

審査の結果の要旨

論文提出者氏名：増田 英俊

近年、磁気秩序とディラック電子のカップリングに起因した新奇な量子輸送特性が大きな注目を集めており、超省エネ・高機能スピントロニクスへの応用展開が期待されている。しかしながら、ディラック電子と磁性がカップルしたバルク物質を得るための設計指針は確立されておらず、磁性ディラック電子系物質の報告は非常に限られていた。本論文では、Bi 正方格子を含む多層ディラック電子系 $AMBi_2$ ($A = Sr, Eu, M = Mn, Zn, Cd$) に着目した物質開拓と単結晶育成を進め、新奇な磁性誘起バルク量子ホール効果や、擬 2 次元的なディラック電子に由来するランダウ準位のスピン分裂の観測に成功した。さらには $EuMnBi_2$ における磁場印加による磁気構造の変化と系の 2 次元性の増大の起源に関する理解を深めるべく、量子振動の解析や X 線磁気共鳴散乱・中性子散乱に基づいた議論を行った。本論文は 8 章から構成されており、以下にその概要を述べる。

第 1 章では、本研究の背景としてディラック電子系や磁性トポロジカル物質が示す量子輸送現象・磁気輸送現象についての先行研究、第 2 章では、本研究で用いた合成・測定手法と第一原理計算の手法についてそれぞれ記述している。

第 3 章では、本論文で紹介する $AMBi_2$ の構造や基礎物性についての説明がなされている。

第 4 章では、 $EuMnBi_2$ において見いだされたパルス強磁場下における特異な磁気輸送現象についてまとめられている。 $EuMnBi_2$ の大型単結晶に対して強磁場下の詳細な磁化・輸送特性の評価を行い、Eu スピンが 22 K 以下で反強磁性秩序を示すこと、さらに c 軸方向の磁場を印加すると $H=5.4T$ 近傍でスピントロニック転移を示すと同時に層間抵抗率が約 10 倍に及ぶ急激な増大を示すことを見出した。さらにスピントロニック相において面内・層間抵抗率の巨大な量子振動やホール抵抗率の量子化を観測し、これらの現象が Bi 正方格子上のディラック電子によるバルク多層量子ホール状態の実現を反映したものであることを明らかにした。

第 5 章は、第 4 章で見いだされた新奇なバルク量子ホール効果の起源解明を念頭に議論が進められている。第 1 節では、 $EuMnBi_2$ に対して共鳴 X 線磁気回折、単結晶中性子回折の測定を行い、ゼロ磁場、磁場中における Eu および Mn 副格子の反強磁性的な磁気構造を明らかにした。さらに磁場中スピントロニック相においては、Eu スピンが a 軸または b 軸に平行な方向に再配列した磁気ドメインを形成していることを示した。第 2 節では、層間抵抗率における SdH 振動の詳細な解析と、第一原理計算の結果に基づき（阪大越智氏との共同研究）、反強磁性相とスピントロニック相におけるディラック電子のバンド構造やランダウ準位の構造の違いを明らかにした。第一原理計算と SdH 振動の比較を行ったところ、Eu の反強磁性秩序に伴うバンドの折り返しにより、2 つのディラック電子バンドが形成され、反強磁性相では最高価電子バンドだけが擬 2 次元的なフェルミ面を形成していることが明らかになった。スピントロニック相においては、対称性の低下に伴って 2 つのディラック電子バンド間の混成反発が増大することで最高ホールバンドの面間方向の分散が弱くなることが示唆され、これがスピントロニック相における高い 2 次元性の起源である可能性を提案した。スピントロニック相では 2 次元性の増大により、最高ホールバンドが形成する 1 次元ラ

ランダウサブバンドの幅が減少する。その結果ランダウサブバンド間に量子ホールギャップが誘起され、バルク多層量子ホール状態が実現していると結論づけた。

第6章では、 EuMnBi_2 において ~ 35 T以下の傾斜磁場下の層間抵抗率の測定を行い、擬2次元的なディラック電子に由来するランダウ準位がスピン分裂を示すことを見出した。磁場の傾斜角とともに磁場角度とともにゼーマン-サイクロトロンエネルギー比が変化することを反映し、層間抵抗率におけるSdH振動の振幅が強い角度依存性を示す。SdH振動が位相反転を示す角度から有効 g 因子が見積もられる。この有効 g 因子の大きさが、反強磁性相とスピントロニック相において50%程度異なることを見出した。この振る舞いはEuスピンの相互作用による交換分裂に由来することを、第一原理計算の結果に基づいて提案した。

第7章では、 EuMnBi_2 における局在スピンとディラック電子の間の適度な相互作用に関して、定性的な議論を行っている。この系のスピントロニック相における移動度は $14000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と見積もられたが、これはバルクの磁性ディラック電子系の中でも圧倒的に高いものである。この原因として、磁性を担うEuサイトとディラック電子を担うBiサイトが空間的に分離しているために両者の相互作用が適度に弱いこと、Biの p 軌道に由来する共有結合性のバンドがディラック電子を形成していること、の2点が重要であると提案した。また、スピントロニックによる2次元性増大の機構として、反強磁性秩序によるディラック電子バンドの折り返しと、磁気構造の変化による対称性の変化が重要である可能性を提案した。

以上をまとめると、本研究ではBi正方格子層と磁性層が交互に積層した多層ディラック電子系の新規合成と磁場下における量子輸送現象の詳細な解析を進めたことで、磁性誘起バルク量子ホール効果の発見に至り、さらに量子振動の詳細な解析を第一原理計算の結果とすり合わせることで、そのメカニズムの解明に迫った。

本研究成果は、近年の磁性ディラック電子系研究の潮流において非常に重要な位置を占めるものであり、物性科学・物理工学の発展に大きく寄与すると期待される。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。