

論文審査の結果の要旨

氏名 末次 祥大

近年の物理学において、固体中の電子状態が有するトポロジカルな性質に起因する様々な現象が、強い関心を集めている。ディラックコーン型の線形分散を持つ二つのエネルギーバンドが波数空間の一点で接触する（質量ゼロの）ディラック電子系はその一例で、グラフェンを代表とする2次元電子系を舞台に著しく研究が進展した。一方、3次元的なディラック電子系の例は少なく、比較的未開拓な分野である。末次祥大氏による本論文は、小さなギャップを持つ3次元ディラック電子系の候補物質であるアンチペロブスカイト化合物 Sr_3PbO について、試料合成と基礎物性評価、および磁気輸送現象や核磁気共鳴（NMR）の測定を行い、この物質が実際に3次元ディラック電子系であること、およびカイラル異常や巨大軌道反磁性などその顕著な性質の検証について報告したものであり、全5章と4つの付録から成る。

第1章の背景説明では、固体中のディラック電子の起源や一般的な性質、特にベリ一位相に起因する磁場中の特異な輸送現象や巨大軌道反磁性について述べられている。第2章では、本研究の対象物質であるアンチペロブスカイト化合物 Sr_3PbO の結晶構造やバンド構造について説明されている。続く第3章では、単結晶育成の方法と本研究で用いられた実験方法、特に Pb^{4+} という極度に還元されたイオンを含むために試料が酸化されやすく、試料を大気に晒すことなく全ての測定を行う必要があることが述べられている。

第4章が本論文の中心をなす実験結果および議論の部分であり、4つの節より成る。第1節では、作成した複数の試料についてホール係数からキャリア密度を評価し、それぞれの試料のフェルミ準位が、線形分散が小さなギャップをもって最接近するディラック点からどの程度離れているかを決定した。以後、磁気輸送現象の実験においては、主としてキャリア密度が最も低く、フェルミ準位がディラック点に最も近い試料が使われた。第2節では、磁場に比例する大きな横磁気抵抗や、Pb原子核の核磁気緩和率の温度依存性に現れるクロスオーバーの観測から、この物質が実際に3次元ディラック電子系であることを確立し、さらにシュブニコフ・ド・ハース振動によってディラック点近傍のフェルミ面を観測したことが述べられている。

第3節では、ディラック電子系に対して理論的に予言されているカイラル異常（負の縦磁気抵抗）の検証が試みられた。カイラル異常の存在を示唆する結果は得られたものの、この効果によって試料中を流れる電流が磁場に平行な経路に集中するために、極めて不均一な電流分布が生じる電流ジェット効果が障害となり、実験結果の完全な理解には至っていない。このためカイラル異常の定量的な検証は今後の課題として残されている。

第4節では、Pb原子核のNMR実験により巨大軌道反磁性を微視的に検証することが試みられた。バルクの磁化測定には、正のスピンの磁化率と負の軌道磁化率が両方含まれるが、NMRでは核磁気緩和率からコリンハの関係式に基づいてナイトシフトのスピンの成分を評価するこ

とが可能である。このようにして軌道反磁性に起因する負の内部磁場を定量的に検証することに初めて成功した。特に、キャリア濃度の異なる試料に対するナイトシフトの測定結果から、フェルミ準位がディラック点に近づくにしたがって、軌道反磁性による負の内部磁場が著しく増大し、理論的な予測と整合することを見出した。また反磁性電流が原子核位置に作る内部磁場の大きさは、電子ガスモデルの計算値より二桁近く大きいことから、この物質の軌道反磁性には伝導バンドを形成する Pb 原子の p 軌道が寄与していることが示唆された。

第 5 章は本研究の要約と将来の課題に充てられている。

以上のように、本論文はアンチペルブスカイト化合物 Sr_3PbO が 3 次元ディラック電子系を有することを強く示唆する結果を多角的な実験から得ることに成功し、カイラル異常や巨大軌道反磁性の解明に貢献した。特に NMR の利点を生かしてフェルミ準位がディラック点近傍にある場合の軌道反磁性の顕著な増大を微視的かつ定量的に検証した結果はこの分野の進展に寄与するものであり、審査委員一同、学位論文として相応しいと判断する。なお、本論文の第 4 章は、葉山慶平、Andreas W. Rost、苅宿俊風、小形正男、高木英典、Jiyeong Kim、Jurügen Nuss、Claus Mühle、北川健太郎の諸氏との共同研究を含むが、論文提出者が主体となって実験および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した。従って博士（理学）の学位を授与できると認める。