

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ディラック電子の特異な輸送現象
Title(English)	Theory of singular transport of Dirac Fermions
著者(和文)	野呂昌生
Author(English)	Masaki Noro
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9381号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:村上 修一,安藤 恒也,斎藤 晋,西田 祐介,河野 行雄
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9381号, Conferred date:2014/3/26, 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	野呂 昌生
論文審査 審査員		氏 名	職 名	
	主査	村上 修一	教授	西田 祐介
	審査員	安藤 恒也	教授	
		斎藤 晋	教授	
		河野 行雄	准教授	

論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文は「Theory of singular transport of Dirac Fermions(ディラック電子の特異な輸送現象)」と題し、7 章と 5 つの付録よりなる。

第 1 章「Introduction」ではグラフェンのバンド構造の特異性と輸送現象に関するこれまでの研究について解説を行っている。グラフェンのバンド構造に見られる、ディラックコーンと呼ばれる線型分散のバンドに関する研究背景を説明した後、ディラックコーンに起因する種々の特異な現象について説明している。特に最小伝導率の問題およびそれに関する不純物散乱についての研究、また帯磁率やホール伝導率についても言及し、本論文の全体を概観している。

第 2 章「Background」では、グラフェンやトポロジカル絶縁体についての先行研究のうち本博士論文に関係の深いものについて解説を行っている。まずグラフェンを記述するハミルトニアンおよびバンド構造の導出を行い、また同様にディラックコーン状のバンド構造を持つトポロジカル絶縁体表面についても解説している。さらにこうしたディラックコーンにギャップが開いた場合のホール伝導率の計算について、自己エネルギーが定数で頂点補正を無視するという簡単な場合について説明している。

第 3 章「Conductivity in graphene with long-ranged impurities」では、self-consistent Born 近似に基づいてグラフェンでの伝導率の計算を行っている。ここでは特にポテンシャルの到達距離が比較的長い不純物を考えており、そのため従来の研究での短距離型不純物に比べて計算がかなり複雑になる。これについて対称性の考察により自己エネルギーや頂点補正の表式の単純化を行って定式化を行い、ガウス型とクーロン型の 2 種の長距離型不純物に対して数値計算の結果を得ている。その結果従来の短距離型不純物と異なり、フェルミエネルギーに対して定数に漸近せず増加していく伝導率の振る舞いが得られ、これは実験でのゲート電圧依存性とよく符合している。またフェルミエネルギーがディラック点にあるときの伝導率（最小伝導率）は、短距離型不純物の場合と異なりもはや普遍量とならず不純物に依存することが明らかになった。これは、短距離型不純物を仮定すると従来の理論と実験結果との間での食い違いがあるという「最小伝導率の問題」に一つの解決を与える重要な結果である。

第 4 章「Susceptibility in graphene with long-ranged impurities」では、第 3 章と同様に長距離型不純物の存在化での帯磁率を定式化し、数値計算を行っている。特に、従来の短距離型不純物の場合には系が清浄な極限（クリーンリミット）でボルツマン近似と呼ばれる半古典的近似に漸近するが、長距離型不純物ではそうならないことを明らかにしている。これは前章で示した伝導率のみならず、帯磁率までも不純物ポテンシャルの到達距離に敏感に依存しており、到達距離を計算で取り入れることの重要性を示している。

第 5 章「Hall conductivity in graphene with long-ranged impurities」では、長距離型不純物の存在化でのホール伝導率を計算している。不純物散乱の存在下で、弱磁場極限のホール伝導率の計算の定式化を行い、種々の頂点補正を含む 4 角形や 5 角形のファインマンダイアグラムに帰着されることを示している、またホール伝導率がどのように不純物散乱に依存するかを数値計算により示しており、特にクリーンリミットでの結果がボルツマン近似とずれてくることを示している。

第 6 章「Hall conductivity on a 3D topological insulator surface」では、トポロジカル絶縁体表面でのホール効果について定式化と数値計算を行っている。トポロジカル絶縁体表面ではグラフェンと異なりディラックコーンが 1 個しかないため、ホール効果には、グラフェンに関して第 5 章で計算した軌道磁場による寄与の他に、ゼーマン項による寄与があることを指摘し、その寄与によるホール伝導率を計算している。短距離型不純物の場合にその結果を解析的に計算し、さらに数値計算でそのフェルミエネルギー依存性等を議論している。また特に、自己エネルギーが定数で頂点補正を無視するという簡単な極限をとると、第 2 章で説明した結果と符合することを述べている。

第 7 章「Summary」では、論文の全体を概観し今後の展望について述べている。

5 つの付録においては、第 3 章～第 6 章に用いられる等式の証明や背景となる公式の導出を行っている。

以上をまとめると、本論文では、グラフェンやトポロジカル絶縁体表面などに見られるディラック電子系の伝導率、帯磁率、ホール伝導率に関して、不純物散乱を不必要な近似なしに計算に取り入れて、その不純物ポテンシャル到達距離依存性などの性質を明らかにし、従来の理論と実験との食い違いに関して説明を与えた。この理論は他の研究と比べても不純物散乱を精密な形で取り扱っており、実験結果との定量的比較にも有用であるとともに、今後のディラック電子系の理論、実験に与えるインパクトは大きいと考えられ、理学の発展に大いに資するものと判定される。よって本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値があると認められる。