

論文審査の結果の要旨

氏名 秋葉 和人

物質のバンド構造は磁場中でランダウ準位に量子化される。その中でも半金属ではキャリアの有効質量が小さいため、ランダウサブバンドのエネルギー間隔が磁場によって大きく変化させることができる。最低エネルギーのランダウサブバンドのみがフェルミ準位を過ぎる量子極限は、一般的な金属では 10000T 級の実現困難な磁場が求められるのに対し、半金属では 100T 以下の磁場で実現できることから、磁場制御による新規電子相の発現が期待される。本博士論文では、金属-絶縁体近傍に位置する電子構造を持ち、圧力及び磁場でその物性制御が現実的に可能となる 2 種類の物質 (黒燐及び PbTe) に着目し研究を行った。理論的研究から、強磁場中に置かれた半金属は、励起子絶縁体相を実現することが期待されており、黒燐はその絶好の舞台となる。また、PbTe はトポロジカル結晶絶縁体相に隣接する電子構造を持つため、圧力・磁場下で新規トポロジカル相の実現が期待される。これらの物質を対象に、磁場印加で抵抗、磁化率、及び超音波に生じる量子振動を精密に測定し、詳細な解析結果をもとに議論した結果が、以下の構成でまとめられている。

第 1 章では、本研究の背景として、小さなエネルギーギャップを持つ半導体、及び微量なキャリアを有する半金属の金属-絶縁体近傍の電子相で発現が期待されるエキゾチック電子状態 (特に励起子絶縁体とトポロジカル量子相) について紹介している。

第 2 章では、本研究の主な実験手法が解説されている。圧力及び磁場を印加しつつ測定する電子輸送測定の具体的手法、また、パルス磁場を用いた実際状況、及びそれによって得られる物性値 (抵抗、磁化率、超音波測定) の解析方法が丁寧に記載されている。

第 3 章では、研究対象である黒燐に関する結晶構造やバンド計算、ホール係数等の基礎物性が紹介されている。また、本研究でも取り組む圧力下での金属転移に関する先行研究を紹介し、それらを踏まえた本研究の課題と方向性が明記されている。

それに続き、黒燐を用いて得られた本実験の結果と、それへの解釈及び議論がなされている。黒燐は、Z 点で 300meV 程度の小さな直接ギャップ構造を持つ半導体である。加圧に伴ってこのギャップは減少していき、約 1.5GPa で金属転移を示す。本研究では、圧力セルを用いて最高 2.4Gpa まで圧力を試料に加えつつ、磁場下で生じるランダウ量子化に伴う物理量の振動を詳細に観察した。まず金属転移前の圧力下でも比抵抗に量子振動が見え、その起源として、ランダウ準位の間隔とフォノンエネルギーが一致することで生じる磁気フォノン共鳴だとして解釈を与えた。より圧力を印加して発現する金属状態で同様の磁場依存性を見ると、少量キャリアの電子・ホールバンドを持つ半金属に

由来して、抵抗に振動が見られた。この物質で初めての報告例である。圧力下の半金属状態で高磁場を印加すると、励起子絶縁体の発現が理論的に予想されている。その検証を試みた結果、最低温で磁場と共に抵抗値が上昇し、その温度変化も絶縁体的な振る舞いとなった。しかし、絶縁性は高くなく、半金属が持つ2種類のキャリアを起源とする自然な振る舞いとして解釈できることを議論している。

第4章では、PbTeの基礎物性に続いて、本研究の実験結果及びそれに対する議論がなされている。PbTeではPbサイトにSnを置換することで、s軌道とp軌道にバンド反転が生じ、トポロジカル結晶絶縁体となる。またその置換過程のある組成では、Dirac点を持つ特徴的なバンド構造となることが予想されている。磁場下での抵抗における量子振動を測定したところ、その周期に2成分あることが分かった。2成分目は第一成分の2倍周期であることから、同じフェルミポケットに由来する振動と考えられるが、一方で、2成分目の強度が第一成分を上回る特異性が見出された。この現象は、Lifshitz-Kosevichの式を用いて、ゼーマン・サイクロトロン比(ZC比)が0.5の際に再現されることを議論した。また、ZC比を正確に導出するためには、先行研究にないほどに精密な量子振動測定が必要であることを様々な解析結果をもとに裏付けている。Diracバンドを有する際にはZC比が1となるため、トポロジカル量子相の確定にとってもZC比がその同定に決定的な指標となる。本研究で示すZC比の精密な同定手法は、今後様々な物質のバンド評価に利用されることが期待される。

第5章では、本博士論文の総括と、本研究を通して新たに見えてきた課題、及びそれらを解決する実験方法が具体的に提案されている。

本研究は、比較的小さなギャップを持つ半導体の黒燐と、少数キャリアをもつ半金属であるPbTeを具体的対象として、圧力と磁場で電子構造を制御し、励起子絶縁体やトポロジカル量子相を創発する試みで、抵抗、磁化率、超音波測定を精密測定及び解析した成果を議論している。黒燐では世界で初めて金属化させた状態で量子振動を観測し、また、PbTeではDiracバンドやトポロジカルバンドを同定する上での有力な指標となるゼーマン・サイクロトロン比を精密に同定する手法を見出した。どちらも、実験手法を駆使して、先行研究を凌駕する精密測定を成し遂げたことで得られる成果であり高く評価できる。本研究結果は、金属-絶縁体近傍に位置する様々な物質群を制御する上で指針を与えており、物性科学に大きく寄与すると期待される。

なお、本論文は徳永将史、伏屋雄紀、新井隼人、上床美也、松林和幸、赤浜裕一、三宅厚志、吉澤正人、中西良樹、鷹岡貞夫、花咲徳亮、坂本拓也、片山敬介、酒井英明、の各氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって計画し実験と解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。