

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 下出 敦夫

固体電子における相対論的スピン軌道相互作用は従来副次的な役割しか果たさないと考えられてきたが、近年のスピン트로ニクス研究の進展等に伴い、数々の現象で本質的な役割を果たすことが認識され、応用上も重要なテーマとなってきた。**Datta-Das** のスピントランジスター、スピンホール効果、マルチフェロイックスなどがその具体例である。一方、磁性の分野では、スピン軌道相互作用は磁気異方性や弱強磁性の発現などに現れることが知られてきたが、最近の発展は特にその量子輸送現象における役割が明らかになってきたことである。これらの背景の下、下出氏はスピン軌道相互作用と磁性の協奏現象に着目し、その中での 1. 量子ドットスピン系における電場による動的スピン制御、と 2. 金属強磁性体の異常ホール効果における非弾性散乱効果、の 2 つのテーマについて理論的な研究を行い、以下の顕著な成果を得た。

1. については、2 スピンが相互作用するダブル量子ドット系において、磁場を全く使わずにすべての量子演算を行う方法を提案した。2. については、異常ホール効果において従来理論的にはほとんど調べられてこなかった弾性散乱と非弾性散乱の役割の違いを明らかにし、最近実験で経験的に提出された新しいスケーリング則の起源を明らかにした。

本論文は英文によって執筆され、以下の 4 章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第 1 章は、導入として、スピン軌道相互作用の基本、磁性と伝導に関する簡単なまとめ、スピン軌道相互作用と磁性が協奏する 5 d 遷移金属酸化物、半導体量子ドットの概略、異常ホール効果の導入、を行っている。

第 2 章は、ダブル量子ドット系における 2 つのスピンの電場による制御の理論に充てられている。1 節では、モデルの構成について、2 節では摂動論と数値計算による解析、3 節では緩和の効果の検討、4 節では実験での実現可能性の考察、5 節はまとめ、について述べられている。2 つのスピン  $1/2$  を記述するハミルトニアンは、磁場がないとすると 2 スピン間の相互作用のみを含む。具体的には、交換相互作用と、ジャロシンスキー・守谷相互作用である。これらの相互作用を時間変化させると 2 スピン系の量子状態を変化させることができ、量子演算の設計ができる。交換相互作用を適当に時間変化させると XOR 操作ができることが知られていたが、その他の操作のためには磁場をかける必要があると考えられてきた。これに対して、本研究では交換相互作用に加え、ジャロシンスキー・守谷相互を時間変化させることで、すべての量子演算が可能であることを示している。その基本的アイデアは、演算子間の交換子から種々の演算子を作り、それから任意のユニタリー演算子を作り出す、というものである。この考えに基づき、具体的な操作として演算ごとにと

のように相互作用を時間変化させればよいかを示し、その有用性を数値的にも実証している。そして、現実の系で、この提案が実装される条件を検討し、具体的な系の設計までを行っている。

第3章は、有限温度における異常ホール効果の統一理論、について述べられている。1節はモデルの構築、2節は計算結果の提示と解析、3、4節は、2節の結果に基づきそれぞれ内因性の寄与と外因性の寄与の温度依存性について述べられ、5節はまとめに充てられている。金属強磁性体における異常ホール効果は、スピン軌道相互作用が引き起こす現象であることが古くから知られていたが、バンド構造に基づく内因性機構と不純物散乱による外因性機構の両者が提案され、理論的には混乱した状況が続いていた。近年、内因性機構がベリー位相という観点から明快に理解され、詳細な第一原理計算との比較から、この機構による異常ホール効果の存在が通常の金属伝導領域において確立された。ところがこれらは低温領域に限った話であり、弾性散乱のみが効いている場合の議論であった。有限温度では非弾性散乱が生じるので、これが異常ホール効果にどのような影響を与えるか、が現在の理論研究の焦点であった。この問題に対して、本論文では、外因性機構と内因性機構の両者を含む最も簡単なモデル（s軌道とp軌道からなるスピン完全分極した2次元タイトバインディングモデル）を構築し、非弾性散乱を電子の自己エネルギーとして、弾性散乱をランダムな原子配置によって、それぞれ記述し、数値計算によってホール伝導度を評価する、という研究を行った。その結果、外因性機構によるホール抵抗は、弾性散乱のみに依存し、これから外因性ホール伝導度は非弾性散乱によって急激に抑えられるのに対して、内因性機構によるホール伝導度は、弾性散乱・非弾性散乱両者に対してあまり依存しない、という結論を得た。これらの違いは、トポロジーにより保護された内因性機構の特性と、不純物弾性散乱による外因性機構の起源によるものであると理解された。また、数値計算結果は、最近実験で見出されている新しいスケールリング則をほぼ再現していることも見出された。

第4章は、全体のまとめと今後の研究の方向について述べられている。

以上本論文は、スピン軌道相互作用と磁性の関わりに関する上記2つのテーマについて、理論の立場から実験を意識した最前線の研究を行い、新たな側面を見いだしたものであり、本研究の成果は今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

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。