

(続紙 1)

京都大学	博士 (理 学)	氏名	池田 侑平
論文題目	Edelstein effect and diode effect in noncentrosymmetric superconductors (空間反転対称性の破れた超伝導体におけるエーデルシュタイン効果およびダイオード効果)		
(論文内容の要旨)			
<p>空間反転対称性は物理学における基本的対称性の一つであるが、その対称性が自発的に破れた物質相は自然界に普遍的に存在する。そこでは数多くの異常な現象が起こり、マルチフェロイクス、スピントロニクス、非線形光学、トポロジカル相、磁性・多極子秩序など様々なトピックスにおいて調べられてきた。そのなかで代表的とされる現象が非対角応答や非相反応答である。電気、磁気、熱、弾性など様々な自由度が交差する応答は「非対角応答」と呼ばれている。また、右向きと左向きが非等価になる現象は「非相反応答」と呼ばれ、その多くは非線形な応答現象である。これらの研究は基礎研究と応用研究の両面から興味を持たれており、近年は空間反転対称性が破れた超伝導体を舞台とした研究も進展しつつある。</p> <p>このような背景の下、本学位論文において池田侑平氏は、空間反転対称性が破れた超伝導体に特有の非対角応答および非相反応答に関する理論研究を行った。本論文は主に2つの研究成果に基づいている。[1]一つはトポロジカルd波超伝導体における巨大な表面エーデルシュタイン効果に関するものであり、これは本学位論文の第2章で述べられている。[2]もう一つは超伝導ダイオード効果に対する不純物効果を調べたものであり、本学位論文の第3章で解説されている。以下において、各項目を要約する。</p> <p>[1] 電流が磁化を誘起する現象は理論的な予言を行ったエーデルシュタインの名前に由来してエーデルシュタイン効果と呼ばれている。エーデルシュタインの理論研究が行われた当初は大きく注目されることがなかったが、近年この現象を用いて電流による強磁性体の制御が可能になることがわかり、スピントロニクスの分野で注目を集め、盛んな研究が行われている。しかし、強磁性体のドメイン反転には巨大な電流が必要になるため、応用面ではジュール熱の発生が深刻な問題となっている。そこで、エネルギーロスがない超伝導電流を用いたエーデルシュタイン効果、すなわち超伝導エーデルシュタイン効果の研究が行われたが、その応答は一般に小さいことが問題とされている。本研究において池田氏は、d波超伝導体のトポロジカル表面状態を利用して通常より100倍程度大きなエーデルシュタイン効果をジュール熱ゼロで実現できることを示し、スピントロニクス分野の問題を解決する提案をした。</p> <p>[2] ある方向で電気抵抗がゼロとなり逆方向では有限となる現象は超伝導ダイオード効果と呼ばれている。約2年前の実験報告以来、超伝導ダイオード効果は国際的なホットトピックスとなっている。この2年間に数多くの理論研究が発表されたが、ほとんどがクリーン極限の超伝導体を対象にしているため、現実の物質では避けられない乱れの効果は未解明であった。池田氏は、乱れた超伝導体における超伝導ダイオード効果を微視的な理論により定式化し、クリーンな系で予言された符号反転現象が消失することを示した。また、符号反転現象の原因であるヘリカル超伝導のクロスオーバーを、符号反転が消失してもダイオード効果のピーク構造から捉えられることを示した。さらに、乱れによりダイオード効率が上昇することも示した。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

空間反転対称性は物理学における基本的対称性の一つであり、その対称性が破れた物質相の研究は物性物理学における重要課題である。特に、空間反転対称性の破れた物質が示す特異な応答現象は興味深い研究課題となっている。なかでも、電気、磁気、熱、弾性など性質が本質的に異なる自由度が結合する応答現象は総称として「非対角応答」と呼ばれている。また、外場の方向に依存する応答現象は「非相反応答」と呼ばれ、典型的には物質が右向きと左向きの外場に対して異なる応答が挙げられる。これらの応答現象の多くは空間反転対称性がある系では禁止されるものであり、逆にその存在により空間反転対称性の自発的破れを検出するプローブとしても有用である。さらに、近年の研究により、物質の量子力学的性質、特に量子幾何学的性質や量子力学的トポロジーと密接に関係した非対角応答や非相反応答現象が解明されたことにより、基礎科学的な興味が集まる研究対象となっている。このような背景のもとで、池田氏は超伝導体における非対角応答および非相反応答に関する2つの理論研究の成果を本学位論文にまとめている。以下では、それぞれの結果と意義について述べる。

第一に、池田氏は空間反転対称性が破れた超伝導体における非対角応答の代表例である超伝導エーデルシュタイン効果に関する研究を行った。エーデルシュタイン効果はスピン自由度を用いて物質の機能性を開拓するスピントロニクス分野の中心的課題の一つである。エーデルシュタイン効果を用いて強磁性体のドメインを制御できることからスピントロニクスメモリの基礎原理の一つとして期待されているが、応用に向けた課題として省エネルギー性が挙げられている。池田氏は、d波超伝導体に特有の平坦バンドを持つトポロジカル表面状態が大きな状態密度を持つことに着目し、それによる超伝導エーデルシュタイン効果を計算した。その結果、従来から知られているバルク物質のエーデルシュタイン効果より100倍程度大きな応答が得られることを示した。超伝導体の量子力学的トポロジーという近年大きな注目を集めたトピックスをスピントロニクス分野と結びつけるものであり、両研究分野の間に接点を与えた点にも本研究の意義が認められる。

第二に、池田氏は超伝導体に特有の非相反応答として大きな注目を集めている超伝導ダイオード効果に関する理論研究を行った。超伝導ダイオード効果とは、右向きの電流は超伝導性を示し、左向きの電流は金属性を示す現象である。超伝導体に特有のゼロ抵抗が一方向のみに観測されるため、電気抵抗比が無限大であり、その観点から理想的なダイオードとされ基礎科学と応用科学の両面で急速に研究が進んでいる。物性物理学の観点では空間反転対称性がない超伝導体が磁場下で示すヘリカル超伝導のプローブとしても期待されているが、先行する理論研究のほぼ全てがクリーン極限の超伝導体を対象としていたため、現実的な乱れのある超伝導体のダイオード効果は未解明であった。池田氏はグリーン関数を用いた超伝導ダイオード効果の定式化を行い、乱れた超伝導体への適用を可能にした。その結果からクリーン極限の超伝導ダイオード効果が幾つかの点で物質中の乱れにより変更を受けることを発見している。本研究は今後の当該分野における研究指針の一つとなることが期待され、重要な意義が認められる。

よって、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、令和5年1月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降