁性体でのスピン分裂バンドへの強相関効果を数値的に調べた結果を発表した。またペロブスカイト型遷移金属酸化物についてのモデル計算を行い、多様な反強磁性パターンについて異常ホール効果の生じる条件やそのミクロなメカニズムを解明した。

今後の計画 1)スピン分裂バンド下での特異な超伝導の可能性を追求する。2)コリニア・コプラナー・ノンコプラナー 磁気構造とそれらに起因する異常ホール効果を統一的に調べ、これまで提案されてきた異種メカニズム間の関連を解明したい。

(3) 研究室メンバー

(2021年度)

(主任研究員)

Yuan Yao

古崎昭

(特別研究員)

(専任研究員)

角田峻太郎、横溝和樹

桃井勉、小野田繁樹、妹尾仁嗣

(研修生)

(基礎科学特別研究員)

古澤拓也

(4) 発表論文等

1. “Fragile topological insulators protected by rotation symmetry without spin-orbit coupling”, Shingo Kobayashi and Akira Furusaki, **Phys. Rev. B** **104**, 195114 (2021).
2. “Superconductor/normal-metal/superconductor junction of topological superconductors revisited: Fractional Josephson current, fermion parity, and oscillating wave functions”, Shuntaro Sumita and Akira Furusaki, **Phys. Rev. B** **104**, 205431 (2021).
3. “Geometric approach to Lieb-Schultz-Mattis theorem without translation symmetry under inversion or rotation symmetry”, Yuan Yao and Akira Furusaki, **Phys. Rev. B** **106**, 045125 (2022).
4. “Quantum phase of the chromium spinel oxide $HgCr_2O_4$ in high magnetic fields”, Shojiro Kimura, Shusaku Imajo, Masaki Gen, Tsutomu Momoi, Masayuki Hagiwara, Hiroaki Ueda, and Yoshimitsu Kohama, **Phys. Rev. B** **105**, L180405 (2022)
5. “Antiferromagnetic State in κ -type Molecular Conductors: Spin Splitting and Mott Gap”, Hitoshi Seo and Makoto Naka, **J. Phys. Soc. Jpn.** **90**, 064713 (2021).

Laboratory Homepage

https://www.riken.jp/research/labs/chief/condens_matter_theor/index.html

<https://www2.riken.jp/lab-www/cond-mat-theory/>