

1 物性理論

1.1 青木研究室

青木研では一貫して、**超伝導**に代表される多体効果や、**トポロジカル系**の理論を主眼に研究を行ってきた。これらの現象では、電子相関によりゲージ対称性が自発的に破れたり、トポロジカル系特有な新奇現象が起きる。面白い物性を面白い物質構造で発現させる**物質設計**も目指している。さらに、強相関系やトポロジカル系において、**非平衡**で生じる顕著な物性を探ることを最近の大きな柱としている。2015年度に青木は定年を迎え、本物理学教室にファカルティとして加わって以来、30年間の研究室活動を完了した。

1.1.1 超伝導

強相関系に対する DMFT+FLEX 法の提案と Hubbard 模型への応用

銅酸化物高温超伝導体の相図で最も顕著な特徴の一つは、電子の band filling に対して T_C が上に凸 (dome 状) になることであるが、満足行く説明はあまりない。2次元斥力 Hubbard 模型における d 波超伝導に対して、揺らぎ交換 (FLEX) 近似は、反強磁性スピン揺らぎに媒介される運動量依存ペアリング相互作用を記述できるが、母物質の Mott 絶縁相を記述できない。他方、Mott 絶縁相を記述できる動的平均場理論 (DMFT) を出発点としたクラスター拡張では小さなクラスター (粗い k 空間) しか扱えない。そこで北谷、辻 (理研)、青木は、DMFT と FLEX を組み合わせて自己無撞着なループを構成することにより、局所的なダイアグラムの寄与を DMFT で、非局所的なダイアグラムの寄与を FLEX で取り込む方法を新たに提案した [2, 21, 32, 33]。この手法を 2次元 Hubbard 模型に適用した結果、 T_C dome を得ることに成功した (図 1.1.1)。Dome の起源は、FLEX で過大評価された自己エネルギーが DMFT で filling 依存して補正されるためである。

平坦バンド超伝導

平坦バンドをもつようなフェルミオン格子模型において、非従来型の超伝導が発現し得るであろうか。小林、町田 (原子力機構)、青木等は、平坦バンドをもつ最も簡単な擬 1次元模型の一つであるダイアモ

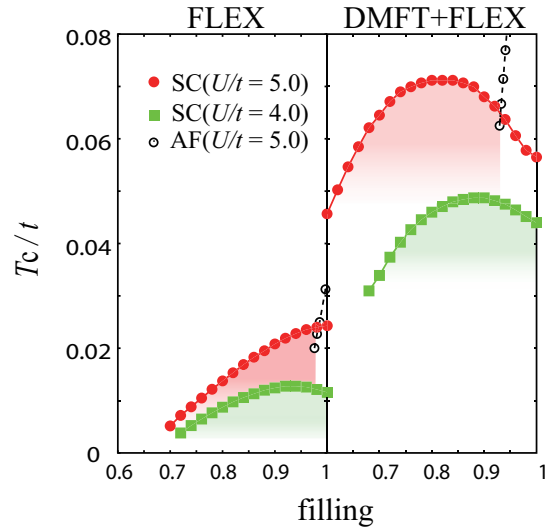


図 1.1.1: FLEX (左) と DMFT+FLEX 法 (右) による T_C vs band filling[2]。

ンド鎖上の斥力 Hubbard 模型に対して、厳密対角化と DMRG を用いて物性を調べた。結果は、電子の全 band filling が $1/3$ (最下バンドが満ち、平坦バンドが空) 近傍でペア相関が発達することを見出した。フェルミ面は無いので、従来のスピン揺らぎ媒介ペアリングとは異なっている可能性がある。

1.1.2 トポロジカル系

光学格子上の冷却原子系に対する第一原理計算とトポロジカル・モット絶縁相

近年、強相関電子系の物理と冷却原子系 (特に光学格子上) の物理が啓発し合い発展している。前者に対しては電子状態計算法は確立しているが、冷却原子系に対する第一原理計算法について北村、辻、青木は、原子間短距離相互作用に対する定式化を、特にスピン構造やトポロジカル構造について制限の無い場合に拡張した。これを用いて、**トポロジカル Mott 絶縁体** (粒子間相互作用のためにフェルミオン系が自発的にトポロジカル絶縁体になる現象) を発生させるための光格子を設計し、第一原理計算によりトポロジカルな性質 (ノンゼロの Chern 数等) を確認した (図 1.1.2) [3, 20]。

グラフェンの量子ホール効果とカイラル対称性

炭素が蜂の巣格子をなすグラフェンは massless Dirac 粒子のバンド分散 (Dirac cone) をもつために興味深

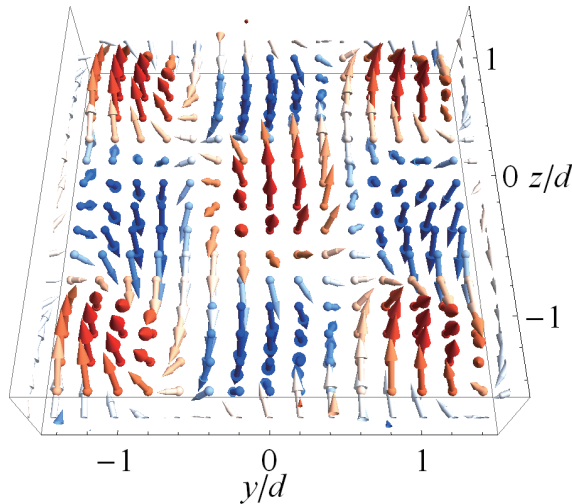


図 1.1.2: 設計された光学格子におけるトポロジカル Mott 絶縁相のトポロジカルな構造 [3]。

く、特に磁場中では丁度ディラック点に $n = 0$ ランダウ準位が存在し、これがグラフェン量子ホール効果においてトポロジカルに保護された性質となる。河原林（東邦大）、初貝（筑波大）、青木は、不規則性を入れたときには、不規則性がカイラル対称性を尊重すれば、この準位はトポロジカルに保護され続けることを示していた。さらに一般的に、ディラック・コーンが傾いており、かつ質量をもつ場合に拡張すると、 $n = 0$ ランダウ準位は質量項のために分裂するにもかかわらず、デルタ関数のままであることが、数値的および解析的に示された [4, 25, 26, 44]。質量項はカイラル対称性を崩すが、 $n = 0$ ランダウ準位の部分空間内では波動関数はカイラル演算子の固有状態であり続けることに起因する。また、ボンド秩序相における vortex の構造も議論した [42, 43]。

シリセンのトポロジカルな解析

グラフェンのシリコン版であるシリセンのバンド構造においては、 sp^2 軌道が支配するグラフェンと異なり sp^3 軌道が混じり、これがフェルミ面付近に多軌道性をもたらす。初貝、白石（名古屋大）、青木は、3次元の sp^3 混成バンドを記述する基本的なモデルである Weaire-Thorpe モデルを拡張することによりシリセンの電子構造を解析的に記述した [5, 27]。Weaire-Thorpe モデルは平坦バンドをもつが、これはシリセンでも幅の狭いバンドとして名残り、ディラック・コーンと共存する。

螺旋面上の Dirac 電子

グラフェンを螺旋面状に巻いたときの電子構造は、螺旋対称の Dirac 電子への影響という場の理論的観

点からも、また螺旋転位をもつグラファイトとの関連からも興味深い。渡邊（現在 Kavli IMPU）、小松（総合文化）、辻、青木は、曲率の効果を取り入れるために zweibein を用いて Dirac 演算子を共変微分に変えて定式化することにより、螺旋面上では Dirac 電子は (i) 曲率から生じる一種のポテンシャルがあるにもかかわらず束縛状態を持たないが、(ii) 位相シフトや局所状態密度（図 1.1.3）には螺旋対称の効果が現れることを示した [6]。

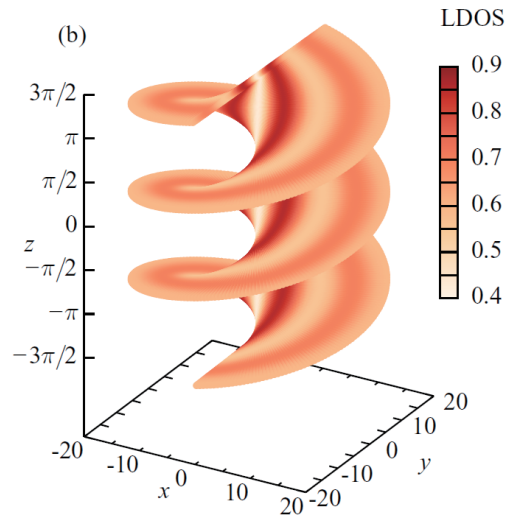


図 1.1.3: 螺旋面上の Dirac 電子の波動関数の局所状態密度 [6]。

Graphitic zeolites における 3 次元 Dirac 電子

グラフェンを 3次元周期的曲面（“graphitic zeolites”）としたときに電子構造はどうなるかという問題を、越野（東北大）、青木は提起した。TB モデルによる解析から、3次元の電子構造は (i) 周期曲面のトポロジー [立方晶か gyroid (図 1.1.4) か、等] に支配され、(ii) 2次元での massless Dirac 点は、3次元構造では massive になり、質量は構造の周期に反比例してスケールし、(iii) 波動関数は、3次元構造では必須のトポロジカル欠陥に振幅が集中することを見出した [7, 34]。

2 層グラフェンにおける電子複屈折

グラフェン中の電子の伝播は、光学における負の屈折にアナログであることが示唆されている。Maksym、青木は、2層グラフェンにおける電子伝播においては、正の屈折と負の屈折を併せもつ複屈折が起き得ることを 4成分 Dirac 方程式から指摘し、現実的なパラメータ領域で興味深い現象がおきることをシミュレーションで示した [45]。

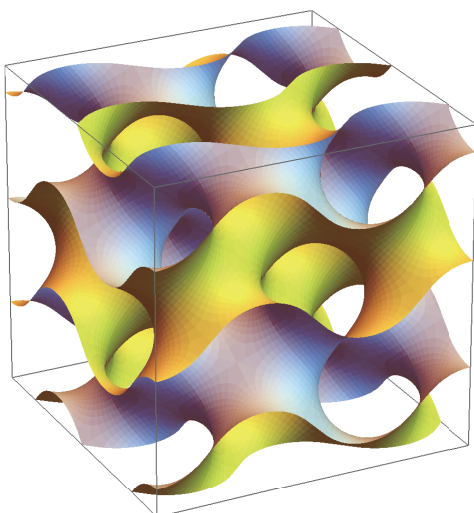


図 1.1.4: Gyroid[7]。

量子ホール系における THz ダイナミクス

量子ホール系の光応答について、「光で見る量子ホール効果」ともいえるべき現象があることは、森本（現在 UC Berkeley）等により理論提案され、島野等により THz 光の Faraday 回転実験観測がなされてきたが、フォトン・エネルギーがサイクロトロン・エネルギーにより近い領域でもこの現象が存在することが Cerne (SUNY Buffalo) の実験グループにより観測され、森本、青木はこの理論解析を行い、光応答のプロットが高振動数でも robust であることを示した [8]。

設計された Metal-Organic Framework における強磁性とトポロジカルな性質

籠目格子は Lieb-Mielke-Tasaki による平坦バンド強磁性の舞台となる。山田（現在物性研）、副島、Dinca (MIT 化学)、辻、平井、青木は、これを、有機物が金属元素により連結された framework (MOF) において、half-filled 平坦バンドという強磁性条件を満たしながら設計し、金を含む新物質でこれが実現することを提案した [9, 28, 41]。強磁性をスピン密度汎関数により確認し、さらにスピン軌道相互作用を考えると、平坦バンドがトポロジカルになることも示された。

1.1.3 非平衡

非平衡現象は、強相関電子系やトポロジカル系において特に興味深い。本年度は以下を行った。

超伝導体における Higgs モード共鳴

超伝導体は、秩序パラメーターの振幅（超流動密度）の集団励起振動モード（Higgs モード）をもつ。Higgs モードは電荷、分極などをもち、線形応答の範囲では電磁場と結合しないため実験観測が困難であったが、2014 年には島野グループにより実験観測され、青木グループにより理論解析された。辻、青木は、(i) 非線形応答まで考慮するとヒッグスと電磁場が結合し、周波数 Ω の光を照射すると周波数 2Ω で s 波超伝導体の秩序パラメーターを強制振動させられること、(ii) 2Ω が Higgs モードの固有周波数である 2Δ (超伝導ギャップ) と一致するとき共鳴が起こり、秩序パラメーターの振動の振幅および三次高調波が共鳴的に発散することについて詳しい理論解析を行った [10, 16]。

杉岡等は、d 波超伝導体の Higgs モードを平均場近似の範囲で理論的に調べ、アンチノードでのギャップの最大値付近に幅の広い Higgs モードの共鳴ピークが存在することを示した。杉岡はこれを修士論文に含めた [53]。

強結合フォノン媒介超伝導体における集団励起

超伝導体中の Higgs モードの解析は BCS 理論によるものが主であり、強結合電子・格子系における理解は十分ではない。特に、遅延効果を含む有効相互作用や、フォノン振動自体との関連の理解は重要である。村上、Werner (Fribourg 大)、辻、青木は、Holstein モデルに対し、非平衡 DMFT と Migdal 近似を用いてフォノン媒介超伝導体の Higgs モードの性質を調べた。結果として、BCS 理論から予言される Higgs エネルギーと超伝導ギャップの関係が強結合においても成立する事が分かった。また、フォノン振動と秩序パラメータとの結合から生じる新たな集団励起モードが存在することも見出した [11, 22, 23, 37, 38]。村上は、これも含め、平衡ならびに非平衡の電子・フォノン結合系についての研究を博士論文にまとめた [52]。

2 バンド超伝導体における集団励起

室谷、辻、青木は、2 バンド超伝導体における Higgs モードおよび Leggett モード（2 個の超流動秩序が逆位相で振動する位相モード）、ならびにそれらと光との共鳴を理論的に調べ、(i) 2 個存在する Higgs モードは異なる共鳴幅をもつ、(ii) Leggett モードは非線形効果により電場により励起され得て、特徴的な温度依存をもつ、などを示し、 MgB_2 での観測可能性について議論した [12]。

非平衡電子・格子相互作用系における電子緩和とフォノン緩和

電子・格子相互作用系を非平衡にして、その後の時間発展を追ったときに、電子とフォノンがそれぞれ

れどのように緩和するかは基本的な問題である。村上、Werner、辻、青木は、最も基本的なモデルである Holstein 模型の緩和現象を非平衡 DMFT を用いて解析した。その結果、電子・格子相互作用を弱結合から中間結合に増やすにつれて、フォノンの方が速く緩和する領域から、電子の方が速く緩和する領域へクロスオーバーすることを見出した [15]。この熱化クロスオーバーは、自己無撞着に結合している非平衡電子の自己エネルギーと非平衡フォノンの自己エネルギーが、電子・格子結合への異なる依存性をもつことから来ている。村上は、この研究も含め博士論文をまとめた [52]。

非平衡超伝導

超伝導においては普通は全運動量がゼロのクーパー対が凝縮するのにに対し、原理的にはノンゼロの対が凝縮しても良いが、磁場中等以外では起きにくい。北村、青木は、引力ハバード模型を時間的に周期的な外場（直線偏光）中に置くと、 η ペアリングと呼ばれる、重心運動量がノンゼロのペアが凝縮した超伝導状態の可能性を見出した [14, 24, 39, 49]。外場の早い時間スケールを繰り込んだ有効ハミルトニアンではホッピングや相互作用は平衡のものとは著しく異なり、特に全運動量 (π, π) の対が凝縮した η ペアリング状態が、動的不安定性を介したプロトコルを用いれば実現することが期待される。

一方、超伝導体に円偏光を照射すると何が起きるであろうか。岡・青木により示されたように、Dirac 電子系に円偏光を照射すると Floquet topological insulator になるが、この超伝導版である。杉岡等は、 $d_{x^2-y^2}$ 波超伝導体は円偏光中では $d_{x^2-y^2} + id_{xy}$ 波超伝導になり得ることを示唆した。杉岡はこれを修士論文にまとめた [53]。

フロッケ・トポロジカル相転移

系を AC 外場で駆動すると生じるフロッケ (Floquet) トポロジカル絶縁体は最近ではトポロジカル絶縁体表面のディラック分散や蜂の巣光学格子上の冷却原子系において観測されている。外場の振動数が十分大きい領域では Floquet 理論により良く理解されているが、外場が低振動数の場合、および電子間相互作用がある場合にどうなるかは分かっていなかった。見上、北村、安田（現在東大物工）、辻、岡 (MPI Dresden)、青木は Floquet 動的平均場理論を用いて、様々な格子模型に円偏光を印加したときの電子状態を計算した [13, 40]。その結果、(i) 理論的枠組みとして、振動数の逆数の展開を Brillouin-Wigner 理論を用いて行くと、任意の次数まで曖昧さのない有効理論が得られ、従来の van Vleck 縮退摂動論や Floquet-Magnus 展開より明快な枠組みとなる、(ii) これを、円偏光照射下の蜂の巣格子、Lieb 格子、籠目格子などに適用すると、外場を変化させるにつて異なるトポロジカル状態間の一連の転移が起きる、(iii) 低振動数に行くと精細な相図が発現する（図 1.1.5）、

(iv) 多体相互作用があると、モット絶縁体とトポロジカル状態間の転移が起きる、などが見出された。

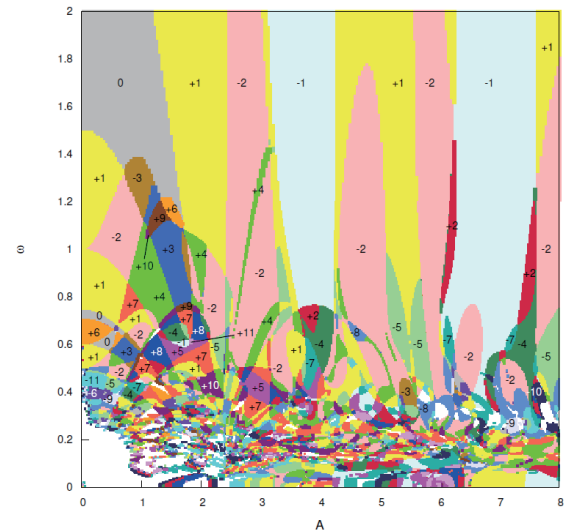


図 1.1.5: 蜂の巣格子に円偏光を当てたときの、光の振動数 (ω) と強度 (A) に対する相図。色や数字は Chern 数 [13]。

1.1.4 その他

青木は本物理学教室での「最終講義」（教室談話会）を「物性物理学のルネサンス — 超伝導、トポロジカル系、非平衡」と題して行った [51]。本物理学教室からの PhD 取得以降 38 年間の研究生活において、343 編の論文 (Phys. Rev. Lett. 34 編、Phys. Rev. B 109 編、ほか JPSJ, Nature, Science, Rev. Mod. Phys. 等) を出版し、総引用数は 1 万回を超える。6 名の助手、助教、21 名の PhD (うち 17 名はアカデミア)、15 名の MSc を送り出した。辻、青木は「超伝導体中のヒッグスモードに関する開拓的理論研究」により、超伝導科学技術賞を受賞した [1]。青木研 OB の酒井志朗氏 (理研)、渡辺悠樹氏 (MIT) は第 10 回日本物理学会若手奨励賞 (領域 8) を受賞した。青木研助教の高吉慎太郎氏は 2015 年 9 月に Geneve 大学 postdoc に転出した。青木は、国際会議招待講演で、高温超伝導への路 [29, 30]、物性物理学における自発的対称性の破れ [31]、トポロジカル端状態 [19]、非平衡電子・電子、電子・格子相互作用系 [17]、有機磁性 [18] について解説し、セミナー講演等も高温超伝導 [35, 36, 50]、超伝導体における Higgs モード [46, 47, 48] について行った。松永、辻、青木、島野は、超伝導体中のヒッグスモードについて解説した [16]。青木は、定年退職後は、ImPACT については本物理学教室で、科研費については産総研 (筑波) にて研究を続ける。

<受賞>

[1] 辻 直人、青木秀夫、第 19 回超伝導科学技術賞。

< 報文 >

(原著論文)

- [2] M. Kitatani, N. Tsuji, H. Aoki: FLEX+DMFT approach to the d-wave superconducting phase diagram of the two-dimensional Hubbard model, *Phys. Rev. B* **92**, 085104 (2015).
- [3] Sota Kitamura, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: An interaction-driven topological insulator in fermionic cold atoms on an optical lattice — A design with a density functional formalism, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 045304 (2015).
- [4] Yasuhiro Hatsugai, Tohru Kawarabayashi and Hideo Aoki: Survival of sharp $n = 0$ Landau levels in massive tilted Dirac fermions — Role of the generalized chiral operator, *Phys. Rev. B* **91**, 085112 (2015).
- [5] Y. Hatsugai, K. Shiraishi and H. Aoki: Flat bands in Weaire-Thorp model and silicene, *New J. Phys.* **17**, 025009 (2015).
- [6] Masataka Watanabe, Hisato Komatsu, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Electronic structure of helicoidal graphene — massless Dirac particles on a curved surface with a screw symmetry, *Phys. Rev. B* **92**, 205425 (2015).
- [7] Mikito Koshino and Hideo Aoki: Dirac electrons on three-dimensional graphitic zeolites — a scalable mass gap, *Phys. Rev. B* **93**, 041412(R) (2016).
- [8] A. V. Stier, C. T. Ellis, J. Kwon, H. Xing, H. Zhang, D. Eason, G. Strasser, T. Morimoto, H. Aoki, H. Zeng, B. D. McCombe, and J. Cerné: Terahertz dynamics of a topologically protected state: Quantum Hall effect plateaus near the cyclotron resonance of a two-dimensional electron gas, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 247401 (2015).
- [9] Masahiko Yamada, Tomohiro Soejima, Naoto Tsuji, Daisuke Hirai, Mircea Dinca and Hideo Aoki: First-principles design of a half-filled flat band of the Kagome lattice in two-dimensional metal-organic frameworks, arXiv:1510.00164.
- [10] Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Theory of Anderson pseudospin resonance with Higgs mode in a superconductor, *Phys. Rev. B* **92**, 064508 (2015).
- [11] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Multiple amplitude modes in strongly coupled phonon-mediated superconductors, *Phys. Rev. B* **93**, 094509 (2016).
- [12] Yuta Murotani, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Theory of light-induced resonances with collective Higgs and Leggett modes in multiband superconductors, arXiv:1511.05762.
- [13] Takahiro Mikami, Sota Kitamura, Kenji Yasuda, Naoto Tsuji, Takashi Oka and Hideo Aoki:

Brillouin-Wigner theory for high-frequency expansion in periodically driven systems — Application to Floquet topological insulators, *Phys. Rev. B*, to be published (arXiv:1511.00755).

- [14] Sota Kitamura and Hideo Aoki: η -pairing superfluid in periodically-driven fermionic Hubbard model with strong attraction, arXiv:1511.07890.
- [15] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Interaction quench in the Holstein model: Thermalization crossover from electron- to phonon-dominated relaxation, *Phys. Rev. B* **91**, 045128 (2015).

(国内雑誌)

- [16] 松永隆佑、辻 直人、青木秀夫、島野 亮: 超伝導体中のヒッグスモード — 高強度テラヘルツ波による検出とヒッグス共鳴第三高調波発生、*固体物理* **50**, 411 (2015)。

< 学術発表 >

(国際会議)

招待講演

- [17] Hideo Aoki: Electron-electron and electron-phonon interactions in and out of equilibrium (*Exploring Extreme Forms of Matter*, Tokyo, Mar 2016).
- [18] Hideo Aoki: Designing flat-band ferromagnets — a path to make organic-based systems magnetic and topological (Int. Conf. *Quantum Magnets 2015*, Crete, Sep. 2015).
- [19] Hideo Aoki: Topological edge states — from cold atoms to organic ferromagnets (*Int. workshop on bulk-edge correspondence & topological phases*, Tokyo, Sep 2015).
- [20] Sota Kitamura: Design of interaction-driven Chern insulator on an optical lattice (*Int. workshop on bulk-edge correspondence & topological phases*, Tokyo, Sep 2015).

一般発表

- [21] M. Kitatani, N. Tsuji, and H. Aoki: DMFT +FLEX approach for the two-dimensional repulsive Hubbard model (*M2S 2015*, Geneva, Aug 2015).
- [22] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Non-equilibrium dynamics of the Holstein model in the superconducting and normal phases (*M2S 2015*, Geneva, Aug 2015).
- [23] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Collective amplitude modes in strongly-coupled phonon-mediated superconductors (*“Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems” Gordon Research Conf.*, Lucca, Feb 2016).

- [24] Sota Kitamura and Hideo Aoki: Eta-pairing superconductivity in periodically driven attractive systems via dynamical instability (“*Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems*” *Gordon Research Conf.*, Lucca, Feb 2016).
- [25] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki: Robust $n = 0$ Landau levels of massive and tilted Dirac fermions (*Graphene Week 2015*, Manchester, June 2015).
- [26] T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai and H. Aoki: Tilted massive Dirac fermions with disorder — anomaly in Landau levels (*EP2DS*, Sendai, July 2015).
- [27] H. Aoki, K. Shiraishi and Y. Hatsugai: Molecular-orbital view of the whole band structure of silicene (*16th NT*, Nagoya, June 2015).
- [28] Masahiko G. Yamada, Tomohiro Soejima, Naoto Tsuji, Daisuke Hirai, Mircea Dincă and Hideo Aoki: First-principles design of a half-filled flat band of the Kagome Lattice in two-dimensional metal-organic frameworks (APS March Meeting 2016).
- (国内会議)
- 招待講演
- [29] 青木秀夫: 高温超伝導への路 — 平衡・非平衡 (ImPACT 未来開拓研究会, 北海道, Oct 2015).
- [30] 青木秀夫: 超伝導増強および制御 — 平衡、非平衡 (CMRC+研究会、KEK、Nov 2015).
- [31] 青木秀夫: 物性物理学における南部理論 (日本物理学会シンポジウム「自発的対称性の破れ: 南部陽一郎先生が拓いた物理と素粒子・原子核・物性の進展」、仙台、Mar 2016).
- 一般発表
- [32] 北谷基治、辻直人、青木秀夫: 2次元斥力 Hubbard 模型における Pomeranchuk 不安定性と超伝導 (日本物理学会、仙台、2016 年 3 月)。
- [33] 北谷基治、辻直人、青木秀夫: FLEX+DMFT 法による 2次元斥力 Hubbard 模型の超伝導 (ImPACT 量子情報技術ワークショップ、市ヶ谷、2016 年 3 月)。
- [34] 青木秀夫: Three-dimensional graphene — helicoidal and zeolitic (「トポロジカル相におけるバルク・エッジ対応の普遍性: 固体物理から冷却原子まで」、筑波、Mar 2016)。
- [35] Hideo Aoki: Barriers and breakthrough for designing higher-Tc superconductivity (ImPACT meeting on RT SC, Tokyo, Feb 2016).
- [36] 青木秀夫: 量子シミュレーションによる高温超伝導の Tc 増強 (ImPACT 全体会議、東京、Mar 2016)。
- [37] 村上雄太、Philipp Werner、辻直人、青木秀夫: 強結合フォノン媒介超伝導体における集団励起モードの動的平均場理論による解析 (日本物理学会、大阪、Sept 2015)。
- [38] 村上雄太、Philipp Werner、辻直人、青木秀夫: Dynamical properties of strongly-coupled phonon-mediated superconductors (第 10 回量子シミュレーション研究会、京都、Oct 2015)。
- [39] 北村 想太、青木 秀夫: 引力フェルミ・ハバード模型における AC 外場に誘起される η ペアリング 超流動 (日本物理学会、仙台、2016 年 3 月)。
- [40] 見上敬洋、北村想太、安田憲司、辻直人、岡隆史、青木秀夫: Brillouin-Wigner 理論に基づく時間に周期的な量子系における高周波数展開 (日本物理学会、仙台、2016 年 3 月)。
- [41] 山田昌彦、副島智大、辻直人、平井大介、ミルシア・ディンカ、青木秀夫: 2次元有機金属構造体における強磁性トポロジカル絶縁体の設計 (日本物理学会、大阪、2015 年 9 月)。
- [42] 河原林透、初貝安弘、青木秀夫: 傾いたディラック電子系におけるボンド秩序の vortex とゼロモード (日本物理学会、大阪、2015 年 9 月)。
- [43] 板垣 諒、初貝安弘、青木秀夫、河原林透ディラック電子系におけるボンド秩序の高次 vortex 近傍の局所状態密度 (日本物理学会、大阪、2015 年 9 月)。
- [44] 河原林透、初貝安弘、青木秀夫: 一般化されたカイラル対称性を持つ格子模型 (日本物理学会、仙台、2016 年 3 月)。
- [45] P. A. Maksym and H. Aoki: Electron propagation in bilayer graphene in the birefringent regime (日本物理学会、仙台、2016 年 3 月)。
- (セミナー (国外))
- [46] Hideo Aoki: Higgs and Leggett modes in superconductors (ETH Zürich, July 2015).
- [47] Hideo Aoki: Collective modes in superconductors — Higgs and Leggett (MPI Dresden, Aug 2015).
- [48] Hideo Aoki: Higgs collective mode and its resonance with nonlinear optics in superconductors (TU Wien, Sep 2015).
- [49] Sota Kitamura: Strong Coupling Expansion for Floquet Systems: Application to Dynamically-Induced η -pairing Superconductivity (MPI Dresden, Nov 2015).
- (セミナー (国内))
- [50] 青木秀夫: 高温超伝導増強への路 (産総研, Jan 2016)。
- [51] 青木秀夫: 最終講義「物性物理学のルネサンス — 超伝導、トポロジカル系、非平衡」、東大、10 March 2016。
- (学位論文)
- [52] Yuta Murakami: Theoretical Study of Electron-Phonon Coupled Systems in and out of Equilibrium (博士論文, 2015 年 12 月)。
- [53] Arata Sugioka: Theory of AC-driven nonequilibrium collective and topological states in d-wave superconductors (修士論文, 2016 年 1 月)。

1 Aoki Group

Subject: Theoretical condensed-matter physics

Members: Hideo Aoki, Shintaro Takayoshi

Our main interests are many-body and topological effects in electron and cold-atom systems, i.e., **superconductivity, magnetism and topological phenomena**, for which we envisage a **materials design** and novel **non-equilibrium** phenomena should be realised. Studies in the 2015 academic year include:

- **Superconductivity**
 - Electron correlation and High-Tc superconductivity [1]
 - Organic and carbon-based superconductors
 - Superconductivity in non-equilibrium [2]
- **Topological systems**
 - Topological Mott insulator designed for cold atoms [3]
 - Topological and chiral properties of graphene and silicene [4-7]
 - Optically detected quantum Hall effect [8]
 - Graphene quantum dot
- **Non-equilibrium phenomena**
 - Non-equilibrium dynamical mean field and dynamical cluster theories
 - Floquet topological insulator [9]
 - Design of organic topological systems [10]
 - Relaxation in electron-phonon systems [11]
 - Higgs modes in superconductors [12,13]

- [1] M. Kitatani, N. Tsuji, H. Aoki: FLEX+DMFT approach to the d-wave superconducting phase diagram of the two-dimensional Hubbard model, *Phys. Rev. B* **92**, 085104 (2015).
- [2] Sota Kitamura and Hideo Aoki: η -pairing superfluid in periodically-driven fermionic Hubbard model with strong attraction, arXiv:1511.07890.
- [3] Sota Kitamura, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: An interaction-driven topological insulator in fermionic cold atoms on an optical lattice, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 045304 (2015).
- [4] Yasuhiro Hatsugai, Tohru Kawarabayashi and Hideo Aoki: Survival of sharp $n = 0$ Landau levels in massive tilted Dirac fermions — Role of the generalized chiral operator, *Phys. Rev. B* **91**, 085112 (2015).
- [5] Y. Hatsugai, K. Shiraishi and H. Aoki: Flat bands in Weaire-Thorpe model and silicene, *New J. Phys.* **17**, 025009 (2015).
- [6] Mikito Koshino and Hideo Aoki: Dirac electrons on three-dimensional graphitic zeolites — a scalable mass gap, *Phys. Rev. B* **93**, 041412(R) (2016).
- [7] M. Watanabe, H. Komatsu, N. Tsuji and H. Aoki: Electronic structure of helicoidal graphene — massless Dirac particles on a curved surface with a screw symmetry, *Phys. Rev. B* **92**, 205425 (2015).
- [8] A. V. Stier et al, Terahertz dynamics of a topologically protected state: Quantum Hall effect plateaus near the cyclotron resonance of a two-dimensional electron gas, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 247401 (2015).
- [9] Takahiro Mikami et al: Brillouin-Wigner theory for high-frequency expansion in periodically driven systems — Application to Floquet topological insulators, *Phys. Rev. B*, to be published (arXiv:1511.00755).
- [10] M. Yamada, T. Soejima, N. Tsuji, D. Hirai, M. Dinca and H. Aoki: First-principles design of a half-filled flat band of the Kagome lattice in two-dimensional metal-organic frameworks, arXiv:1510.00164.
- [11] Y. Murakami, P. Werner, N. Tsuji and H. Aoki: Interaction quench in the Holstein model — Thermalization crossover from electron- to phonon-dominated relaxation, *Phys. Rev. B* **91**, 045128 (2015).
- [12] Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Theory of Anderson pseudospin resonance with Higgs mode in a superconductor, *Phys. Rev. B* **92**, 064508 (2015).
- [13] Yuta Murakami, Philipp Werner, Naoto Tsuji and Hideo Aoki: Multiple amplitude modes in strongly coupled phonon-mediated superconductors, *Phys. Rev. B* **93**, 094509 (2016).

2 4年生 冬学期

2.1 固体物理学 III : 青木 秀夫

1. 序 — ゲージ対称性とトポロジー

2. 超伝導の基礎

2.1 超伝導とは何か

2.2 超伝導の基本的性質

2.3 従来型超伝導 — 背景と現象論

2.4 従来型超伝導 — BCS理論

3. 高温超伝導

3.1 電子相関

3.2 超伝導の電子機構

4. 他の物質における超伝導

5. 整数量子ホール効果

6. 分数量子ホール効果

7. 展望