

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	佐藤 雄貴
論文題目	Quantum oscillations and charge-neutral fermions in Kondo insulator YbB ₁₂ (近藤絶縁体 YbB ₁₂ における量子振動と電荷中性フェルミオン)		
(論文内容の要旨) 強相関電子系の物理は、現代の固体物理学におけるホットトピックであり、理論・実験の両面から盛んに研究が行われている。強相関電子系においては多数の興味深い現象が観測されており、例として非フェルミ液体状態や非従来型超伝導などが挙げられる。なかには1電子近似のバンド理論では金属と予想されるものの、強い電子相関効果によってエネルギー・ギャップが開き絶縁体となる物質群があり、例えばモット絶縁体と近藤絶縁体がある。近藤絶縁体はおよそ半世紀にわたる長い研究の歴史があるが、最近の実験および理論的な研究の進展により、新たな展開を迎えている。佐藤氏は近藤絶縁体のひとつであるYbB₁₂において強磁場における電気伝導測定と磁気トルク測定、さらに極低温における比熱測定と熱伝導率測定を駆使し研究を行った。比熱と熱伝導率は低エネルギーの準粒子励起に対して敏感であり、系の基底状態を調べる上で強力なプローブとして知られている。 近藤絶縁体の最近の進展として、SmB₆において観測された磁化の量子振動が挙げられる。量子振動はフェルミ面の存在を直接的に示すものであるが、フェルミ面はいわば「金属の顔」で金属を特徴づけるものであり、本来絶縁体では観測されないものである。しかし量子振動の起源は試料表面という主張と試料内部（バルク）という主張がそれぞれあり、論争状態になっている。また、フェルミ面があれば低エネルギー励起においても金属的な振る舞いが期待されるものの、実験グループによって異なる結果が報告されている。理論的にも様々な提案がなされているものの、未だ明確な答えは得られていないのが現状である。したがって、近藤絶縁体の量子振動の起源を明らかにするためには、別の物質も含めた系統的な研究が求められる状況であった。 そこで佐藤氏はYbB₁₂における系統的な研究を行った。博士論文の題目にある「量子振動」の観測は第2章に記述されている。YbB₁₂はSmB₆と同様、近藤絶縁体の典型物質として知られている。SmB₆と同様にトポロジカル絶縁体状態が実現しているとして注目されたが、量子振動の有無などについての検証はなされていなかった。佐藤氏は米国ロスアラモス国立研究所においてパルス強磁場中における電気抵抗および磁気トルク測定を行い、両者において量子振動を観測した。特に電気抵抗における量子振動は近藤絶縁体において初めて観測されたものである。佐藤氏は量子振動の磁場角度依存性や放射光X線回折、さらに電気抵抗のシミュレーションなどにより、量子振動が不純物金属相に由来するものではなく、試料のバルク状態に由来することを明らかにした。さらに量子振動の詳細な解析から、量子振動の起源となる粒子がフェルミ統計に従い、強い電子相関によりその有効質量が大きく増強されていることを明らかにした。これらの結果はSmB₆の報告とは大きく異なるものであり、電子相関効果の重要性を顕著に示している。以上の結果を報告した学術論文において佐藤氏は筆頭著者ではないが、測定や解析において大きな貢献をしているため序章の一部として博士論文に記述されている。 博士論文の主題である「電荷中性フェルミオン」の観測は第5章に記述されている。YbB₁₂における低エネルギー励起、特に量子振動に寄与する粒子の存在を明らかにするため、佐藤氏は極低温における比熱および熱伝導率の測定を行った。佐藤氏は長時間緩和法による比熱測定システムを立ち上げ、微小試料の比熱測定を可能とし、			

熱伝導率測定システムについても最適化を行うことで極低温における熱輸送係数の高感度測定を可能にした。測定の結果、本来絶縁体ではゼロとなるはずの電子比熱係数ならびに残留熱伝導率がどちらも有限値をとること、さらに熱伝導率においては金属において期待されるウィーデマン-フランツの法則が破綻していることを明らかにした。これらの結果は熱を運ぶギャップレスでフェルミ統計に従う電荷中性の準粒子、「電荷中性フェルミオン」が存在することを示唆している。言い換えれば、 YbB_{12} は電気的には絶縁体であるものの、熱的には金属のように振る舞うことを意味している。佐藤氏は磁場中での比熱および熱伝導率の測定も行い、どちらも強い磁場依存性を示すことから、熱を運ぶ準粒子が磁場と強く結合していることを明らかにした。このことをさらに詳細に調べるために熱ホール効果の測定を行った。近藤絶縁体において電荷中性フェルミ粒子ならびにそれに伴う量子振動の出現を提唱する理論により電荷中性フェルミ粒子による熱ホール効果が提案されているが、観測されたホール信号の大きさは単純な理論予想の1 %以下であった。したがって現在のところ量子振動および電荷中性フェルミ粒子を説明する理論は無いのが現状である。

以上のように絶縁体における量子振動ならびに電荷中性のフェルミ統計に従う準粒子の存在は、いずれもこれまでの絶縁体の常識からは予想できない驚くべき現象であり、 YbB_{12} においては絶縁体とも金属とも区別することのできない不思議な電子状態が実現していることが明らかとなった。その起源は未解明であるものの、本成果は近藤絶縁体が電子相関に起因する絶縁体として、エキゾチックな性質をもつ新しい量子多体系であることを明らかにしたという点で重要である。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

強い電子相関効果によってエネルギー・ギャップが開き絶縁体となる近藤絶縁体は長い研究の歴史をもつが、最近の SmB_6 における磁化の量子振動の観測により新たな展開を迎えている。本研究で佐藤氏は、典型的な近藤絶縁体である YbB_{12} に着目し、その超純良単結晶に対し強磁場における電気抵抗および磁気トルクの測定、さらに極低温における比熱および熱伝導率の測定を系統的に行った。その結果、電気抵抗および磁気トルクにおいて量子振動を観測し、本来絶縁体ではゼロとなるはずの電子比熱係数および残留熱伝導率が有限値を取ることを明らかにした。これらの結果は絶縁体にも関わらず金属のようにフェルミ面が存在し、さらに熱を運ぶ電荷中性のフェルミ粒子が存在することを示唆している。

電子が強いクーロン斥力で相互作用する強相関電子系の研究は、現代物理学における中心課題の一つである。フェルミ面の存在は金属の特徴であり、絶縁体には存在しないことが従来の常識であった。本論文の結果である絶縁体における量子振動の観測および電荷中性フェルミオンの存在は、従来の絶縁体の常識からは予見できない現象であり、その学術的価値は高く、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3年1月15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