

VII-2. 量子物性理論

教授：初貝安弘

助教：濱本雄治

大学院生：2名

【1】物質中のディラックフェルミオンとしてのグラフェンの研究：論文 [1–8]，講演 [3–5, 7, 10, 12–15, 17, 18, 20, 21, 23–27]

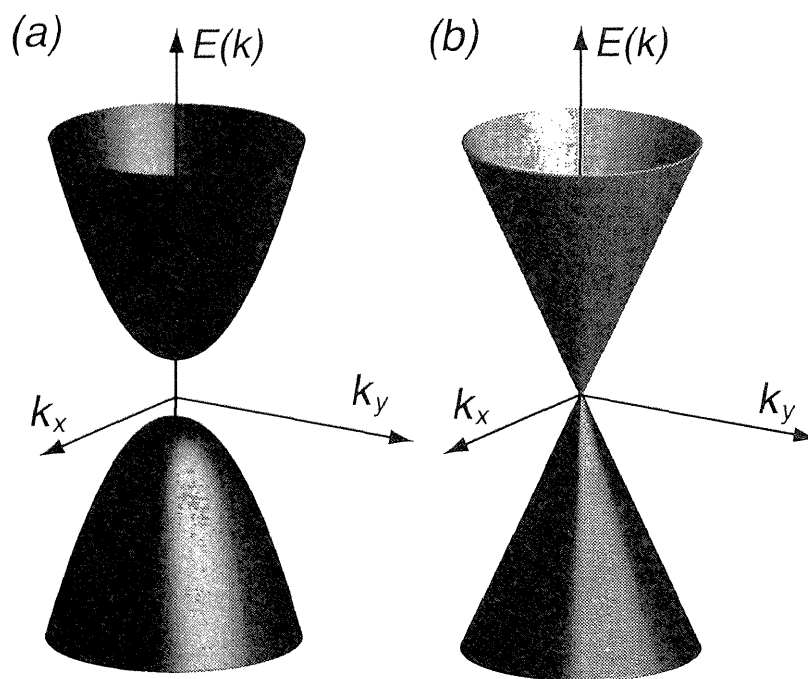


図 1: エネルギー分散.(a) 通常の半導体 (b) グラフェン

グラフェンは、半導体であるがそのエネルギーギャップがナローギャップ半導体の極限ともいうべき、ちょうどゼロであり、ゼロギャップ半導体である。通常の半導体では、エネルギーバンドの極小、極大値のまわりでは分散が放物線で近似でき、ホール、電子それぞれに関して有効質量を用いた Schrödinger 方程式による量子効果の記述が有効となる。しかし、ゼロギャップ半導体においては、ギャップ近傍でエネルギー分散が一般には線形のいわゆる Dirac コーン構造をとり (図 1)、有効質量が定義できない。これに対応して有効理論も Massless-Dirac 方程式と呼ばれる 2×2 行列により記述されるものとなる。ギャップがゼロであるから、低エネルギーの有効理論とはいえ、必ず伝導帯と価電子帯との両方をともに取り扱わなければならないことを考えるとこの行列による記述は当然のものといえよう。なお Massless とはゼロギャップであることを意味する。この Dirac 方程式とは Dirac が電子のスピンを理論的に記述するために相対論的な量子力学を構築する際用いた方程式と類似のものであり、相対論的な方程式であると言われる。これはエネルギー分散が線形になることによる。ただし元々の Dirac の理論で光速であったものは、ここでは単にゼロギャップ半導体のエネルギー分散の傾きであり、グラフェンの場合光速の 300 分の 1 程度である。グラフェンの特異なエネルギー分散は 2 次元電子の磁場下の典型的な量子効果としてよく知られた量子ホール効果

にも特徴的な振る舞いをもたらす。本年度はこれらのグラフェンの奇妙な半奇数の量子化則に着目した種々の研究をおこなった。

【2】フラストレートした磁性体におけるベリー位相の研究：論文 [1, 9, 10]，講演 [6, 9, 16, 22]

フラストレートしたスピン液体相の対称性の破れによらない分類、特徴付けをめざし、トポロジカル秩序、より広くは量子秩序の概念を用いた研究を行った。本研究においては幾何学的位相に基づくある種の秩序変数の類似物としての量子化ベリー位相を主に用いた研究を行う。そこでは系の励起に有限のエネルギーギャップが存在すること、並びに時間反転対称性が重要である。局所的スピンひねりによるベリー位相をもって量子的局所秩序変数とすると、系に時間反転対称性があるとベリー位相は0または π に量子化する。このベリー位相の量子化値をもって局所的に特徴付けるわけである。これは量子系固有の量であり、古典的対応物を持たない。そのため、通常の相の理論としては明確な区別が困難な相に対しても有効な相分類が行えることとなる。本年度は、上記の各概念の一層の発展を図るとともに、これらをより広範囲なフラストレートしたスピン系における「スピン液体相」に対して適用し、各スピン液体相のより深い理解とフラストレーション起源の量子相転移の記述を目指す研究を行った。特に2次元直交ダイマー系、2次元パイロクロア格子(図2)におけるギャップを持つ量子液体相に対してこの方法を適用し新しい知見を得るとともに、ベリー位相の方法を時間反転対称な系に適用するための理論的枠組みの構築を行った。またより一般にベリー位相のZQ量子化の理論に関しても新しい理論を作った。これは一般のフラストレート系において極めて有用な量子的物理量と考えられる。

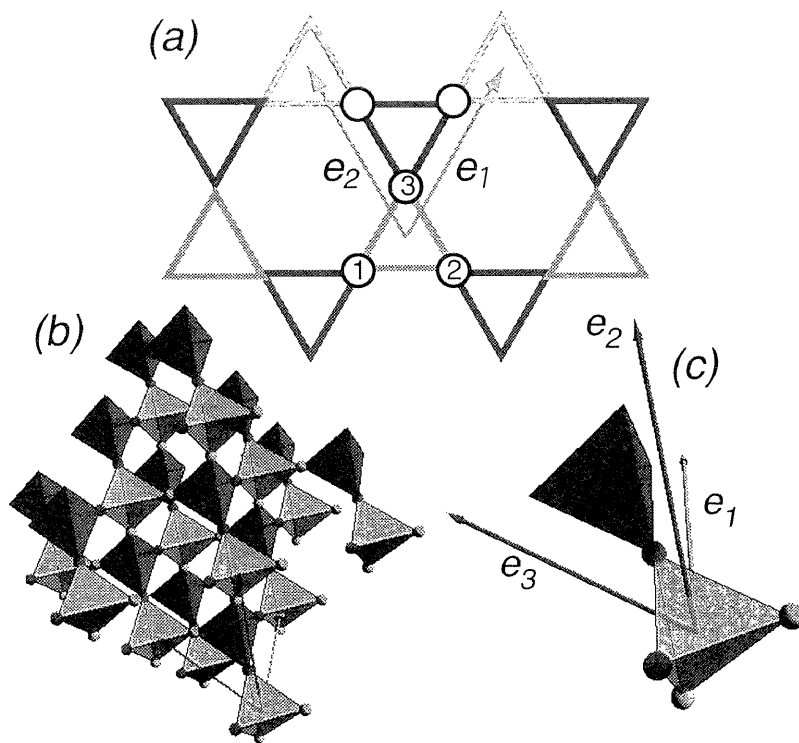


図 2: カゴメ格子とパイロクロア格子の単位胞

【3】量子物質相における対称性の破れを伴わない量子液体相と幾何学的位相の研究：論文 [1,2,9,10], 講演 [2,4,8,10,11,14,15,17,19,20,26,27]

「量子液体相」は、古典的物理量で表現できる特徴的な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る。この観点に立ち、「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構築し、具体的な量子系の分類、特徴付けを行った。また Dirac フェルミオンとしての特異なエネルギー分散に起因する特異な幾何学的位相を示すグラフェンも本研究の重要な一部であり集中的な研究を行った。本年度は具体的に以下のような研究を行った。(1) グラフェンに関して、幾何学的位相が寄与する典型的な物理量としてのホール伝導度の計算を行った。特に乱れのあるグラフェンに対してカイラル対称性と $n=0$ ランダウ準位のトポロジカル安定性に着目し、一般の Dirac Fermion の電子構造に関する研究をおこなった。これは一般のゼロギャップ半導体の理論に対応する。(2) 量子化ベリー位相ならびにその拡張に関する研究を行い、Z₂ ベリー位相によるスピン液体相の分類をリング交換模型、直交ダイマー模型、BEC-BCS クロスオーバーの現象等に関して行い、有意義な成果を得た。(3) 超伝導相におけるトポロジカルな効果に関して詳細な理論的研究を行った。(4) 対称性により守られた一般の位相不変量を構築する一般論をつくり、その具体的な例として一般次元のフラストレートした電子系に対する Z_Q ベリー位相を具体的に計算しその有効性を確立した。また、研究プロジェクトの最終年度であることに鑑み研究全体のまとめと今後の展開に留意した研究を行い、またその成果を広く公開することにつとめた。

【4】トポロジカル絶縁体におけるクラマース縮退とベリー位相の研究：論文 [1,10], 講演 [9,16,22]

四元数 (Quaternion) が時間反転対称性と密接に関係していることは、Dyson による一連の研究以来の既知の事実であるが、今年度は、時間反転対称な量子系に固有のクラマース縮退による多重項に対して定義される幾何学的位相 (ベリー位相の拡張) と、その非可換ゲージ構造においても四元数表示が極めて有効かつ本質的な役割を果たすことを明確化し幾何学的位相の Z₂-量子化に対する一般理論を公表した。この新規かつ独創的な芽生え期の発想を理論的に深く追求し、その基礎を確立することを目指す研究を行った。この手法はクラマース縮退をともなう量子液体相 (トポロジカル秩序相) において広く適用可能であり、量子スピホール相など時間反転とクラマース縮退が本質的な量子液体相の問題における大きなブレークスルーに至ることを最終的な目標とする研究である。

また、第一原理計算と融合した位相不変量によるホール伝導度の計算手法とその応用に関する基礎的論文を完成させ、その応用に関する研究も行った。

<論文>

1. "Topological aspect of graphene physics", Y. Hatsugai, J. Phys. Conf. Series, to appear, arXiv:1008.4563.
2. "Manipulation of the Dirac cones and the anomaly in the graphene related quantum Hall effect", H Watanabe, Y Hatsugai, H Aoki, J. Phys. Conf. Series, to appear, arXiv:1009.1959.
3. "Edge states in graphene quantum Hall system with bond vs potential disorder", M. Arikawa, H. Aoki, Y Hatsugai, J. Phys. Conf. Series, to appear.
4. 「トピックス グラフェンの魅力：新素材の可能性を越えて」、初貝安弘, 日本分光学会学会誌分光研究, 60, 1, 22-23, (2011).

5. "Anomalous criticality in the quantum Hall transition at $n = 0$ Landau level of graphene : The role of disorder preserving chiral symmetry", T. Kawarabayashi, T. Morimoto, Y. Hatsugai, H. Aoki, Phys. Rev. B82, 195426 (2010).
6. "Half-integer contributions to the quantum Hall conductivity from single Dirac cones", H. Watanabe, Y. Hatsugai, H. Aoki, Phys. Rev. B82, 241403(R) (2010).
7. 「グラフェンの物理」, 初貝安弘、青木秀夫, 固体物理, 45, 9, 457-476, (2010).
8. "Scattering of Dirac Fermions with Doubling", Y. Hatsugai, JPSJ Online—News and Comments, September 10, (2010), http://jpsj.ipap.jp/news/jpsj-nc_74.html
9. "Topological quantum phase transition in the BEC-BCS crossover", M. Arikawa, I. Maruyama and Y. Hatsugai, Phys. Rev. B82, 073105 (2010)
10. "Symmetry protected Z_2 quantization and quaternionic Berry connection with Kramers degeneracy", Y. Hatsugai, New J. Phys. (Invited article : Focus on topological insulators), 12, 065004,(2010)

<著書>

1. 初貝安弘, 「書評：問題例で深める物理 (香取眞理・中野徹共著)」, 数理科学, 59, 2月号 (2011)

<講演>

1. 「断熱不変量としての ZQ ベリー位相の応用」, 初貝安弘, 丸山勲, 日本物理学会第 66 回年会 (震災により Web 公開のみ)
2. 「波束ダイナミクスにおけるスピントランスファートルク」有川晃弘, 岩田潤, 初貝安弘, 白石賢二, 日本物理学会第 66 回年会 (震災により Web 公開のみ)
3. 「磁場中グラフェンにおける多体問題の厳密対角化」濱本雄治, 初貝安弘, 青木秀夫, 日本物理学会第 66 回年会 (震災により Web 公開のみ)
4. 「傾いたディラックコーンの $n=0$ ランダウ準位における異常性とカイラル対称性」河原林透, 初貝安弘, 森本高裕, 青木秀夫, 日本物理学会第 66 回年会 (震災により Web 公開のみ)
5. (Invited) "Dirac Fermions with electron-electron interaction in Graphene", Y. Hatsugai, ISIMS-2011 The Third International Symposium on Interdisciplinary Materials Science, (2011), March 10, Epochal Tsukuba
6. " Z_2 topological number of local quantum clusters in the orthogonal dimer model", I. Maruyama, S. Tanaya, M. Arikawa, Y. Hatsugai, International Conference on Frustration in Condensed Matter (ICFCM), (2011) Jan. 11, Sendai International Center, Sendai, Japan.
7. (Invited) "More than new material", Y. Hatsugai, Speaker in the session "Advances in Graphene-Based Science and Application", 12th Japanese-American Frontiers of Science (JAFoS) Symposium (2010) Dec. 4, Kazusa Arc, Chiba, Japan
8. "Wave packet dynamics in the spin torque transfer", 有川晃弘, 初貝安弘, 白石賢二, 第 15 回 半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-15, (2010) Dec. 21, 筑波大学計算科学センター

9. 「二次元パイロクロア格子上的 $S=1/2$ ハイゼンベルグ模型に対する Z_2 ベリー位相を用いた相同定」 棚谷翔、有川 晃弘、丸山勲、初貝安弘、第 4 回 物性科学領域横断研究会 (2010) Nov. 13, 東京大学武田先端知ビル 5F 武田ホール
10. (Invited) 「グラフェンにおけるトポロジカルな効果とバルクエッジ対応」 初貝安弘、名古屋大学大学院理学研究科物理学教室談話会, (2010) Dec. 9, 名古屋大学大学院理学研究科 物理学教室
11. 「ベリー位相の ZQ 量子化」 初貝安弘、丸山勲、日本物理学会 2010 年秋季大会 (23pTE-6) 2010 年 9 月 23 日, 研究発表 大阪府立大学
12. 「グラフェン関連模型における半整数量子ホール効果への分解」 渡辺悠樹、初貝安弘、青木秀夫、日本物理学会 2010 年秋季大会 (23aXA-10) 2010 年 9 月 23 日 研究発表, 大阪府立大学
13. 「グラフェン端状態のカイラル対称性の破れに対する安定性」日本物理学会 2010 年秋季大会 (23aXA-7), 2010 年 9 月 23 日, 研究発表 有川晃弘、青木秀夫、初貝安弘 大阪府立大学
14. 不規則 2 層グラフェンのランダウ準位におけるカイラル対称性の効果 日本物理学会 2010 年秋季大会 (24pRA-6), 2010 年 9 月 24 日, 研究発表 河原林透、初貝安弘、青木秀夫 大阪府立大学
15. 開いた軌道の磁氣的破壊と量子ホール効果 日本物理学会 2010 年秋季大会 (24aTE-6), 2010 年 9 月 24 日, 研究発表, 新井正男、初貝安弘 大阪府立大学
16. $S=1/2$ 二次元パイロクロア格子における Z_2 ベリー位相 日本物理学会 2010 年秋季大会 (25aTE-12), 2010 年 9 月 25 日, 研究発表, 棚谷翔、有川晃弘、丸山勲、初貝安弘 大阪府立大学
17. (Invited) “Topological aspects of graphene physics”, Y. Hatsugai, The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19), (2010) 8 月 6 日, Fukuoka International Congress Center.
18. “Edge states in graphene quantum Hall system with bond vs potential disorder”, M. Arikawa, H. Aoki, Y. Hatsugai, The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19), (2010) 8 月 3 日, Fukuoka International Congress Center.
19. “Topological characterization of 2D orthogonal dimer model”, S.Tanaya, I. Maruyama, M. Arikawa, Y. Hatsugai, The international conference Highly Frustrated Magnetism 2010 (HFM 2010), (2010) 8 月 3 日, The Homewood campus, Johns Hopkins University, USA.
20. “Entanglement entropy of the bond order phase in graphene in magnetic fields”, Mitsuhiro Arikawa, Hideo Aoki, Yasuhiro Hatsugai, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), (2010) July 29, COEX, Seoul, Korea
21. “Robustness of the edge states in graphene quantum Hall system: does the chiral symmetry degraded by t' matter?”, Mitsuhiro Arikawa, Hideo Aoki, Yasuhiro Hatsugai, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), (2010) July 27, COEX, Seoul, Korea
22. “ Z_2 Berry phase in 2D orthogonal dimer model”, Sho Tanaya, Isao Maruyama, Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, XXIV IUPAP International Conference on Statistical Physics (StatPhys24), (2010) July 20, Convention Centre, Cairns, Queensland, Australia
23. “Edge States of Graphene in Magnetic Fields: Effects of Second-Neighbor Hopping”, M. Arikawa, Y.Hatsugai, H. Aoki, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010 (ICSM 2010) (2010) July 7, 京都国際会議会館

24. “Edge States of Graphene in Magnetic Fields: Effects of Second-Neighbor Hopping”, M. Arikawa, Y. Hatsugai, H. Aoki, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010 (ICSM 2010):7D-04 (2010) July 7, Kyoto International Conference Center, Kyoto, JAPAN
25. “Anomalous Criticality at the $n=0$ Landau Level of Graphene: Manifestation of the Chiral Symmetry”, T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, H. Aoki, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010 (ICSM 2010):7D-11 (2010) July 11, Kyoto International Conference Center, Kyoto, JAPAN
26. (Invited) “Dirac fermions, Chern numbers and bulk-edge correspondence in graphene with randomness”, Y. Hatsugai, Localization Phenomena in Novel Phases of Condensed Matter, Abdus Salam ICTP, Trieste, Italy from 17 - 23 May (2010) Abdus Salam ICTP, Trieste, Italy
27. “Chiral Symmetry in Graphene”, Graphene Week 2010 (2010) April 21, Y. Hatsugai, T. Kawarabayashi, T. Morimoto, H. Aoki (presented by Kawarabayashi), College Park, Maryland, USA
28. “Anomalous Quantum Hall effect in graphene and organic-conductors: topological number and semiclassical quantization”, Graphene Week 2010 (2010) April 21, M. Arai, Y. Hatsugai, College Park, Maryland, USA

<社会還元等>

1. 初貝安弘, 理論物理学刊行会, “Progress of Theoretical Physics” 編集委員
2. 東北大学学際科学国際高等研究センター 客員教授 2010年11月～2011年3月
3. 名古屋大学大学院理学研究科, 特別講義, 物性論におけるトポロジカルな概念とその応用 (幾何学的位相とバルクエッジ対応) 2010年11月
4. 東京大学物性研究所共同利用施設専門委員会委員
5. 東京大学物性研究所附属施設物質設計評価施設スーパーコンピュータ共同利用課題審査委員会委員

<外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究 B 課題番号: 20340098 「対称性の破れを伴わない量子液体相:幾何学的位相による理論とその応用」(研究代表者: 初貝安弘)(平成 22 年度直接経費 4,900 千円)
2. 科学研究費 特定領域研究 (A) 課題番号: 22014002 「フラストレートした磁性体におけるベリー位相とその展開」(公募研究) (研究代表者: 初貝安弘)(平成 22 年度直接経費 1,100 千円)