



(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ながら運動している多電子系では、自発的に対称性の破れた秩序相の出現やそれらの間の相転移などの多彩な物理現象を示す。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その典型例で、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といった、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いる。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も取り組んでいる。

(2) 2020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を行っている。2020年度は、3次元の時間反転対称なトポロジカル絶縁体がS波超伝導秩序をもった場合に対して、磁束中に束縛されたマヨラナ・ゼロモードについて研究し、結晶が n 回の回転対称性 ($n=2, 4, 6$) をもつとき、異なる回転固有値をもつマヨラナ・ゼロモードが2つ生じることを明らかにした。また、スピン軌道相互作用の強い量子細線中の一次元強相関電子系が横磁場中で示すイジング的な反強磁性準長距離秩序相において、細線の端の束縛状態をマヨラナ・ゼロモードとして取り扱った。

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) フラジャイルなトポロジカル結晶絶縁体について研究する。

(B) フラストレート磁性体

スピン1/2カゴメ格子反強磁性体における磁化プラトー中の基底状態の縮退度を、断熱的磁束挿入法と1次元極限での't Hooft anomaly (量子異常) の解析という2つの方法を用いて調べた。磁束挿入の議論では系が持つU(1)スピン回転対称性と並進対称性を用い、磁化1/9, 1/3, 5/9, 7/9に現れる磁化プラトーの基底状態縮退度の厳密な下限を与えた。更に、磁化1/3のプラトー状態における量子異常の解析を行い、エネルギーギャップが開いた縮退度1の基底状態の存在可能性を検証した。S=1/2の三角スピントラップにおける1/3プラトー状態では、 $Z_3 \times Z_3$ 対称性と並進対称性の間に量子異常があることから、縮退度1のエネルギーギャップの開いた基底状態が存在し得ないことを示した。一方、カゴメ反強磁性体では、ユニットセル内の Z_3 対称性の1つが明示的に破れているため、縮退度が1のギャップ基底状態が存在し得るという理解を得た。

今後の計画 量子格子模型の低エネルギー有効模型を導出するために、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検討し、数値的級数展開法を併用して非摂動的に有効ハミルトニアンを導出する方法を開発する。この方法をフラストレート磁性体研究に用いる。

(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、 $Yb_2Ti_2O_7$ ではモノポ

ールがボーズ凝縮した強磁性相が観測されている。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。そこでU(1)量子スピン液体を記述する格子ゲージ理論の枠組みを秩序相にも適用できるように拡張し、 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ における磁気励起スペクトルの定量的な理論的説明を与えた。また、量子スピンアイス模型に希土類イオンの電気四重極モーメントと歪みとの結合を加えることで、 $\text{Tb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ における超音波測定結果を理論的に説明した。

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) 反強磁性体におけるスピン輸送現象

電子の持つスピン自由度が直接絡むような量子輸送現象は、スピントロニクスや強相関電子系などの多くの分野と関連しながら発展している。その中で強磁性磁化を持たない簡単な反強磁性体である、上向き/下向きの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も、スピン流伝導や異常ホール効果といったスピン輸送現象が実現する可能性を追求している。今年度は有機反強磁性体における異常ホール伝導について提案を行い、またそこでの強相関効果を厳密に扱った数値計算結果を発表した。また良く知られたペロブスカイト型遷移金属酸化物におけるスピン流生成メカニズムを提唱した。

今後の計画 1) ペロブスカイト型遷移金属酸化物における異常ホール効果の研究を行う。2) 第一原理計算を用いて、有機磁性体におけるスピン軌道相互作用を有効モデルへ導入する。

(3) 研究室メンバー

(2020年度)

(主任研究員)

古谷峻介

古崎昭

(特別研究員)

(専任研究員)

角田峻太郎

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、Mateo Fontaine

(4) 発表論文等

1. “Majorana end states in an interacting quantum wire”, Ren-Bo Wang, Akira Furusaki, and Oleg A. Starykh, **Phys. Rev. B** **102**, 165147 (2020).
2. “Double Majorana vortex zero modes in superconducting topological crystalline insulators with surface rotation anomaly”, Shingo Kobayashi and Akira Furusaki, **Phys. Rev. B** **102**, 180505(R) (2020).
3. “Roles of easy-plane and easy-axis XXZ anisotropy and bond alternation on a frustrated ferromagnetic spin-1/2 chain”, Hiroshi Ueda and Shigeki Onoda, **Phys. Rev. B** **101**, 224439 (2020).
4. “Perovskite as a spin current generator”, Makoto Naka, Yukitoshi Motome, and Hitoshi Seo, **Phys. Rev. B** **103**, 125114 (2021).
5. “Parafermionization, bosonization, and critical parafermionic theories”, Yuan Yao and Akira Furusaki, **J. High Energy Phys.** **2021**, 285 (2021).

Supplementary

Laboratory Homepage

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

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