

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月29日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540265

研究課題名（和文）グラフェンがもたらす量子輸送現象と相対論的場の理論の新たな接点

研究課題名（英文） New common ground between quantum transport phenomena and relativistic field theory brought by graphene

研究代表者

静谷 謙一（SHIZUYA KEN-ICHI）

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：50154216

研究成果の概要（和文）：

ディラック電子系として注目されるグラフェンについて、その“相対論的”な真空構造やゲージ量子異常に由来する諸特性を探究した。通常の電子系には類のない、以下の特質を明らかにした。磁場中のグラフェン二層系には殆ど縮退した擬ゼロ・モード・ランダウ準位が現れるが、電子間相互作用の下でこれらの準位に軌道混合が起こり、(1) 電気二重極をもつ新種の集団励起が出現しうる、その一方で(2) 価電子帯の量子ゆらぎにより水素原子のラム・シフトに類似した微細準位分離が生じる。さらに、グラフェンでは(3) 強い量子ゆらぎを通してサイクロトロン共鳴に多体効果が生じる。

研究成果の概要（英文）： Graphene attracts great attention as a condensed-matter system that supports Dirac fermions as charge carriers. We explored some characteristic properties of graphene that reflect its “relativistic” vacuum structure and gauge anomalies, and reached the following observations: In a magnetic field bilayer graphene supports a number of pseudo-zero-mode Landau levels with orbital degeneracy. (1) They, under electron-electron interactions, get mixed and give rise to a new kind of collective excitations with nonzero electric moment. (2) Their orbital degeneracy is lifted by quantum fluctuations, leading to the “Lamb shift”, as in the hydrogen atom. (3) Also, quantum fluctuations are responsible for many-body corrections to cyclotron resonance in graphene.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（理論）

1. 研究開始当初の背景

(1) この数年グラフェン (graphene) と呼ばれる炭素の一原子層からなる新物質の物性に実験・理論両面から強い関心が向けられている。グラフェンは質量ゼロのディラック粒子のように振る舞う電子を伝導帯と価電子帯にもつ“相対論的”な2次元電子系であり、“相対論的”な量子現象を身近な物性系で検証・研究する希有な機会を提供する。グラフェンは物性研究者のみならず素粒子論の研究者にとっても魅力的な研究対象である。

(2) 磁場中に置いたグラフェンには複数の特徴的なエネルギーがゼロのランダウ準位が出現する。このようなゼロ・モード・ランダウ準位が量子異常や指数定理を通してゲージ原理と密接な関係を持つこと、そしてその力学が潜在的に豊かな内容を持ちうることを研究代表者は過去の研究を通して体得しており、この視点に沿ってグラフェンの物理を探究する意欲を持っていた。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえて、研究代表者は、相対論的な場の理論に固有な真空(ディラックの海)の量子的な性質やゲージ量子異常に由来すると考えられるグラフェンの諸特性を探求し、基礎物理と応用の両面から“相対論的物性系”の開く新しい可能性を明らかにしたい。特に、グラフェンに内在するスピン・擬スピン(カイラリティ)・層などの自由度が磁場中でゲージ場を介してもたらず多様な特性(量子的コヒーレンスや集団励起など)に焦点を当てて、研究を進める。

3. 研究の方法

(1) 研究テーマ

グラフェンはディラック電子を持つ系であるので、伝導帯と価電子帯が密接に結びつく。このためグラフェンでは(ディラックの海として作用する)価電子帯からの強い量子的揺らぎが通常の電子系には類のないグラフェン固有の新規な特性をもたらすと期待される。一方、以前から1+2次元の量子電気力学においては「半整数のフェルミオン数」が量子効果として誘起され、その帰結として磁場中の電子のスペクトルにはエネルギーゼロのランダウ準位が出現することが(理論的には)知られていた。これらはゲージ場の理論に特有な量子現象であり、ディラック・ハミルトニアン指数や1+1次元のカイラル量子異常とも密接に結びついている。実際グラフェンではこの現象が「半整数量子ホール効果」として観測されている。このようにゲージ原理と量子異常に係わる現象は特に磁場中の電子について顕著に現れる。

これらの事実を踏まえて、相対論的場の理論に固有な真空(ディラックの海)の量子的

な性質や量子異常を反映するグラフェンの諸特性を磁場中という舞台の中で追求した。時系列的には以下の3つのテーマについて研究した。

① グラフェン二層系の特性

擬ゼロ・モード・ランダウ準位における軌道縮退・混合と集団励起(軌道擬スピン波)

② グラフェンにおけるサイクロトロン共鳴と多体効果

③ グラフェン二層系におけるラム・シフト(Lamb shift)に類似した微細準位分離

(2) 研究交流

グラフェンの物理は物性・素粒子の分野を越えたホットな話題であり、進展が早い。グラフェンに関する実験と理論の最新の情報に接する最良の機会(主に欧米で開かれる)国際的な研究集会である。この3年間にも、CARBOMAT 2011 (Catania, Italy), Graphene Week 2011 (Oberurgl, Austria), HMF19 (福岡)、他、に参加して情報収集・成果発表・研究交流に努めた。

4. 研究成果

磁場中のグラフェンには複数の特徴的なゼロ・エネルギー・ランダウ準位が出現する。単層グラフェンではスピンと(六角格子中の二つの副格子に付随する2自由度)valleyについて最大4重に縮退し、2層グラフェンでは更に軌道指数 $n=0$ と $n=1$ のモードの縮退が起こるため最大8重に縮退する。外電場や電子間クーロン相互作用の下で、これらのゼロ・モード準位は微細に分離して擬ゼロ・モード準位となる。このような多体効果や外場の影響を考慮に入れて、この擬ゼロ・モード準位の豊かな力学をの解明を試みた。

(1) グラフェン二層系の擬ゼロ・モード・ランダウ準位における軌道混合と集団励起(軌道擬スピン波)

グラフェンの二層系には外電場によりバンドギャップを変化・制御できるという著しい特性があり、応用の面からも注目されている。研究代表者も磁場中のグラフェン二層系の電磁応答を考察して、擬ゼロ・モード準位の微細準位間ギャップが試料内電場、或いは電流を用いて制御できることを既に指摘している [T. Misumi and K. Shizuya, PRB 77, 195423 (2008)]。

今回は電子間相互作用と外場の影響を考慮に入れて、この擬ゼロ・モード準位には量子的なコヒーレンスや擬スピン波(集団励起)などの豊かな力学的内容があることを明らかにした[発表論文⑧と⑦]。その主要内容は以下の通りである：

外場や電子間相互作用がかかると軌道指数 $n=0$ と $n=1$ のモードの混合が起こり、その結

果として、電荷担体が電気 2 重極子をもつようになる。面内電場・電流により微細準位間ギャップが制御できるという以前の結論はこの微視的な機構により明快に説明できる。また、この軌道混合により擬ゼロ・モード準位には軌道擬スピン波という新種の集団励起が現れる可能性を指摘した。

この仕事は二層系グラフェンの擬ゼロ・モードの準位構造や集団励起を「量子ホール強磁性」の観点から考察した A. H. MacDonald 達の仕事 [Y. Barlas, et al, PRL 101, 097601 (2008); R. Cote, et al, PRB 82, 035445 (2010)] と時期的にも内容的にも重なる部分があり、彼らもこの仕事のことをよく認識してくれている。

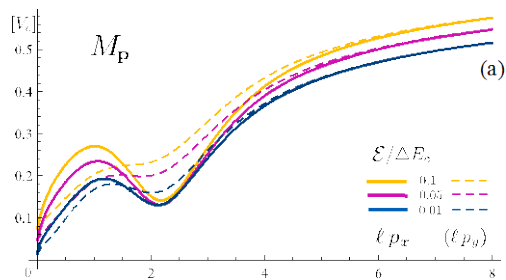


図 1. 軌道擬スピン波のスペクトル。面内電場がかかると空間的に非対称となる。

(2) グラフェンにおけるサイクロトロン共鳴と多体効果

(不純物を想定しない) 通常の 2 次元電子系ではサイクロトロン共鳴は単純な構造をもっている。Kohn の定理として知られているように、共鳴は隣り合う準位間でのみ生じ、さらに電子間相互作用の影響を受けない、つまり単一の共鳴周波数で起こるからである。一方、赤外光を用いてグラフェンのサイクロトロン共鳴を観測する実験 [Z. Jiang, et al., PRL 98, 197403 (2007)] では、グラフェンに固有な (そして多様な) 相対論的なスペクトルが確認されているが、同時に小さい有意なずれも観察されている。通常の量子ホール系と異なりグラフェンには Kohn の定理が適用できないので、このずれは多体効果の現れとも考えられる。

発表論文⑤では、このずれを電子間相互作用による速度のくりこみの効果として説明し、定量的な考察を加えた。その説明の骨子は以下の通りである：

純正の多体効果はグラフェンに特有な真空偏極から生じ、紫外発散を含むので、その取り扱いにはくりこみの処方が必要となる。そのくりこみの結果として、速度因子が、さらに二層系では層間結合因子までもが磁場の強さをかえると変化する (走る) ことが結論できる。

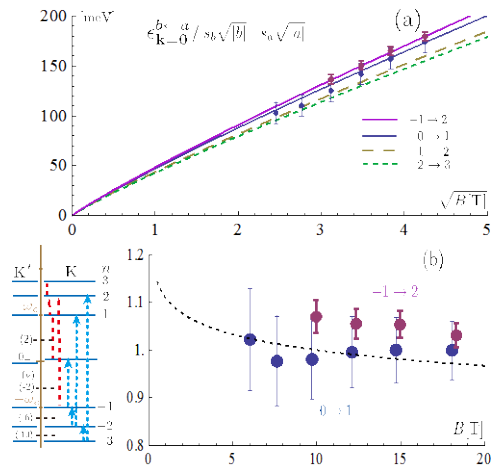


図 2. サイクロトロン共鳴 (単層)
(a) 実験との比較 (b) データ点の傾きから速度因子の「走り」が読み取れる。

上図に見るように、単層グラフェンの実験結果はよく説明できたものの、二層系については有意なずれが残った。実は別の実験から二層系グラフェンは (構造的な) 弱い電子・ホール非対称性をもつことが指摘されているので、2010 年度からこの非対称性を考慮に入れた二層系のサイクロトロン共鳴の再吟味を行った (発表論文②と①)。その結果、単一の速度因子を用いて電子データとホール・データが同時にフィット可能となるなど、理論と実験の一致に改善がみられる一方で、二層系の擬ゼロモード準位の構造には依然として未知の内容が残るとの示唆を得た。

(3) グラフェン二層系におけるラム・シフトに類似した微細準位分離

二層グラフェンの擬ゼロ・モード準位の軌道縮退はカイラル量子異常に由来する位相的起源をもつ現象であり、グラフェン二層 (そして多層) 系に特有な現象である。研究代表者はこの軌道縮退が荷電子帯 (ディラックの海) の量子揺らぎにより解けることに気づいた。これは水素原子のラム・シフトと類似した量子効果である。目下、この効果を考慮に入れて擬ゼロ・モード 8 重項の構造を考察した論文を投稿中である。

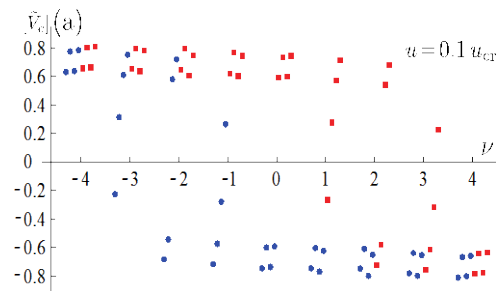


図 3. 各整数充填度 ν における擬ゼロ・モード準位のスペクトル

(4) 一般の読者・研究者向けの雑誌、数理科学に「くりこみとスケール不変性の量子的破れ」、「スケール量子異常、漸近的自由性、超対称性」、そして「グリーン関数と波動方程式 —量子力学、場の理論とともに—」と題する小論を書いた。前二者では、特に保存則の微妙な破れが自然現象に奥行きをもたらす事例について解説し、後者では波動方程式が古典物理、量子力学、場の理論と舞台を新たにするとともにその意味と適用範囲を広げ、新たな物質観をもたらす様子について解説した。

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 8 件)

- ① K. Shizuya, “Many-body corrections to cyclotron resonance in graphene”, *Journal of Physics: Conference Series* 334, 012046 1-5 (2012), 査読有.
(DOI:10.1088/1742-6596/334/1/012046)
- ② K. Shizuya, “Renormalization and cyclotron resonance in bilayer graphene with weak electron-hole asymmetry”, *Physical Review B* 84, 075409 1-10 (2011), 査読有.
(DOI:10.1103/PhysRevB.84.075409)
- ③ 静谷 謙一, “くりこみとスケール不変性の量子的破れ - ワイルアノーマリ”, 数理科学 570 巻, 34-39 (2010), 査読無.
- ④ 静谷 謙一, “グリーン関数と波動方程式 —量子力学、場の理論とともに—”, 数理科学 561 巻, 51-56 (2010), 査読無.
- ⑤ K. Shizuya, “Many-body corrections to cyclotron resonance in monolayer and bilayer graphene”, *Physical Review B* 81, 075407 1-10 (2010), 査読有.
(DOI:10.1103/PhysRevB.81.075407)
- ⑥ 静谷 謙一, “スケール量子異常、漸近的自由性、超対称性”, 数理科学・臨時別冊 2010 年 1 月号, 112-119 (2010), 査読無.
- ⑦ K. Shizuya, “Pseudo-zero-mode Landau levels and pseudospin waves in bilayer graphene”, *Physica E* 42, 736-739 (2009), 査読有.
(DOI:10.1016/j.physe.2009.11.055)
- ⑧ K. Shizuya, “Pseudo-zero-mode Landau levels and collective excitations in bilayer graphene”, *Physical Review B* 79, 165402 1-11 (2009), 査読有.
(DOI:10.1103/PhysRevB.79.165402)

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① K. Shizuya, “Cyclotron resonance and renormalization in graphene and its bilayer”, CARBOMAT2011 (Workshop on Carbon-based low-dimensional Materials), 2011 年 12 月 5 日, Catania, Italy.
- ② 静谷 謙一, グラフェンにおけるサイクロトロン共鳴と多体効果, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 25 日, 物理学会 Web ページ・講演資料公開サイト
- ③ 静谷 謙一, グラフェン 2 層系の擬ゼロモード・ランダウ準位と集団励起, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 26 日, 熊本大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

静谷 謙一 (SHIZUYA KEN-ICHI)
京都大学・基礎物理学研究所・教授
研究者番号: 50154216

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: