

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理 学 )	氏名	吉田 恒也
論文題目	Theoretical study of correlated topological insulators (相関効果をもつトポロジカル絶縁体の理論的研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>量子凝縮相は一般に自発的対称性の破れと秩序変数により特徴付けられることが知られているが、近年、そのような枠組みで記述されない量子相が注目を集めている。そのような相は基底状態の波動関数の位相幾何学的構造により特徴付けることができ、その典型例であるトポロジカル絶縁相は凝縮系物理学のみならず場の理論等の観点からも注目を集めている。従来、トポロジカル絶縁相は半導体で実現され電子相関効果は重要でないと考えられていた。しかし近年、トポロジカル相の発現が<math>d, f</math>電子系でも提案されており、<math>\text{Na}_2\text{IrO}_3</math>, <math>\text{SmB}_6</math>等での実現が期待されている。ここでは電子相関効果とトポロジカルに非自明な構造に起因し新規物性が期待されるため、トポロジカル絶縁体における電子相関効果の研究は現在の重要課題の一つとなっている。</p> <p>このような背景の下、本論文では電子間相互作用が強い系に普遍的に見られるMott転移、近藤効果、磁気秩序の3点に焦点を当て、強い相互作用を持つトポロジカル絶縁体の解析を行っている。まず、2次元トポロジカル絶縁体(スピンホール絶縁体)における解析ではMott転移点近傍でバンドギャップが強相関効果により繰り込まれ、スピンホール伝導度が有限温度において強く抑制されることを指摘している。さらに、この振る舞いにはバルクギャップの起源がスピン軌道相互作用である事が重要であり、トポロジカル絶縁体において普遍的に見られるものであることも指摘している。また相互作用が強くなるとトポロジカル絶縁体はMott絶縁体に一次転移することも明らかにしている。また幾何学的フラストレーションのない系では磁性相が発現し、このような磁気秩序相でもトポロジカルに非自明な相が存在しうることを指摘している。</p> <p>カイラル対称性に保護された1次元トポロジカル相においては、電子間相互作用により一粒子励起に見られていたギャップレスな端状態が消失し多体励起スペクトルにおける端状態に変化する事を明らかにしている。また、エンタングルメントスペクトルを用いた解析により、この振る舞いはス波変換に対する対称性を破る相互作用がある系で一般的に起こる事を示している。さらに、相互作用のない系ではトポロジカル相転移の際一粒子スペクトルのギャップが閉じることが知られているが、1次元強相関電子系においてはこのような一粒子励起スペクトルのギャップが閉じないトポロジカル相転移が見られることを数値的に示し、ここでは代わりに集団励起スペクトルがギャップレスになることを明らかにしている。</p> <p>さらに研究を進め、近藤効果が重要である重い電子系のトポロジカル相の解析を行い、強磁性金属相内にトポロジカル絶縁相が存在することを指摘し、近藤効果とRKKY相互作用の協力によってこの相が広いパラメータ領域で発現する事を明らかにしている。このような相と通常のトポロジカル絶縁体の違いはバルクにおける強い強磁性スピン揺らぎの存在であり、この強磁性ゆらぎに起因して新たなトポロジカル相の端状態は非朝永-Luttinger液体的振る舞いを示すことを現象論により明らかにしている。さらに、この振舞いがNMR縦緩和率によって観測できる可能性を提案している。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年、トポロジカル絶縁相が凝縮系物理における新たな研究テーマを提供している。このような相は半導体において実現しており、これまで主にトポロジカル絶縁相は自由電子系として理論的に扱われてきた。しかし近年、 $\text{Na}_2\text{IrO}_3$  や  $\text{SmB}_6$  等の  $d$ ,  $f$  電子系化合物での発現が提案されるなど、トポロジカルに非自明な系における電子相関効果の解明が重要な課題となっている。このような背景の下、吉田氏は動的平均場理論等を駆使し、トポロジカル絶縁相における Mott 転移、近藤効果、磁気秩序に焦点を当て数値的に信頼性の高い研究を行った。

まず、2次元トポロジカル絶縁体においてはスピンホール伝導度が絶対零度で量子化されることを用いてトポロジカル不変量を計算し、強相関領域におけるトポロジカル相を特徴づけている。また、強相関領域においてこの非自明な相はスピンホール伝導度がゼロである Mott 絶縁相に一次転移する事、さらに有限温度領域においては転移点近傍でバンドギャップの強い繰り込みによりスピンホール伝導度が温度効果で強く抑制される事を見出している。これらの研究は、強相関トポロジカル絶縁相を非摂動論的枠組みにより特徴づけ、Mott 転移の性質を明らかにした重要な成果である。

さらに幾何学的フラストレーションのないトポロジカル相では反強磁性相の発現が期待されるが、そのような長距離秩序相と位相幾何学的構造が共存した反強磁性トポロジカル相が2次元電子系において発現する事を指摘している。また、吉田氏は1次元トポロジカル相における解析も行い、電子相関効果により一粒子励起におけるギャップレスの端状態が破壊され、スピン励起にギャップレス端状態が発現する事を指摘している。このエッジ状態における Mott 転移にはス波変換に対する対称性が本質的であり、一般の相関電子系において普遍的に見られるものであることを示している。また、強相関系では1電子スペクトルのギャップ消失を伴わないトポロジカル相転移が見られる事を数値的に示し、この相転移点において多体の励起スペクトルがギャップレスになる事を明らかにしている。上述の研究成果は非摂動論的なアプローチに基づいた信頼性の高い結果であり、吉田氏のオリジナルな成果として高く評価される。

また、近藤効果が重要である重い電子系のトポロジカル相の解析も行い、トポロジカル相が強磁性金属相内において発現する事、またこの現象には近藤効果と RKKY 相互作用の協力が重要な役割を果たしている事を指摘している。さらにこの相ではバルクの強磁性揺らぎが端状態と結合し非朝永-Luttinger 液体的振る舞いを示し、これが NMR 縦緩和率によって観測できる可能性を提案した点は、実験的観点からも興味深い。

このように、本論文はトポロジカル絶縁体における電子相関効果を明らかにしたものであり、強相関トポロジカル絶縁体の解析の基礎となるものである。博士論文公聴会においても、吉田氏は入念に準備された発表を行い、質疑応答にも丁寧に答え、高い学識を有していることをアピールした。以上の事より、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25年12月24日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降