

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	有効場の理論によるトポロジカル物質の解析
Title(English)	Effective Field Theory to Topological Materials
著者(和文)	網谷達也
Author(English)	Tatsuya Amitani
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第207号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:西田 祐介,村上 修一,古賀 昌久,石塚 大晃,打田 正輝
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第207号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	網谷 達也		
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	西田 祐介	教授	審査員	打田 正輝	准教授
	審査員	村上 修一	教授			
		古賀 昌久	准教授			
		石塚 大晃	准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Effective Field Theory to Topological Materials」と題され、量子ホール系やワイル半金属といったトポロジカル物質の普遍的な性質、特に電磁場に対する応答を、有効場の理論に基づいて理論的に解明することを目的としており、6章と付録から構成されている。

第1章「Introduction」では、本論文の背景となる基礎的事項について述べている。まず、本論文の目的がトポロジカル物質の普遍的な応答を解明することであり、そのために有効場の理論が有用であることを述べている。次に、トポロジカル物質の代表例である量子ホール系の歴史的背景を述べた後、量子ホール系がホール伝導率だけでなくホール粘性も持つこと、それがトポロジカルな性格を有し、特定の値に量子化されることを述べている。また、トポロジカル物質の別の例であるワイル半金属についても概観し、それが軸性異常のような相対論的效果や、カイラル磁気効果のような異常輸送現象を研究する舞台になることを述べている。最後に、本論文の構成と記法について説明している。

第2章「Review of low-energy effective theories」では、低エネルギー有効理論についてレビューしている。まず、量子ホール系で重要になるチャーン・サイモンズ項とウェン・ジー項を導入し、それぞれホール伝導率とホール粘性に対応することを述べている。また、ワイル半金属の有効理論を格子模型から導出し、それが質量ゼロのディラック粒子になり、軸性異常が現れることを詳しく説明している。特に、物理的な電流を得るためには、共変的な電流にチャーン・サイモン電流の寄与を加える必要があることを述べている。さらに、ワイル半金属の非平衡ダイナミクスを記述する方法としてカイラル運動論を導出し、軸性異常と関連して、カイラル磁気効果やカイラルプラズマ不安定性が生じることを示している。

第3章「Quantum Hall systems」では、ガリレイ不変性を持つ量子ホール系を考え、その有効理論と非線形応答についての研究成果を報告している。まず、ニュートン・カルタン時空に置かれた微視的作用を考え、それをゲージ場や計量で変分することによって、電流、エネルギー流、運動量、応力テンソルが得られること、さらに、ゲージ変換や一般座標変換に加え、ミルン・ブーストのもとでも作用が不変であることを示している。その上で、これらの不変性を満たす有効作用を微分展開の1次までの次数で構築し、この有効作用を変分することで、電流、エネルギー流、応力テンソルの間に成り立つ普遍的な関係を導出している。特に、ホール伝導率が有限振動数における縦伝導率を決めること、ホール粘性が有限波数におけるホール伝導率だけでなく非線形の電熱伝導率にも寄与することが、本章で明らかになった主要な結果である。

第4章「Weyl semimetals from low-energy effective field theory」では、低エネルギー有効場の理論によるワイル半金属の電磁応答についての研究成果を報告している。まず、パウリ・ヴィラス正則化を用いて、電磁場中の電流の表式を導いている。その上で、時間変動する一様な磁場がその方向に電流を誘起することを示し、動的カイラル磁気電流と呼んでいる。特に、パルス磁場を印加した際の電流の時間発展の様子を示し、フリーデル的な振動が生じることを指摘している。

第5章「Weyl semimetals from chiral kinetic theory」では、カイラル運動論によるワイル半金属の電磁応答についての研究成果を報告している。まず、電荷の保存則を満たす緩和時間近似について説明し、それを用いて電磁場中の電流の表式を導いている。さらに、その電流をマクスウェル方程式に代入し、低振動数・長波長における集団励起の分散関係を導出している。特に、カイラリティに不均衡のある場合には、電磁場が指数関数的に増幅する不安定性が生じること、それはワイル点の分裂の方向に伝播することが、本章で明らかになった主要な結果である。

第6章「Summary and outlook」では、有効場の理論を量子ホール系やワイル半金属に適用し、これらのトポロジカル物質の普遍的な性質、特に電磁場に対する応答を解明する研究を行ったことを述べ、これまでの各章で得られた主要な研究成果についてまとめている。また、今後研究を発展させる様々な方向性について述べるとともに、有効場の理論に基づく本論文の結果は特定の物質ではなく広く適用可能であること、さらには、相対論的效果を通して高エネルギー物理の理解も深め得ることを述べ、結論としている。

最後に付録は8章あり、本論文に関連する補足的事項について説明している。

以上のように、本論文は、量子ホール系やワイル半金属といったトポロジカル物質の普遍的な性質、特に電磁場に対する応答を、有効場の理論に基づいて理論的に解明したものである。ここで明らかにされた普遍的な性質は、今後の実験的研究につながる可能性もあり、該当分野の発展に大きく寄与することが期待され、その学術的価値は高く評価できる。従って、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値があるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東京科学大学リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。