

平成 23 年 5 月 27 日現在

機関番号： 8 2 4 0 1

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2008～2010

課題番号： 20740167

研究課題名（和文）

二次元炭素系物質グラフェンにおける局在と量子ホール効果

研究課題名（英文）

Localization and quantum Hall effect in two-dimensional carbon material graphene

研究代表者

野村 健太郎 (NOMURA KENTARO)

独立行政法人理化学研究所・強相関理論研究チーム・基幹研究所研究員

研究者番号： 00455776

研究成果の概要（和文）：

グラフェンにおける量子ホール効果に関する理論的研究を行った。ディラック電子モデルに基づく伝導度のスケーリング解析から、弱磁場極限でも量子ホール相が安定に存在することを明らかにした。一方、強磁場領域では自発的対称性の破れた絶縁相が実現し、コスタリッツ・サウレス転移が生じる機構を解明した。また、ドーピングした場合に生じる分数量子ホール効果のギャップを計算した。グラフェン関連物質であるトポロジカル絶縁体の相構造を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The quantum Hall effects in graphene have been theoretically studied. Based on the Dirac fermion model and the scaling analysis, it was found that the quantum Hall phases can survive even in the weak magnetic field limit. In a strong magnetic field, the ground state and the Kosterlitz-Thouless transition were clarified. In the doped regime, the fractional quantum Hall states are realized. The gaps at a number of filling factors are computed. The phase structure of a topological insulator which is one of related material of graphene was also studied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	700,000	210,000	910,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

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：

グラフェン、ディラック電子、量子ホール効果、トポロジカル絶縁体

1. 研究開始当初の背景

2005 年に発表されたのグラフェンにおける量子ホール効果の実験を皮切りに、輸送現象を中心とするグラフェンの電子物性の研

究が爆発的に進展した。本プロジェクトは 2008 年度から始まったが、その当時は実験結果からいくつかの未解決問題が浮き彫りになり、伝導現象に関する理論的研究の要請が強まっていた。一つ

の問題はディラック電子の散乱機構の解明であった。当初は炭素原子の欠陥による散乱が提案されていたが、これは実験で得られたキャリア密度に比例する伝導率の振る舞いを説明できなかった。研究代表者は世界に先駆けて、荷電不純物による散乱機構を提唱し、それによって実験結果を説明した。

この荷電不純物による長距離散乱体の下ではバレー(谷)間散乱は弱く、1つのディラック分散に対する散乱の効果、とくに局在・量子ホール効果の研究が必要となっていた。

散乱機構の解明は、試料の易動度を向上させるためにも、不可避な問題であった。その後、荷電不純物がグラフェン膜に接するサブストレートによるものであると予想され、グラフェン膜をサブストレートから分離した、宙吊りグラフェンの試料が作成され、易動度は一桁上昇した。これによって、良質のグラフェンにおける多体効果の研究が着目され始めていた。

本研究プロジェクトが開始されたのとほぼ同時期に、ディラック型分散が3次元トポロジカル絶縁体の表面で実現する事が理論的・実験的に明らかとなり、ディラック粒子系の研究にさらなる注目が集まるようになった。したがって、本研究プロジェクトの結果はグラフェン物質に特殊なものでなく、より普遍的なものとなった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、グラフェンおよびその関連物質におけるディラック粒子の輸送現象、乱れの物理、多体効果の物理、およびこれらの競合を理論的に解析することであった。

(1) 量子ホール効果の乱れの影響

通常の2次元電子系で量子ホール効果を実現する場合には、ある程度強い磁場を印加する必要がある。これはランダウ準位の混成が量子ホール状態を壊す働きがあることに起因する。同様なことがディラック粒子の場合にも起きるか否かは、非自明で興味深い問題である。もし通常の2次元電子系と異なる性質があれば、弱磁場での振舞いに顕著な効果が期待されるため、これを解明することが一つの目的であった。

(2) 分数量子ホール効果

強磁場領域では電子間相互作用の効果が重要となる。通常の2次元電子とグラフェン中のディラック電子では、1体の波動関数の違いに起因して、電子間相互作用の振る舞いも変わってくる。グラフェンにおける分数量子ホール効果の実現可能性を調べるため、励起ギャップを十分大きい系で数値的に計算する。

(3) 2層グラフェン

2層グラフェンは1層グラフェンとも通常の2次元電子系とも異なったバンド構造をもつ。2層グラフェンにおける、電子間相互作用の

効果、特に強磁場下で可能な基底状態と励起構造を明らかにする。

(4) 関連物質への拡張

ディラック粒子が実現する関連物質として、圧力下の誘起伝導体や、異方的超伝導体など多くの例があるが、トポロジカル絶縁体の表面は、単独でディラック型線形分散が実現する事、および強いスピン軌道相互作用によって非自明な電気と磁気の結合効果が期待でいることで、注目を集めている物質である。ディラック粒子特有の現象が表面の電気磁気効果にどういった効果をもたらすのかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では乱れに関する効果を場の理論をもちいた解析的アプローチと、波数空間厳密対角化法による数値的アプローチを併用した。特に後者は研究代表者によって独自に開発されたもので、単一のディラック分散を有する場合、すなわち長距離相関を持つ不純物を有するグラフェン、およびトポロジカル絶縁体表面の解析に有用であった。すなわち、従来からよく使われる格子系モデルでは単一のディラック分散を構成することが不可能であることがニールセン・二宮の定理として知られている。ところが波数空間においてはこれが容易に可能となる。この波数空間厳密対角化法は数値的に厳密である故、摂動論が適用できないような、非摂動領域の解析に強力なアプローチであった。

(2) 相互作用効果を取り入れた解析では、自己無撞着ハートリーフォック近似を用い、乱れと相関効果の競合の解明に成功した。

(3) さらに強磁場極限の場合は厳密対角化および密度行列繰り込み群を用いた。とくに後者はこれまで困難であった、自由度の大きい系を扱うことができ、励起ギャップの正確な計算を可能とした。

4. 研究成果

(1) ディラック粒子の量子ホール効果

ディラック粒子の量子ホール効果に関する乱れの研究から、ディラック粒子系では量子ホール状態がゼロ磁場の極限まで安定に存在することが明らかとなった。通常の2次元電子系ではランダウ準位の混成が強まるにつれ、有限のホール伝導率に寄与する非局在状態がすべて高エネルギー側にフローディングしてしまい、ホール伝導率が弱磁場ではゼロになる。本研究では、ディラック粒子系の場合、ゼロエネルギー状態が常に非局在状態であるため、どんなに磁場が弱く、ランダウ準位間の混成が強くても、有限の量子化ホール伝導度が守られることが明かされた。この弱磁場量子ホール状態はディラック粒子特有の性質であり、長距離相関をもつグラフェンや、トポロジカル絶縁体の表面で実現すると予測される。

(2) 強磁場誘起多体状態

強磁場では磁気長の減少とともに、多体効果が重

要となる。実験では磁場を強くすることで、コストリッツサウレス型の相転移があることが指摘された。本研究ではこの強磁場によって実現する多体状態をボンド秩序状態とみなし、励起として副格子空間の擬スピン渦構造が実現する事を明らかにした。これは電子間相互作用と電子フォノン相互作用が乱れの効果と絡み合い実現するが、これをハートリーフォック解析を用いたシミュレーションによって再現することに成功した。多体基底状態が実現する臨界磁場の計算結果は実験とよく一致する。

(3) 分数量子ホール効果

強磁場中のグラフェンをディラック粒子のランダウ準位モデルに基づき解析した。とくに分数量子ホール効果の実現に本質的な励起ギャップは、通常の2次元電子系よりもグラフェンの方が大きくなりうることを示した。また基底状態における対称性の破れ方を明らかにした。グラフェンの場合はスピンの他にバレー(谷)の自由度があるにもかかわらず、スピン・擬スピンの対称性を破った量子ホール強磁性状態が実現する事がわかった。これらの研究の後、米国の実験グループは強磁場下の分数量子ホール効果の実現化に着手し、その観測に成功した。

(4) 2層グラフェン

グラフェン膜が2枚重なった2層グラフェンでも、電子間相互作用の効果は通常の2次元系の様子と異なる。本研究ではゼロエネルギー状態が磁場中ではさらに縮退度を増し、複雑な量子ホール強磁性状態が実現する事を解明した。また、2層グラフェンでも分数量子ホールのギャップは通常の2次元電子系のそれよりも大きく、分数量子ホール効果の実現する可能性は強いことを明らかにした。

(5) 関連ディラック物質への拡張

グラフェンの関連物質の一つとして、トポロジカル絶縁体における乱れの効果と相図を調べた。これによって、トポロジカル相がどのような条件下で実現するのかが、明らかとなった。

トポロジカル絶縁体では、(実)スピンが軌道の自由度と強く結合する。本研究の最終年度にはディラック粒子の量子ホール効果に関する知見を応用して、スピントロニクスデバイスとして大変有用となる効果を提案した。スピントロニクスの分野では、磁壁や磁気渦を電氣的に制御することが重要な課題となっているが、トポロジカル絶縁体に強磁性絶縁膜を近接させた系では、磁壁や磁気渦が実効的に電荷をもち、これによってその運動が電氣的に制御できることを示した。

トポロジカル絶縁体表面における磁性不純物の効果を調べた。表面状態は非磁性不純

物に対してはアンダーソン局在の効果は無く、金属的なまま、すなわち反局在であるが、磁性不純物が存在する場合は、すべての表面状態が局在する。ただしホール伝導率はゼロとはならず、フェルミ準位の位置によらず常に、量子化値に向かってスケールフローする。これはトポロジカル絶縁体において電気磁気効果を実験的に実現するためには大変有益な効果となる。

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 13 件)

- ① K. Nomura, N. Nagaosa
“Surface-Quantized Anomalous Hall Current and Magnetoelectric Effect in Magnetically Disordered Topological Insulators”
Phys. Rev. Lett. 106, 166802-1 166802-4 (2011) 査読有.
- ② A. Yamakage, K. Nomura, K.-I. Imura, Y. Kuramoto
“Disorder-Induced Multiple Transition involving Z2 Topological Insulator”
J. Phys. Soc. Jpn. 80, 053703-1 053703-4 (2011) 査読有.
- ③ 野村健太郎
“トポロジカル絶縁体表面に現れるディラック電子”
固体物理 45(11), 743-751 (2010) 依頼.
- ④ K. Nomura, N. Nagaosa
“Electric charging of magnetic textures on the surface of a topological insulator”
Phys. Rev. B 82, 161401-1 161401-4 (2010) 査読有.
- ⑤ K.-I. Imura, Y. Kuramoto, K. Nomura
“Anti-localization of graphene under the substrate electric field”
Europhys. Lett. 89, 17009-1 17009-5 (2010) 査読有.
- ⑥ Y. Barlas, W.-C. Lee, K. Nomura, A. H. MacDonald
“Renormalized Landau Levels and Particle-Hole Symmetry in Graphene”
Int. J. of Mod. Phys. B, 23, 2634 2640 (2009) 査読有.
- ⑦ K. Nomura, S. Ryu, D.-H. Lee
“Field-Induced Kosterlitz-Thouless Transition in the N=0 Landau Level of

Graphene”
Phys. Rev. Lett. 103, 216801-1 216801-4
(2009) 査読有.

⑧ N. Shibata, and K. Nomura
“Fractional quantum Hall effect in
graphene and its bilayer”
J. Phys. Soc. Jpn. 78, 104708-1 104708-7
(2009) 査読有.

⑨ K.-I. Imura, Y. Kuramoto, K.
Nomura
“Weak localization properties of the
doped Z2 topological insulator”
Phys. Rev. B 80, 085119-1 085119-15 (2009)
査読有.

⑩ 野村健太郎、越野幹人、笠真生
“グラフェンにおけるディラック粒子の量
子ホール効果”
固体物理 43(12), 911-920 (2008) 依頼.

⑪ Y. Barlas, R. Cote, K. Nomura, A.
H. MacDonald
“Intra-Landau-Level Cyclotron Resonance
in Bilayer Graphene”
Phys. Rev. Lett. 101, 097601-1 097601-4
(2008) 査読有.

⑫ K. Nomura, S. Ryu, M. Koshino, C.
Mudry, and A. Furusaki
“Quantum Hall Effect of Massless Dirac
Fermions in a Vanishing Magnetic Field”
Phys. Rev. Lett. 100, 246806-1 246806-4
(2008) 査読有.

⑬ N. Shibata, and K. Nomura
“Coupled charge and valley excitation in
graphene quantum Hall ferromagnets”
Phys. Rev. B 77, 235426-1 235426-5 (2008)
査読有.

[学会発表] (計 32 件)

① Kentaro Nomura
“Quantized Surface Anomalous Hall
Transport and Magneto-Electric Effect in
a Magnetically Disordered Topological
Insulator”
Hatron group seminar
2011 年 2 月 28 日 東京大学本郷キャンパス

② Kentaro Nomura
“Magnetic field induced symmetry broken
insulating phase in graphene”

UK-Japan Graphene Workshop
2011/2/4 Invitation
Lancaster, UK

③ Kentaro Nomura
“Quantum Hall Effects of Dirac Fermions”
Workshop on Dirac Electron Systems 2011
2011/1/19 Invitation
Tsukuba

④ Kentaro Nomura
“Quantum Transport of Dirac Fermion on the
Surface of Topological Insulator”
2011 Frontiers in Nanoscale Science and
Technology Workshop (Workshop FNST)
2011/1/5 Invitation
Wako, Japan

⑤ 野村健太郎
“3 次元トポロジカル絶縁体における表面量子ホ
ール電流と電気磁気効果”
理論グループ共通セミナー
2010 年 11 月 30 日 東京大学本郷キャンパス

⑥ 野村健太郎
“3 次元トポロジカル絶縁体表面における磁壁と
磁気渦の荷電効果”
物性コロキウム
2010 年 11 月 4 日 東北大学

⑦ Kentaro Nomura
“Spin texture on a topological insulator”
Opening Symposium of QS2C Theory Forum
2010/9/30
RIKEN, Wako

⑧ 野村健太郎
“3 次元トポロジカル絶縁体表面における磁壁と
磁気渦の荷電効果”
日本物理学会 秋季大会
2010 年 9 月 24 日 大阪市立大学

⑨ Kentaro Nomura
“Field-induced bond-ordered phase and
confinement-definiment transition in
graphene”
The 19th International Conference on the
Application of High Magnetic Fields in
Semiconductor Physics and Nanotechnology
(HMF-19)
2010 年 8 月 2 日 福岡

⑩ 野村健太郎
“磁場中グラフェンにおけるトポロジカル励起と
乱れの効果”
理論セミナー
2010 年 6 月 29 日 東京大学物性研究所

- ⑪ 野村健太郎
 “3次元トポロジカル絶縁体表面に現れるディラック粒子”
 日本物理学会
 シンポジウム「量子スピンホール系・トポロジカル絶縁体の物理とその発展」
 (招待講演)
 2010年3月22日 岡山大学
- ⑫ Kentaro Nomura
 “Field-induced Kosterlitz-Thouless transition in the $N=0$ Landau level of graphene”
 米国物理学会
 2010年3月15日 Portland
- ⑬ Kentaro Nomura
 “Topological delocalization of two-dimensional massless fermions”
 IPMU Focus Week: Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics
 2010年2月10日 東京大学柏キャンパス
- ⑭ 野村健太郎
 “強磁場中グラフェンにおけるトポロジカル励起と乱れの効果”
 GCOE 数学-物理合同セミナー
 2009年11月20日 東北大学
- ⑮ 野村健太郎
 “Quantum Hall effect of massless Dirac fermions in graphene”
 Miniworkshop on low-dimensional systems, - past present and future
 2009年11月8日 東京大学駒場キャンパス
- ⑯ 野村健太郎
 “ゼロ質量ディラック粒子系の量子ホール効果”
 物性研究所短期研究会「ディラック電子系の物性—グラフェンおよび関連物質の最近の研究」
 2009年10月22日 東京大学物性研究所
- ⑰ 野村健太郎
 “磁場中グラフェンにおけるトポロジカル励起と乱れの効果”
 日本物理学会 秋季大会
 2009年9月26日 熊本大学
- ⑱ Kentaro Nomura
 “Field-induced Kosterlitz-Thouless transition in the $N=0$ Landau level of graphene”
 International workshop on Theories on Strongly Correlated Molecular Conductors
 2009年9月18日 千葉県成田市
- ⑲ 野村健太郎
 “グラフェンにおける質量ゼロのディラック粒子の輸送現象”
 GCOE 数学-物理合同セミナー
 2009年9月15日 東北大学
- ⑳ 野村健太郎
 “グラフェンにおけるディラック粒子の輸送現象”
 第54回物性若手夏の学校分科会
 (招待講演)
 2009年8月24日
- (21) 野村健太郎
 “Massless Dirac fermions in graphene”
 理論セミナー
 2009年8月7日 東京大学本郷キャンパス
- (22) Kentaro Nomura
 “Intervalley phase coherent state in the zeroth Landau level of graphene”
 Graphene Tokyo 2009
 (ポスター発表)
 2009年7月25日 東京大学本郷キャンパス
- (23) Kentaro Nomura
 “Quantum transport phenomena of $d=2$ massless Dirac fermions”
 The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18)
 (ポスター発表)
 2009年7月23日 神戸国際会議場
- (24) 野村健太郎
 “Field-induced Kosterlitz-Thouless transition in the $N=0$ Landau level of graphene”
 理研セミナー
 2009年7月7日 理化学研究所
- (25) 野村健太郎
 “強磁場中グラフェンにおける対称性の破れとトポロジカル励起”
 「分子性導体における質量ゼロのディラック粒子とその新展開」京都大学基礎物理学研究所研究会
 2009年7月3日 京都大学
- (26) 野村健太郎
 “ディラック粒子の量子輸送現象”
 「分子性導体における質量ゼロのディラック粒子とその新展開」京都大学基礎物理学研究所研究会
 2009年7月2日 京都大学
- (27) 野村健太郎
 “グラフェンにおけるディラック粒子の量子輸送現象”
 日本物理学会 年次大会

第3回若手奨励賞受賞記念講演（招待講演）
2009年3月28日 立教大学

(28) 野村健太郎

“二層グラフェンにおける量子ホール強磁性”

日本物理学会 年次大会

2009年3月27日 立教大学

(29) Kentaro Nomura

“QHE of massless Dirac fermions in a vanishing magnetic field”

2009年3月16日

米国物理学会

Pittsburgh

(30) Kentaro Nomura

“Quantum transport phenomena of massless Dirac fermions”

Miniworkshop at UC Berkeley

2009年2月12日

カリフォルニア大学バークレー校

(31) 野村健太郎

“Quantum transport of massless Dirac fermions in graphene”

2009年1月9日 東北大学 WPI-AIMR

(32) 野村健太郎

“ゼロ磁場極限におけるディラック粒子の量子ホール効果”

日本物理学会 秋季大会

2008年9月22日 岩手大学

[その他]

ホームページ等

本研究の成果を含む功績が認められ、第3回日本物理学会若手奨励賞を受賞した。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 健太郎 (NOMURA KENTARO)

独立行政法人理化学研究所・強相関理論研究チーム・基幹研究所研究員

00455776

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者