

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23840009

研究課題名（和文） 相互作用のあるトポロジカル絶縁体・超伝導体の研究

研究課題名（英文） study of interacting topological insulators/superconductors

研究代表者

多田 靖啓 (TADA YASUHIRO)

東京大学 物性研究所・助教

研究者番号：20609937

研究成果の概要（和文）：トポロジカル絶縁体・超伝導体は相互作用がある場合にはその性質はあまりよく理解されていない。本研究では、まず、相互作用のあるトポロジカル絶縁体における有限サイズ効果について解析を行いその性質を明らかにした。また、今後実現が期待されているトポロジカル超格子の研究の第一歩として、すでに実現している f 電子系超格子の研究を行い次元性の役割などを議論した。

研究成果の概要（英文）：Topological insulators and superconductors with interactions are not well understood. In this project, we first studied the finite size effect in interacting topological insulators and clarified their properties. As a first step for topological superlattices which are expected to be realized, we next analyzed f-electron superlattices and discussed role of dimensionality.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：電子相関、トポロジー

1. 研究開始当初の背景

近年、トポロジカル絶縁体・超伝導体の研究がさかんに行われているが、系に相互作用がある場合についてはあまり理解が進んでいない。理論的には様々な提案があるがまだ発展段階であり、より詳細な研究が必要とされている。とくに、理論的にはバルクがトポロジカルであるにもかかわらず、エッジモードが存在しないような状態である「トポロジカル・モット絶縁体（エッジ・モット絶縁体状態）」の可能性などが指摘されており、具体

的なモデルで相互作用の効果を明らかにすることが望まれている。この問題は、トポロジカル絶縁体・超伝導体の定義ともいえる基本的性質「バルク・エッジ対応」と密接にかかわる。バルク・エッジ対応はトポロジカル秩序の枠組みにおいても議論されることがあり、系のエンタングルメントという観点からも興味深いものである。

2. 研究の目的

本研究では、相互作用のあるトポロジカル絶縁体・超伝導体を理解するために、主に2つ

の系を考えた。一つ目はエッジのある2次元系であり、もうひとつは超格子である。一つ目に関しては、主に、相互作用のある場合のバルク・エッジ対応を議論する。さらに、エッジをもつような有限系においては、有限サイズ効果も存在するため、それに対する相互作用の影響も解析する。超格子については、理論的にはトポロジカル絶縁体・超伝導体を用いた超格子が提案され、その物性が議論されている。実験的にはトポロジカル絶縁体を薄膜にしたものが作成されているため、今後、超格子の実現も期待される。そのため、まずはトポロジカルではないが近年実現されたf電子系の超格子を議論し、超格子における相互作用について理解を深める。

3. 研究の方法

研究の方法として、エッジのある2次元系の解析には、エッジ間トンネリングを摂動として捉える有効理論や具体的な格子模型における非一様動的平均場理論などを用いる。動的平均場の計算においては、有効不純物模型を解析する際に、反復2次摂動法や数値繰り込み群を相補的に用いる。また、超格子に関しては、着目する物理現象に合わせた計算を行う。つまり、高温側は非一様動的平均場理論を用いて重い電子の形成を解析し、低温側には揺らぎ交換近似をスピン揺らぎの性質を調べる。さらに、Eliashberg方程式を解くことで超伝導不安定性を計算し、実験でみられている転移温度や上部臨界磁場の振る舞いを議論する。

4. 研究成果

2次元トポロジカル絶縁体において、有限サイズ効果の相互作用依存性や、有限サイズでのみ現れるウムクラップ散乱の効果などを解析した。前者に関しては、系のサイズが十分小さいときと大きいときの有限サイズ性に起因するギャップの評価を行い、その物理的描像を議論した。有限サイズ効果に対する相互作用の影響はこれまで議論されていなかったが、本研究によって、小さな系に対しては物理的に自然に期待される相互作用依存性が実際に成立していることを示した。これまでの相互作用のあるトポロジカルでない絶縁体の研究から、相互作用によって絶縁体のギャップが増加するか繰り込まれるかは系の詳細に依存することが知られている。本研究では、とくにこの点について、ギャップの起源と相互作用の影響を明確にし、系は全体としてギャップのあるフェルミ液体として理解できることを具体的に示した(図1)。後者に関しては、その存在が期待される新奇状態「エッジ・モット・トポロジカル絶縁体」の可能性を、エッジ間ウムクラップ散乱の効果に着目して議論した。その結果、エッジ間ウムクラップ散乱によっては、エッジ・モット・トポロジカル絶縁体状態は

実現される可能性が低いことを示した(図2)。テクニカルな点について言及すると、本研究で行った計算はこれまでなされたことのない複雑な有効不純物模型の解析となっている(図3)。有効不純物模型を導く過程は一種の逆問題であり、本研究で発展させた技術的詳細は、今後、さらに複雑な問題にチャレンジする際に応用可能であると考えられる。

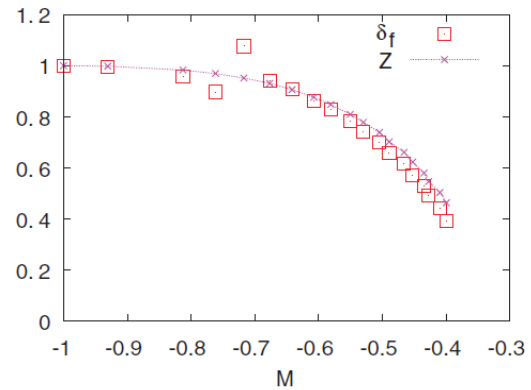


図1: スケールされた有限サイズギャップ δf と繰り込み因子 Z 。横軸は有効的なオンサイトのエネルギー M 。

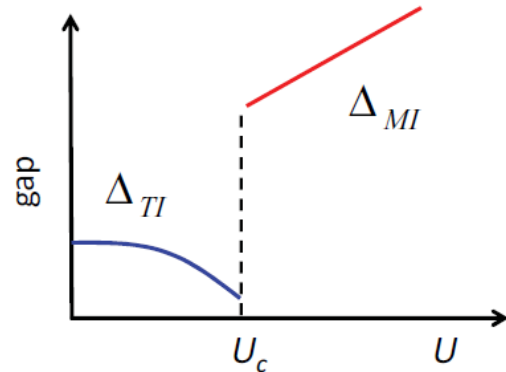


図2: トポロジカル絶縁体とモット絶縁体のギャップ Δ_{TI} と Δ_{MI} の相互作用 U 依存性。相互作用を増加させてゆくと $U=U_c$ でトポロジカル絶縁体からモット絶縁体に一次転移を起こし、その過程においてエッジ・モット絶縁体状態の兆候は見られなかった。

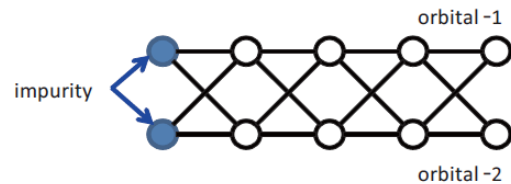


図3: トポロジカル絶縁体の動的平均場理論における有効不純物模型。クロスしている軌道間ホッピングはスピン軌道相互作用に

対応する。

また、f 電子系超格子に関して、まず、f 電子系の基本的性質の一つである重い電子の形成とその性質について、非一様動的平均場を用いて解析を行った。その結果、超格子においては、3次元異方的な重い電子形成についてはエネルギースケールはただ1つしか存在しない一方で、その輸送特性については2-3次元クロスオーバーが見られることを明らかにした(図4)。本研究は重い電子系において次元クロスオーバーを明らかにした最初の研究であり、f 電子系超格子を理解する上でも基本となる結果と考えられる。この結果は、先行研究で仮定されてきた素朴に超格子を2次元系とみなすことは不十分であることを示すものであり、実験を理解する上でも重要な第一歩である。また次に、実験で見られている磁性や超伝導の性質を理解するために、揺らぎ交換近似を用いて研究を行った。その結果、3次元的な反強磁性スピン揺らぎのある系に超格子構造を導入すると、スピン揺らぎは強く抑えられる一方で、超伝導は非常に安定であることが分かった(図5, 6)。このことは、よく知られているホッピング異方性をパラメータとした場合とは定性的に異なる新しい結果であり、超格子特有の現象と考えられる。スピン揺らぎのz方向の波数依存性は超格子では弱くなっていることを考えると、この結果は間接的に、CeCoIn5/YbCoIn5の超伝導はスピン揺らぎのx, y成分のみを有効引力とするようなd(x²-y²)ペアリングであることを示している。また実験的には、超格子においてはバルクに比べて超伝導転移温度が下がっているにも関わらず絶対零度の上部臨界磁場がバルクに近い値をもっているという顕著な特徴がある。本研究では、動的平均場の結果を現象論的に導入し、近藤極限での繰り込まれたフェルミ液体論を適用することで、コヒーレンス温度が低下すると転移温度は低下するがパウリ極限の上部臨界磁場は繰り込みの影響を受けないことを示した。これらの研究は、今後より詳細な解析、とくに超伝導状態の次元クロスオーバーを議論する際に基礎となるものである。

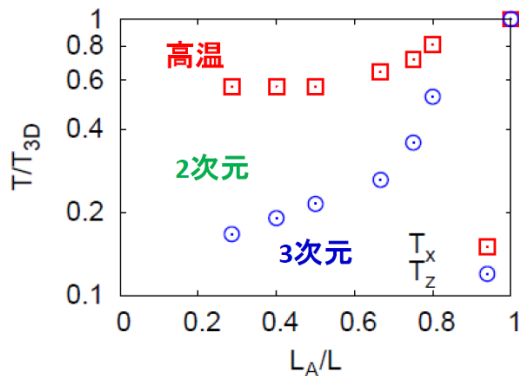


図4: f 電子系超格子における次元クロスオーバー。横軸は超格子の unit cell における f 電子層の割合、縦軸は規格化された温度。T_x, T_z はそれぞれ x 軸、z 軸の電気抵抗におけるピークから定義される特徴的溫度。

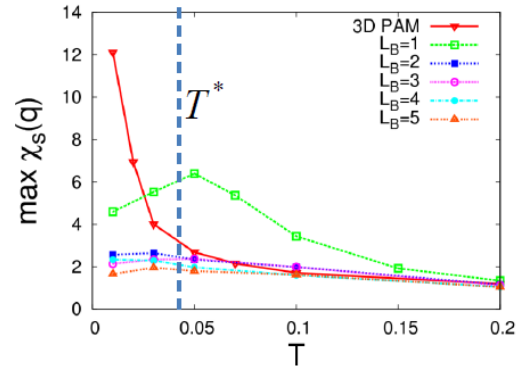


図5: スピン揺らぎの溫度依存性。縦軸はスピン帯磁率の reduced Brillouin zone における最大値で、横軸は溫度。赤色の曲線は通常の3次元系、他の色の曲線は超格子の計算結果。L_Bは超格子 unit cell における伝導電子層の枚数。超格子では特に特性溫度 T*以下でスピン揺らぎが通常の3次元系に比べて抑制されていることが分かる。

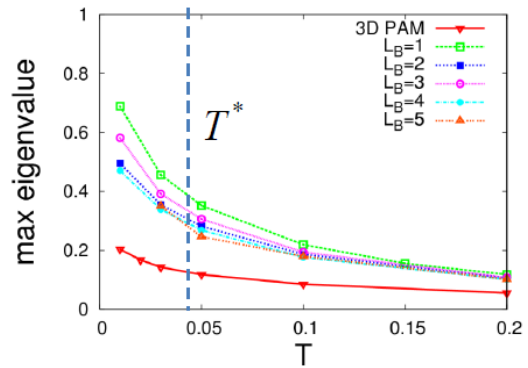


図6: 超伝導不安定性の溫度依存性。赤色が3次元系、他は超格子の場合。特性溫度で何も異常がなく、低温に向かって単調増加している。3次元系に比べて、超格子の方が超伝導への不安定性が大きい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Y. Tada, R. Peters, M. Oshikawa, A. Koga, N. Kawakami, S. Fujimoto, Correlation effects in two-dimensional topological

insulators, Physical Review B, 査読有, 85
(2012) 165138, DOI:
10.1103/PhysRevB.165138

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① 多田靖啓、Robert Peters、押川正毅、f 電子系超格子におけるスピン揺らぎの研究、日本物理学会第 68 回年次大会、2013/3/27、広島大学
- ② 多田靖啓、Robert Peters、押川正毅、超格子における重い電子系の研究、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012/9/20、横浜国立大学
- ③ Yasuhiro Tada, Robert Peters, Masaki Oshikawa, A study on heavy fermions in superlattices, The fourth international workshop on the dual nature of f-electrons, 2012/7/4, 兵庫県じばさんセンター
- ④ 多田靖啓、Robert Peters、押川正毅、古賀晶久、川上則雄、藤本聡、相互作用のあるトポロジカル絶縁体に関する研究、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011/9/23、富山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

多田 靖啓 (TADA YASUHIRO)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号：20609937

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：