

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340112

研究課題名(和文)幾何学的位相による物質相：量子液体及びグラフェンでの応用と展開

研究課題名(英文)Phase of matter by geometrical phases: application for quantum liquids and graphene

研究代表者

初貝 安弘 (Yasuhiro, Hatsugai)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：80218495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円、(間接経費) 4,560,000円

研究成果の概要(和文)：グラフェンは量子干渉効果としての幾何学的位相が重要な物質相である。特に磁場下のゼロエネルギーランダウ準位ではカイラル対称性が重要な役割を果たす。現在まで多くの研究が一体問題としてのものであったのに対し、本研究ではカイラル凝縮相としての相互作用起因の量子多体状態の存在を理論的に示し、その実験的な意義を励起ギャップの磁場依存性に関して理論的に示すことで実験との比較を行いその有効性を示した。また、乱れの効果を一般的なカイラル対称性としての観点から明らかとした。

さらに理論、実験の協調のもとテラヘルツ分光実験によりグラフェンのファラデー回転を観測することで光学量子ホール効果の観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：Graphene is a typical quantum material where quantum interference plays an important role. Especially at the zero energy Landau level in a strong magnetic field, the chiral symmetry, which is a characteristic feature of graphene, is fundamental. However most of the theories do not include manybody effects until now. Here in this project, we have constructed a theory of the chiral condensate which is a manybody ground state of graphene with interaction. Then comparison of excitation gap with experiments is performed consistently. It implies validities of our theory. Also we have clarified the role of randomness with chiral symmetry.

Also Faraday rotation experiments with theoretical consideration has been performed. Then optical quantum Hall effects of graphene is successfully observed and established.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学(数理物理・物性基礎論)

キーワード：量子液体 グラフェン ベリー接続 テラヘルツ分光 ファラデー回転

## 1. 研究開始当初の背景

量子系の幾何学的位相は量子系を古典系から本質的に特徴づけるものの一つであり、近年大きな注目を集めているトポロジカル相の起源である。その最も基本的な物理量は量子ホール効果であり、これに関して本基盤研究メンバーは多くの実績をもち、理論、実験両面にわたり特殊な専門的能力を持つメンバーが揃っていた。特に量子効果が重要な系としてグラフェンがあるが、これに関しても本基盤研究の理論メンバーはトポロジカル相としての観点からの高い実績を持っていた。特にグラフェンの量子ホール効果に関するカイラル対称性の意義、乱れの効果、更には光学量子ホール効果に関するオリジナリティーある研究成果をあげていた。その一方で実験メンバーはテラヘルツ分光実験の高度の専門家であり、本基盤研究メンバーとともに量子ホール系におけるテラヘルツ分光に関して特筆すべき成果を上げていた。

つまり、「ギャップを光で見る」との観点から理論、実験の協調のもと、まさに量子液体相の理論の検証ならびに新たな展開を目指す段階にあった。

## 2. 研究の目的

「対称性の破れ」の概念は、物理学における相認識の基礎であり。それ故、対称性の破れを伴わない物質相としての「量子液体相」の理解は、現在の物性物理学理論が直面する最も重要な問題の一つである。この問題に関して我々は、前回の基盤研究において量子効果である「幾何学的位相」と「バルク・エッジ対応」に着目しそのブレイクスルーたる理論的な枠組みを構築してきた。本基盤研究はそ

の先駆的成果を格段に発展させ、グラフェン他、量子液体たる新物質相の開拓、理解を目指し、理論展開をめざすと共に実験的検証を含めた新たなステージでの研究展開を目指すものである。量子液体は、対称性の破れを伴わないため南部ゴールドストーンボゾンとしての低エネルギー励起は存在せず、逆に特徴的な有限の励起ギャップが存在する。よってギャップを越える有限エネルギーの励起(例えば光励起)、有限振動数に対する動的応答、並びにトポロジカルな相の特徴であるバルクエッジ対応起因の局在プローブに対する局所的な応答等が本質的な物理的、実験的特徴となる。本基盤研究は、これらの励起ギャップ有限の系での新しい物理的描像を確立すべく理論、実験の連携により理論的概念を実験的に検証することを目指し、量子液体相の理解に至ることが最終的な目的である。

## 3. 研究の方法

「量子液体相」は、古典的物理量で表現できる秩序変数をもたないことを最大の特徴とする量子相であり、近年話題の磁場下のグラフェンも典型的量子液体相である。代表者の初貝は、この観点にたち、「対称性の破れ」の概念を使わず、量子論固有の幾何学的位相を用いる相分類の理論的枠組みをこの数年にわたって構築してきた。本研究ではその基礎の下で具体的理論的手段としては多粒子状態に対するベリー接続を用いた、「量子化ベリー位相」「一般化されたホール伝導度の拡張である第一、第二チャーン数」「バルク・エッジ対応」を用い、一般論を進展させるとともに物性論における重要ないくつかの具

体的な物質相に対して、その相の特徴付け、相分類を目指した具体的かつ数値的な研究を行い、さらには理論の検証となる実験的研究もテラヘルツ分光学の実験の専門家のメンバーにより遂行し、「ギャップを光で見る」の観点から、理論と実験との整合性を確認する。

#### 4 . 研究成果

グラフェンは量子干渉効果としての幾何学的位相が重要な物質相である。特に磁場下のゼロエネルギーランダウ準位ではカイラル対称性が重要な役割を果たす。しかしながら、現在まで多くの研究が一体問題としてのものであったのに対し、本研究ではカイラル凝縮相としての相互作用起因の量子多体状態の存在を理論的に示し、その実験的な意義を励起ギャップの磁場依存性に関して理論的に示すことで実験との比較を行いその有効性を示した。また、乱れの効果を一般的なカイラル対称性としての観点から明らかとした。

さらに理論、実験の協調のもとテラヘルツ分光学実験が進行していたとき、本基盤研究の研究集会を契機として、外部研究者とのあらたな共同研究が始まり、高品質の大面积の単層グラフェン試料が研究に使用可能となった。最終的には、この均一性が高く、低いキャリア濃度と高移動度のエピタキシャル試料を用いることでグラフェンのファラデー回転の高度精密測定が遂行され、グラフェンの光学量子ホール効果における半整数量子ホール効果の観測に成功した。

#### 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28件)全て査読有り

[1] T. Kariyado and Y. Hatsugai, “Symmetry Protected Quantization and Bulk-Edge Correspondence of Massless Dirac Fermions: Application to Fermionic Shastry-Sutherland Model”, *Phys. Rev. B* **88**, 245126(7) (2013),

doi:10.1103/PhysRevB.88.245126

[2] T. Fukui, K.-I. Imura and Y. Hatsugai, “Symmetry protected weak topological phases in a superlattice”, *Journal of the Physical Society of Japan* **82**, 073708(5) (2013), doi:10.7566/JPSJ.82.073708

[3] 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 Commun.* **4**, 1841 (2013),

doi:10.1038/ncomms2866

[4] P.A. Maksym and H. Aoki, “Magnetic field controlled vacuum charge in graphene quantum dots with a mass gap”, *Phys. Rev. B* **88**, 081406(R)(5) (2013),

doi:10.1103/PhysRevB.88.081406

[5] Y. Hamamoto, T. Kawarabayashi,, H. Aoki and Y. Hatsugai, “Spin-resolved chiral condensate as a spin-unpolarized  $\nu=0$  quantum Hall state in graphene”,

*Phys. Rev. B* **88**, 195141(6) (2013), doi:10.1103/PhysRevB.88.195141

[6] 初貝安弘「トポロジカル秩序とベリー接続」日本物理学会会誌「解説」**68** 巻1月号

19-28 (2013),  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009586199>  
[7] Y. Hatsugai, T. Morimoto, T. Kawarabayashi, Y. Hamamoto and H. Aoki, "Chiral symmetry and its manifestation in optical responses in graphene: interaction and multi-layers", New J. Phys. **15**, 035023(27) (2013),  
[doi:10.1088/1367-2630/15/3/035023](https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/3/035023)  
[8] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, and H. Aoki, "Topologically protected Landau levels in bilayer graphene in finite electric fields", Phys. Rev. B **85**, 165410 (5) (2012),  
[doi:10.1103/PhysRevB.85.165410](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.165410)  
[9] Y. Hamamoto, H. Aoki, and Y. Hatsugai. "Chiral condensate with topological degeneracy in graphene and its manifestation in edge states", Phys. Rev. B **86**, 205424 (6) (2012),  
[doi:10.1103/PhysRevB.86.205424](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.205424)  
[10] 森本高裕, 池辺洋平, 島野亮, 青木秀夫, 光で見る量子ホール効果, 日本物理学会誌 2011年5月号「最近の研究から」第66巻第5号, 365-370 (2011),  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008661942>  
[11] Y. Hatsugai and I. Maruyama,  $Z_2$  Topological Invariants for Polyacetylene, Kagome and Pyrochlore lattices, Euro. Phys. Lett. **95**, 20003(5) (2011),  
[doi:10.1209/0295-5075/95/20003](https://doi.org/10.1209/0295-5075/95/20003)  
〔学会発表〕〔招待講演〕のみ(計27件)  
[1] H. Aoki, "Manipulating Dirac fermions graphene nanomesh, dot and

polarisation", Int. Focus Workshop on Recent Progress and Perspectives in Scaling, Multifractality, Interactions, and Topological Effects Near Anderson Transitions, Dresden, Germany, 2014年03月11日  
[2] 島野 亮, 「テラヘルツ波が拓く量子物性科学」応用物理学会・テラヘルツ電磁波技術研究会主催研究討論会「新しいテラヘルツ科学が映し出すテラヘルツ応用の展望」名古屋大学、名古屋 2013年11月18日  
[3] 初貝安弘「グラフェンのディラックコーンとゼロエネルギー局在状態」, グラフェンナノデバイスの新しい展開, AIST, Tsukuba, Japan 2013年11月11日  
[4] 島野 亮, 「グラフェンの量子ファラデー効果: 光に現れるトポロジカル量子現象」, 物性研短期研究会「極限強磁場科学一場、物質、プローブのリンクから融合へ」, 東京大学物性研究所、東京 2013年10月31日  
[5] Hideo Aoki, "How we can manipulate graphene --- chiral symmetry, topology and charged vacuum", ISSP Int. Symposium Emergent Quantum Phases in Condensed Matter, Kashiwa, 14 June 2013.  
[6] Y. Hatsugai, "Symmetry, Berry connection and Bulk-edge correspondence", Emergent Quantum Phases in Condensed Matter, ISSP, Kashiwa, Japan 2013年06月05日  
[7] Y. Hatsugai, "Characterization of Topological Phases", The 317th MANA Special Seminar, NIMS, Tsukuba, JAPAN 2013年03月06日

- [8] Y. Hatsugai, "Symmetry protection in topological phases", 2013 EMN West Meeting on Topological Insulators, Houston, USA 2013年01月08日
- [9] 初貝安弘, 「ベリー接続とエンタングルメント」日本物理学会2012年秋季大会(領域11, 領域01合同)シンポジウム量子多体系におけるエンタングルメント, 横浜国立大学, 横浜 2012年09月19日
- [10] Y. Hatsugai, "Berry connection and bulk-edge correspondence in topological phases", 36-th International conference of theoretical physics: correlation and coherence at different scales, Ustron, Poland 2012年09月15日
- [11] R. Shimano, "Terahertz magneto-optics of the integer quantum Hall effect in a GaAs two-dimensional electron gas system", The 20th International Conference on "High Magnetic Fields in Semiconductor Physics", HMF-20, Chamonix Mont-Blanc, France 2012年07月23日
- [12] Y. Hatsugai, "Bulk-Edge Correspondence in Condensed Matter and Its Application", 2012 Villa Conference on Topological Insulators, Orlando, USA 2012年04月19日
- [13] R. Shimano and Y. Ikebe, "Terahertz magneto-optics in the quantum Hall system", SPIE Photonics West, OPTO, Ultrafast Phenomena and Nanophotonics XVII, San Francisco, California, USA 2012年01月25日
- [14] Y. Hatsugai, "Symmetry, Dirac cones and Berry connections for frustrated fermions", 26th Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop "Novel Quantum States in Condensed Matter 2011 (NQS2011)", 京都大学 基礎物理学研究所 (京都) 2011年11月17日
- [15] Y. Hatsugai, "Quantized Berry phases for characterization of short range entangled states in d-dimensions", Kavli Institute for Theoretical Physics program: Topological Insulators and Superconductors, Kavli Institute for Theoretical Physics, UCSB, Santa Barbara, California, U.S.A. 2011年11月03日
- [16] R. Shimano, "Terahertz magneto-optics in the quantum Hall system", 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011) Houston, Texas, USA 2011年10月06日
- [17] 初貝安弘, [グラフェンにおけるカイラル対称性と電子相関] 理論核領域, 素粒子領域合同シンポジウム 強相関物理の新展開 18pSJ-6 日本物理学会 2011年秋季大会 (素粒子原子核) 弘前大学, 青森 2011年09月18日
- [18] 初貝安弘, 「グラフェンの特異な物性とカイラル対称性」京都大学基礎物理学研究所 研究会「熱場の量子論とその応用」京都 2011年08月22日
- [19] 初貝安弘「時間反転対称性とトポロジカル絶縁体のエッジ状態: バルクエッジ対応の物理」平成23年度 第10回 飯綱・サイエンスサマー道場, 2011年08月17日
- [20] Y. Hatsugai, "Use of Berry connections in condensed matter physics

and the bulk-edge correspondence” ,  
Workshop on Emergence in Field Theory,  
Nanyang Executive center, Nanyang  
Technology University, Singapore 2011 年  
08 月 06 日

[21] Y. Hatsugai, “ Symmetry protected  
quantization of Berry phases and  
applications” , Workshop and School on  
Topological Aspects of Condensed Matter  
Physics, International Center for  
Theoretical Physics (ICTP), Trieste,  
Italy 2011 年 06 月 29 日

[ 図書 ] ( 計 2 件 )

[1] Y. Hatsugai and H. Aoki ( 共著 ) ,  
“ Graphene: Topological Properties,  
Chiral Symmetry and Their Manipulation in  
Physics of Graphene” , edited by H. Aoki  
and M. S. Dresselhaus, 350 (213-250)  
(2014)

[2] 初貝 安弘 ( 共著 ) , パリティー 2013 年  
11 月号 : 原子崩壊がグラフェンで現実に ( 翻  
訳 ) , 80(28-30) (2013)

[ その他 ]

ホームページ等

[1]<http://rhodia.ph.tsukuba.ac.jp/>

[2][http://rhodia.ph.tsukuba.ac.jp/~hatsugai/modules/pico/index.php?content\\_id=62](http://rhodia.ph.tsukuba.ac.jp/~hatsugai/modules/pico/index.php?content_id=62)

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

初貝 安弘 ( HATSUGAI YASUHIRO )  
筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号 : 8 0 2 1 8 4 9 5

(2) 研究分担者

青木 秀夫 ( AOKI HIDEO )

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号 : 5 0 1 1 4 3 5 1

島野 亮 ( SHIMANO RYO )

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号 : 4 0 2 6 2 0 4 2

河原林 透 ( KAWARABAYASHI TOHRU )

東邦大学・理学部・教授

研究者番号 : 9 0 2 5 1 4 8 8

(3) 連携研究者

丸山 勲 ( MARUYAMA ISAO )

福岡工業大学・情報工学部・准教授

研究者番号 : 2 0 4 2 2 3 3 9

岡 隆史 ( OKA TAKASHI )

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号 : 5 0 4 2 1 8 4 7

濱本 雄治 ( HAMAMOTO YUJI )

筑波大学・数理物質系・助教 ( 平成 24 年度 )

研究者番号 : 3 0 5 8 4 7 3 4

( 平成 23, 24 年度 )

苅宿 俊風 ( KARIYADO TOSHIKAZE )

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号 : 6 0 7 1 1 2 8 1

( 平成 25 年度 )