

論文題目：Topological nature of quantum transport phenomena in magnets
(磁性体に於ける量子輸送現象の位相幾何学的性質)

論文の要旨

強相関電子系における磁性と量子輸送現象の問題を、「磁性秩序相での磁気ブロッホ電子が(一般化された)波数空間でつくる位相幾何学的な構造」という観点から理論的に研究した。具体的には(1)異常ホール効果、(2)電気磁気効果、(3)交流電磁場誘起スピン流という三つの現象を調べ、波数空間における磁気単極子が重要な役割を果たしていることを見出した。

論文提出者氏名 進藤 龍一

高温超伝導体やマンガン酸化物の巨大磁気抵抗の発見以来、磁性と電気伝導、誘電性の関連に注目が集まっている。磁氣的性質と、電氣的性質の相関はこれらの物質群に限らず普遍的に存在しているものであるが、ランダウに始まる現象論はあるものの、その微視的理論による理解は驚く程進んでいないのが実情である。本研究は、磁性体におけるブロッホ電子のベリー位相という概念に着目し、その波数空間における位相幾何学的な構造を明らかにするとともに、それが物性にどのように現れるかを系統的に調べた仕事である。

本論文は5章と付録からなる。

第1章では、導入として、ホール効果、強磁性体における異常ホール効果、磁気電気効果など、本研究がターゲットとする物理現象の概略と過去の仕事がまとめられた後、固体中のブロッホ電子のベリー位相、ファイバー束などの基礎概念が記述されている。

第2章では、代表的なフラストレーションスピン系である $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$ などの fcc 格子上的反強磁性体における磁気秩序と電子の軌道運動の研究が述べられている。 $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$ では、格子構造からくるフラストレーションの為、低温で非共面的反強磁性秩序を示し、いわゆるスピнкаイラリティーを持つ。この系では、(I) 異常ホール抵抗が低温に向けて残留する他、(II) ネール温度より更に低温で格子が自発的に歪み、それに伴い強磁性磁化が発生することが知られている。本章では、スピнкаイラリティーが実空間で存在する場合、磁気ブロッホ波動関数を使って定義される仮想磁束:

$$\begin{aligned}\vec{B} &= i\nabla_{\vec{k}} \times \langle u_M | \nabla_{\vec{k}} | u_M \rangle, \\ \nabla_{\vec{k}} &= \left(\frac{\partial}{\partial k_x}, \frac{\partial}{\partial k_y}, \frac{\partial}{\partial k_z} \right), \\ |u_M\rangle &: \text{磁気ブロッホ関数の周期部分}\end{aligned}$$

が、エネルギーバンドの縮退点をその涌き出し口や吸い込み口(磁気単極子)としながら、結晶波数空間上に非自明な構造を持った流れを作りだすことが示されている。更にこの波数空間上の仮想磁束の分布を通して、この系の物性が議論されている。等方的な fcc 格子からの一軸性歪みによる対称性の低下に伴って、(I) 上記の仮想磁束が波数空間で発生し、(キャリアドープでの) 自発(ゼロ磁場)ホール効果や母物質モット絶縁体での巨大光カー効果を引き起こされること、又、(II) 磁気ブロッホ電子の軌道強磁性が発生することが結論されている。又工学的応用として、室温以上で同様の反強磁性秩序を示す $\gamma\text{-FeMn}$ 合金における、一軸性圧力による巨大な光カー回転の提案がなされている。

第3章では、巨大なトポロジカル電気磁気効果に関する研究が述べられている。スピンの構造に依存した磁気ブロッホ電子の電気分極への寄与を調べ、その位相幾何学的な構造を検討することで電気磁気効果を巨大にする可能性、およびサイクリックな磁場変調による電荷ポンピングの可能性について論じている。磁化の変化に伴うブロッホ電子の空間的変位は、磁化の変分 $\delta\varphi$ と結晶波数で張られる面上で定義されるベリーの曲率により表現される。この視点に立って巨大な電気磁気効果のメカニズムを考案し、いくつかの具体的なモデルを提案した。それらは、

- s 軌道のみからなるタイトバインディング模型にスクリュースピン構造の平均場を導入し、一つの磁気副格子の平均場磁化を変形させることで、価電子バンドの磁気ブロッホ電子の変位を引き起こすという模型、と
- 5つの d 軌道からなるタイトバインディング模型にキャント反強磁性構造を平均場として導入し、平均場の全磁化の変分が、on-site のスピン軌道相互作用を通じて、ブロッホ電子の空間的変位を引き起こすという模型

である。これらの模型で我々は、三次元の一般化された波数空間の中でバンドの交差する点 (2重縮退点) が仮想磁束の吸い込み口あるいは湧き出し口になるという事実を積極的に活用している。これを用いると、従来のスピン-格子結合に基づいた電気磁気効果の微視的理論から予想される電気分極の大きさと比べると、 10^4 倍から 10^5 倍に及ぶ巨大な電気分極が発生することが提案されている。

第4章では、交流電磁場により誘起されるスピン流に関する研究が述べられている。磁性体 Cu-benzoate や Yb_4As_3 (低温相) などの $S = 1/2$ の量子スピン鎖を具体的に取り上げ、これらの系での交流電磁場誘起の量子スピンポンピングの可能性を議論した。これらの擬一次元系では、スピン鎖を構成する磁性イオンを囲む陰イオン (結晶場) が、ジグザク構造を形成しているが、十分低温までスピンに関する物性が臨界的な振るまいを示すことから、等方的な一次元ハイゼンベルグ模型で記述されることが知られている。しかし、そのジグザク構造をした結晶場の為に、(I) g テンソルの交番成分が許される他、(II) 外部から電場を印加して空間反転対称性を完全に破ると、ボンド交替が系に引き起こされる。(I) の結果としては、外部磁場をかけることで、有効交番磁場が系にかかり、臨界的な基底状態にスピギャップ (基底状態は反強磁性状態) が誘起される。また (II) の結果としては、外部電場によってスピギャップ (基底状態はダイマー状態) が誘起されることになる。この電磁場で張られる2次元のパラメータ空間で臨界的な基底状態 ($E = H = 0$) を囲うようなループに沿って系を一周させる過程で、 $\frac{\mu_B}{\alpha^2}$ (但し μ_B はボーア磁子) に量子化したスピン流が系に流れることを解析的および数値的に示した (交流電磁場誘起スピン流)。

付録では、本論文を理解するために有用な補足として、異常ホール効果に対する近藤理論 (1)、論文中に現れる行列要素の計算 (2、3、4)、サインゴルドン理論の詳細 (5)、が述べられている。

以上をまとめると、本論文は、磁性体における磁気ブロッホ電子が波数空間でつくる位相幾何学的構造を明らかにし、その量子輸送現象、電気磁気効果、スピン輸送における役割を論じた。これらは、従来現象論的理解に留まっていた磁性と電気的性質の相関に対して、微視的理解をする上で重要な一歩であり、関連した諸効果を巨大化させるための指針を与えるものである。よって、今後の物性物理学、物理工学に寄与するところ大であると判断し、本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認める。