

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24840047

研究課題名(和文)トポロジカル量子相における光学応答の理論的研究

研究課題名(英文)Theoretical study of optical properties of topological phases

研究代表者

森本 高裕 (Morimoto, Takahiro)

独立行政法人理化学研究所・古崎物性理論研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：00631780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円、(間接経費) 570,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 多層グラフェンの光学応答について研究を行った。バンドの三角歪みの効果が光学応答に及ぼす効果について議論し、ファラデー回転などによりこの効果を観測することが可能であると提案した。また3層グラフェンはゲート電場中でバレーホール状態が実現することを議論した。

(2) クリフォード代数によるトポロジカル量子相の分類法を用いて、鏡映対称性のもとであらわれるトポロジカル結晶絶縁体の分類を行った。また、クリフォード代数による質量項の分類を応用し、弱いトポロジカル絶縁体の表面状態の安定性の議論も行った。

研究成果の概要(英文)：(1) We have studied optical properties of multilayer graphenes. We have proposed that the trigonal warping effect of the band structure can be experimentally observed by measuring Faraday rotations. We also proposed a novel valley Hall state of trilayer graphene in the presence of gate electric fields.

(2) We have applied a classification method of topological phases by Clifford algebras and classified topological crystalline insulators in the presence of reflection symmetries. We also studied stability of surface states of weak topological insulators using Clifford algebras.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、物性

キーワード：トポロジカル絶縁体 トポロジカル超伝導体 アンダーソン局在 ワイル半金属

1. 研究開始当初の背景

近年物質の新たな相としてトポロジカルな側面が注目されている。古くは量子ホール効果が知られており、系の応答が波動関数のトポロジカルな性質により決まっている。グラフェンやトポロジカル絶縁体が代表的な例であり、様々な応用をもつ新しい材料として期待されている。

トポロジカルな性質によって特徴付けられる量子相の研究は、主に輸送特性といった静的な性質が中心で、これらの系の光応答はこれまで十分に研究がなされてはこなかった。特にトポロジカル系に特徴的な低エネルギースケール(～数 meV)のプロープであるテラヘルツ光の実験技術は、近年、長足の進歩をしているので、トポロジカルな量子相の光応答を議論することが実験的な観点からも現実的になってきた。

2. 研究の目的

波動関数の非自明な幾何学的位相により旧来の物質とは異なる新奇な性質を発現する、種々のトポロジカルな量子相に対して光学応答を調べる。従来 DC で議論されていたような非自明なトポロジーに起因する物理がどのように AC 応答に反映されるかを議論することを本研究の目的とする。

特に、グラフェン、トポロジカル絶縁体、トポロジカル超伝導体に着目し、幾何学的位相から発現する特有の光学応答が、不純物などの摂動に対していかに強固であるかを議論することを通じて、トポロジカル状態を特徴付ける新たな光学実験を理論的に提案していくことをめざす。

3. 研究の方法

(1) 多層グラフェンの光学応答を、tight-binding Hamiltonian と久保公式を用いて調べる。多層グラフェンの電子構造は低エネルギーにおいてバンドの三角歪みという効果が重要になるが、これをとりいれるために炭素系の現実的なパラメータによる tight-binding Hamiltonian を磁場中で考える。光学(ホール)伝導度は線形応答の範囲内では久保公式により記述されるが、これをバンドの三角歪みを考慮した多層グラフェンの電子構造に適用し光学応答を研究する。
 (2) トポロジカルな量子相とそれを特徴づけるトポロジカル数は系の持つ対称性と密接な関係にある。ハミルトニアンに対称性と非自明なトポロジカル数の関係は Schnyder et al. [PRB (2008)] によって系統的に調べられた。相互作用のないフェルミオン系は時間反転対称性、電子正孔対称性、カイラル対称性の有無によって定まる 10 の Altland-Zirnbauer symmetry class のいずれかに分類される。Schnyder et al. は各クラスに対して可能な非自明なトポロジカル量子相を、非線形シグマモデルをもちいて調べた。同等な幾何学的不変量の分類法として、

クリフォード代数の拡大問題としての定式化がある。[Kitaev, AIP Conf. Proc. (2009).] 系の対称性をクリフォード代数の生成元として与え、そのもとで許される質量項をクリフォード代数の新たな生成元として添加するのにもどのような種類があり得るかという、代数の拡大問題を調べることにより、系を特徴づける幾何学的不変量を代数的な手続きにより導出する。我々はクリフォード代数によるトポロジカル相の分類法を応用することで、様々な対称性をもつトポロジカル相を研究した。

4. 研究成果

(1) 2層および3層グラフェン量子ホール系におけるファラデー回転:

2層および3層グラフェンについて強磁場下で光学ホール伝導度について調べた。光学ホール伝導度は実験的にはファラデー回転やカー回転により観測でき、DC で量子化するホール伝導度の AC 版ともいえる物理量であり興味を持たれる。多層グラフェンにおいては、バンドの三角歪みと呼ばれる効果により低エネルギー(数 meV)にディラックコーンが現れること議論されているが、不純物の効果でマスクされるため静的なプロープで詳細に観測することには困難が伴う。我々は多層グラフェンの低エネルギーディラックコーンが光学応答に顕著な影響を与えることを示し、これにより三角歪みの効果を光学的方法で観測する可能性について議論した。

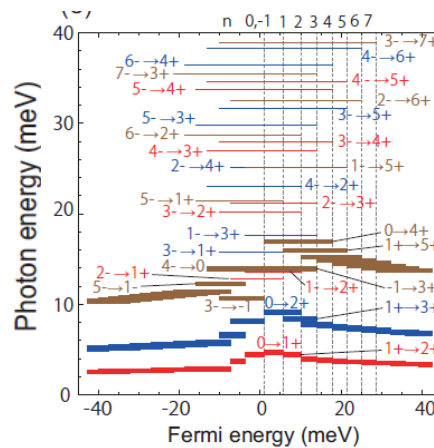


図1, 2層グラフェンの磁気光学応答

(2) 多層グラフェンにおけるゲート電場誘起ディラックコーン:

グラフェンの興味深い物性は低エネルギーに実現するディラックコーンに起因する。多層グラフェンに垂直電場を印加することによって新たな低エネルギーのディラックコーンを誘起することができ、電場強度によりディラックコーンのエネルギー領域をチューンできることを示した。また3層グラフェンではバレーホール状態というKK'バレーホール伝導度の異なる状態が実現しており、zigzag エッジに特徴的なヘリカルエッジモードがあらわれることを示した。

(3) 鏡映対称性のある場合のトポロジカル絶縁体・超伝導体の分類:

我々は Kitaev のクリフォード代数を用いた分類法を用いて、reflection symmetry などの付加的な対称性がある場合において、トポロジカル絶縁体・超伝導体の分類をおこなった。付加的な対称性を系の対称性のなすクリフォード代数に付け加えることにより定式化し、以前 Chiu らにより導かれていた reflection symmetry のある場合の分類を簡潔に再導出した。これにより、時間反転対称性と reflection により守られた SnTe のトポロジカル相や particle-hole symmetry と reflection により守られた超伝導トポロジカル相についての系統的な理解を与えた。

Reflection	Class	C_q or R_q	$d=0$	$d=1$	$d=2$	$d=3$
R	A	C_1	0	\mathbb{Z}	0	\mathbb{Z}
R^+	AIII	C_0	\mathbb{Z}	0	\mathbb{Z}	0
R^-	AIII	C_1	0	\mathbb{Z}	0	\mathbb{Z}
R^+, R^{++}	AI	R_1	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}	0	0
	BDI	R_2	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}	0
	D	R_3	0	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}
	DIII	R_4	\mathbb{Z}	0	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}_2
	AII	R_5	0	\mathbb{Z}	0	\mathbb{Z}_2
	CII	R_6	0	0	\mathbb{Z}	0
	C	R_7	0	0	0	\mathbb{Z}
R^-, R^{--}	CI	R_0	\mathbb{Z}	0	0	0
	AI	R_7	0	0	0	\mathbb{Z}
	BDI	R_0	\mathbb{Z}	0	0	0
	D	R_1	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}	0	0
	DIII	R_2	" \mathbb{Z}_2 "	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}	0
	AII	R_3	0	" \mathbb{Z}_2 "	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}
	CII	R_4	\mathbb{Z}	0	" \mathbb{Z}_2 "	\mathbb{Z}_2
C	R_5	0	\mathbb{Z}	0	" \mathbb{Z}_2 "	
CI	R_6	0	0	\mathbb{Z}	0	
R^{+-}	BDI	R_1	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}	0	0
R^{-+}	DIII	R_3	0	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}_2	\mathbb{Z}
R^{+-}	CII	R_5	0	\mathbb{Z}	0	\mathbb{Z}_2
R^{-+}	CI	R_7	0	0	0	\mathbb{Z}
R^{-+}	BDI, CII	C_1	0	\mathbb{Z}	0	\mathbb{Z}
R^{+-}	DIII, CI	C_1	0	\mathbb{Z}	0	\mathbb{Z}

表 1、鏡映対称性のもとでの分類表

(4) 弱いトポロジカル絶縁体・超伝導体の表面状態の安定性:

弱い Z2 トポロジカル絶縁体・超伝導体にあらわれる表面状態の安定性を議論した。一般の Altland-Zirnbauer symmetry class と次元にあらわれる弱い Z2 トポロジカル絶縁体・超伝導体を考え、層間の dimerization に対応した質量項により常に表面バンドにギャップを開けられることを示した。弱い Z2 トポロジカル絶縁体・超伝導体の乱れた表面が平均して空間的に一様であれば、異なる dimerization pattern に対応した Z2 トポロジカル相の間の量子臨界点が存在するため、表面状態は局在しないことを見いだした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9 件)

Takahiro Morimoto, and Akira

Furusaki: "Stability of surface states of weak Z2 topological insulators and superconductors," Phys. Rev. B 89, 035117 (2014). 査読有

doi: 10.1103/PhysRevB.89.035117

Takahiro Morimoto, and Akira

Furusaki: "Topological classification with additional symmetries from Clifford algebras," Phys. Rev. B 88, 125129 (2013). 査読有

doi: 10.1103/PhysRevB.88.125129

R. Shimano, G. Yumoto, J. Y. Yoo, R. Matsunaga, S. Tanabe, H. Hibino, T. Morimoto, and H. Aoki: "Quantum

Faraday and Kerr rotations in graphene," Nature Communications 4, 1841 (2013). 査読有

doi: 10.1038/ncomms2866

Y. Hatsugai, T. Morimoto, T.

Kawarabayashi, Y. Hamamoto, and H. Aoki: "Chiral symmetry and its

manifestation in optical responses in graphene: interaction and multilayers," New J. Phys. 15, 035023 (2013). 査読有

doi: 10.1088/1367-2630/15/3/035023

Takahiro Morimoto, and Mikito

Koshino: "Gate-induced Dirac cones in multilayer graphenes," Phys. Rev. B 87, 085424 (2013). 査読有

doi: 10.1103/PhysRevB.87.085424

Takahiro Morimoto, Mikito Koshino,

and Hideo Aoki: "Faraday rotation in

bilayer and trilayer graphene in the quantum Hall regime," Phys. Rev. B 86, 155426 (2012). 査読有

doi: 10.1103/PhysRevB.86.155426

[学会発表](計 16 件)

Takahiro Morimoto, and Akira

Furusaki: "Stability of surface states of general weak Z2 topological insulators and superconductors" (APS March meeting, Denver, Y41.00006, 2014/3/7)

Takahiro Morimoto: "Classification of topological insulators and

superconductors with reflection

symmetries" ("Topological Quantum

Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries" The Fourth

Annual Meeting, Nagoya, 2013/12/21)

Takahiro Morimoto, Mikito Koshino,

and Hideo Aoki: "Theory of optical

responses in the bilayer and trilayer

graphene in the quantum Hall regime"

(APS March meeting, Baltimore,

R5.00002, 2013/3/20)

Takahiro Morimoto, Mikito Koshino,

and Hideo Aoki: "Theory of optical

responses in the bilayer and trilayer

graphene in the quantum Hall regime"

(High Magnetic Fields in
Semiconductor Physics HMF-20,
Chamonix Mont-Blanc, France,
2012/7/23)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.riken.jp/lab-www/cond-mat-theory/morimoto/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森本 高裕 (MORIMOTO, Takahiro)

独立行政法人理化学研究所・古崎物性理論

研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：00631780