1　物性理論

1.1　青木

青木は一貫して、**超伝導**に代表される多体効果、ならびに**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、強相関電子系やトポロジカル系に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も大きな柱としている。東大からの定年退職後の 2016 年度からは東大名誉教授として、東大物理学教室ならびに産総研（筑波）において研究を続けている。

1.1.1　超伝導／超流動

電子 nematicity により増強された高温超伝導

平坦バンド超伝導は、さまざまな観点から大きな興味をひいている。Sayyad (ネール研究所、Grenoble、現エルランゲン・マックスプランク研)、北谷（理研、現兵庫県立大)、青木等は、バンド分散に平坦部分をもつ 1 バンド系において斥力相互作用する電子系を考え、格子が三角格子であれば、興味深い電子相関効果が生じるのではないか、という観点で研究した。特に興味は、**電子 nematicity**（多体効果のために、電子構造が、元々の結晶格子より低い対称性に自発的に低下する現象で、**Pomeranchuk 不安定性**とも呼ばれる）が生じた場合に、斥力からの（スピン揺らぎ媒介の）超伝導がどのように影響されるか、また、多体効果のために非フェルミ液体となった場合に、超伝導はどうなるか、という点である。その結果、三角格子において、電子構造が 6 回対称から 2 回対称に低下する Pomeranchuk 不安定性が、バンド・フィリングの広い範囲に亘って実際存在し、そこにおいて、超伝導は、Pomeranchuk 不安定性を禁止した場合（電子構造に 6 回対称を強制した場合）に比べて大幅に増大することを見出した。ペアリング対称性は、通常の $d_{x^2-y^2}$ 波から $s_{x^2+y^2} - d_{x^2-y^2} - d_{xy}$ 波に変化する。Nematicity のために、ペアリング相互作用も増大し、ペアは実空間でコンパクトになる。これらは、非フェルミ液体領域で起きる。

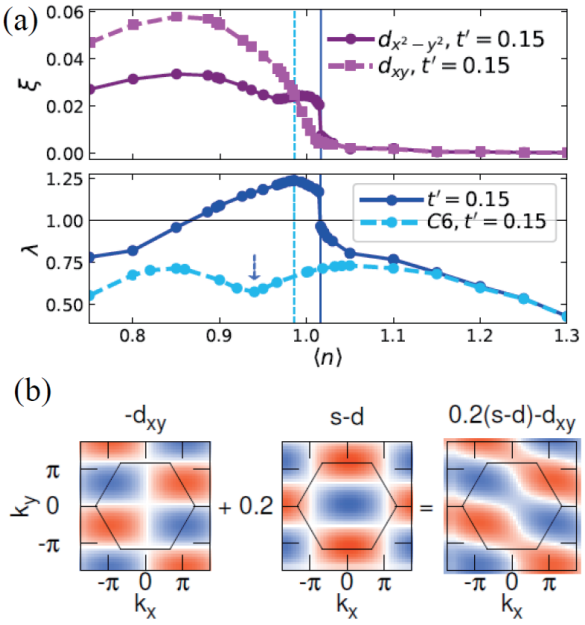


図 1.1.1: 三角格子上で斥力相互作用する電子系における超伝導 [1]。(a) 電子 nematicity(ξ) および超伝導の Eliashberg 固有値 (T_C の指標）λ を、電子のバンドフィリング $\langle n \rangle$ に対してプロット。ξ に対しては、$d_{x^2-y^2}$ 波を実線、d_{xy} 波を破線で、λ に対しては、電子 nematicity （Pomeranchuk 不安定性）を許した場合を実線、禁止した場合を破線で表す。(b) 電子 nematicity 存在下でのギャップ関数（右辺）は、d_{xy} 波と $s_{x^2+y^2} - d_{x^2-y^2}$ 波の混成（左辺）となる。

Incipient 2 バンド系における超流動/超伝導 BCS-BEC クロスオーバー

越智、飯田（高知大)、田島（高知大、現東大）は、有効質量が異なる二つのバンド間にエネルギー・オフセットがあるフェルミ粒子系における超伝導/超流動を理論的に考察した。バンド間にペア散乱相互作用が存在する場合に対して、各バンドのペアリングを **BCS-BEC クロスオーバー**の観点から調べた [2, 13]。2 バンド間にエネルギー・オフセットを導入した場合、超伝導が化学ポテンシャル μ にどのように依存するかを見たところ、重いバンドが incipient な場合 (重いバンドの底が μ 近傍) を境にして、バンド間ペア散乱に媒介された各バンドのペアリング有効相互作用が顕著に異なる振る舞いをすることが分かった。さらにペア散乱相互作用の大きさ、および 2 バンドの質量比を変化させることにより、2 バンド系における有効相互作用の変化と **Feshbach 共鳴**との間にアナロジーがあることを指摘した。

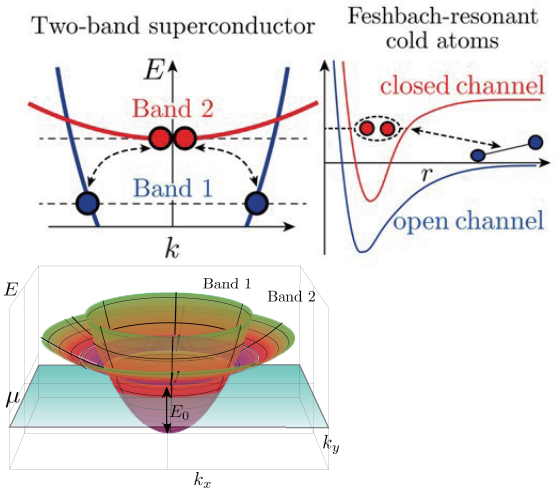


図 1.1.2: 左：電子系において、有効質量の重いバンド（赤）を随伴するバンド（青）におけるペア散乱。右：冷却原子系において、closed channel（赤）を随伴する open channel（青）における Feshbach 共鳴。[2]

1.1.2 非平衡における超伝導

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。岡・青木 [Takashi Oka and Hideo Aoki, Phys. Rev. B **79**, 081406(R) (2009)] が理論的に予言した、グラフェンに円偏光を照射するとトポロジカル絶縁体 (Floquet topological insulator; FTI) になるという現象が、ハンブルクのマックス・プランク研究所の James McIver 等により実証され、Nature Physics に 2020 に出版されたのは記憶に新しい。それでは、超伝導体に円偏光を照射すると何が起きるであろうか。特に、トポロジカル状態が発生するだろうか。北村（東大）と青木は、斥力相互作用をもつ強相関電子系 (d 波超伝導状態）に円偏光を照射すると、光子を発射・吸収することによる遷移、ならびに chiral spin interaction のために、異なる d 波ペアリングが混成し、時間反転を破った**トポロジカル超伝導** ($d_{x^2-y^2}+id_{xy}$ 波) が発生することを理論的に予言した [3]。

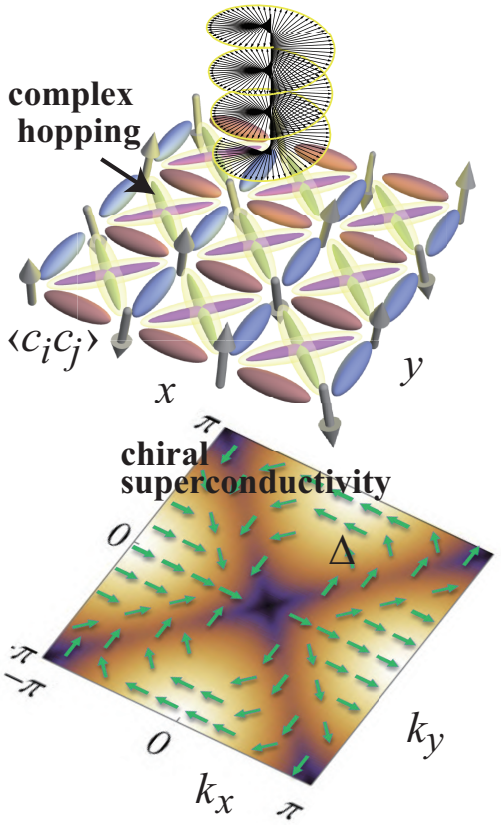


図 1.1.3: 正方格子上で斥力相互作用する強相関電子系の d 波超伝導状態に円偏光を照射すると（上図)、新たなペアリング成分が発生し、時間反転を破ったトポロジカル超伝導 ($d+id$ 波) が生じる（下図、k 空間におけるギャップ関数)。[3]

1.1.3 グラフェン関連物質

ケクレ秩序をもつグラフェンにおけるゼロ・モード

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) をもち、カイラル対称性のために電子状態は特徴的になる。河原林（東邦大)、初貝（筑波大)、青木等は、蜂の巣格子系において、ケクレ秩序が存在する場合（強磁場中で生じる可能性が提案されている）に、質量ゼロのディラックフェルミオンに伴う**ゼロ・モード**が、系に不規則性を導入した場合もロバストに存続することを示した [4] 。

2 層グラフェンおよび遷移金属ダイカルコゲナイドにおける谷偏極およびスピン偏極

グラフェンは、Brillouin zone の K および K' という二領域（谷と呼ばれる）において Dirac cone をもつが、片方の谷の電子が他方の谷の電子より多いという状況（**谷偏極**）を作り出せるかどうかに長年の興味が払われている。Maksym（東大および Leicester 大）と青木は、2 層グラフェンは様々に特異な性質をもつが、これを用いて谷偏極を生み出すことが可能なことを理論的に提案した。鍵となるのは、グラ

フェンでは Dirac cone が三回対称に歪んでおり、そのために波数 (**k**) と電流 (**j**) の方向は一致しない。このずれ方が谷によって異なるので、2 層グラフェンにポテンシャル障壁を加えると、片方の谷が完全反射され、谷偏極が生じる。同様なことは遷移金属ダイカルコゲナイドでも期待され、この物質群の場合はスピン・軌道相互作用が大きいために、谷偏極にスピン偏極が伴うことも予言される。[5]

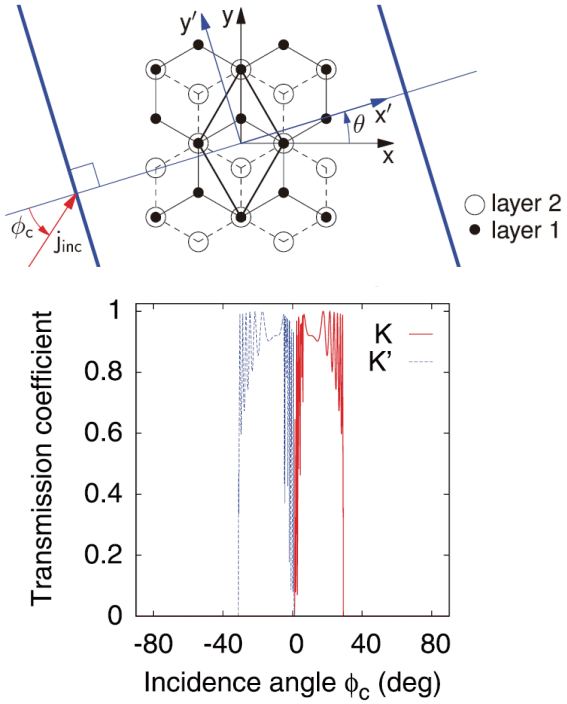


図 1.1.4: 2 層グラフェン（上図）において、ポテンシャル障壁（緑は青線）を通過する透過確率を、電子の入射角 ϕ_c の関数として示す（下図）。実線は K 谷、破線は K' 谷。[5]

周期ポテンシャル中の 2 層グラフェンにおける anti-Klein トンネリング

グラフェンには、“Klein paradox” と呼ばれる奇妙な伝導現象が存在するが、場合によっては、その逆の **anti-Klein tunnelling** と呼ばれる現象も提案されている。Maksym と青木は、2 層グラフェンに周期的なポテンシャルを加えると anti-Klein tunnelling が生じ、平坦バンドも伴うことを見出した [14, 15]

1.1.4 その他

青木は、国際会議等の招待講演において、超伝導とトポロジカル状態のデザインについて [9, 10] 、また平坦バンド超伝導について [11, 12]、報告した。

また、新銅酸化物高温超伝導体 $Ba_2CuO_{3+\delta}$ の多軌道模型に基づく理論について解説し [6]、「物性物理学のルネサンス — 超伝導、トポロジカル系、非平衡」と題した連載を完結した [7, 8]。

＜報文＞

(原著論文)

[1] Sharareh Sayyad, Motoharu Kitatani, Abolhassan Vaezi, and Hideo Aoki: Nematicity-enhanced superconductivity in systems with a non-Fermi liquid behavior, arXiv:2110.14268.

[2] Kazunari Ochi, Hiroyuki Tajima, Kei Iida, and Hideo Aoki: Resonant pair-exchange scattering and BCS-BEC crossover in a system composed of dispersive and heavy incipient bands: a Feshbach analogy, *Phys. Rev. Research* **4**, 013032 (2022).

[3] Sota Kitamura and Hideo Aoki: Floquet topological $d + id$ superconductivity induced by chiral many-body interactions, to be published in *Communications Physics* (arXiv:2108.13626).

[4] Tohru Kawarabayashi, Yuya Inoue, Ryo Itagaki, Yasuhiro Hatsugai and Hideo Aoki: Robust zero modes in disordered two-dimensional honeycomb lattice with Kekulé bond ordering, *Annals of Physics* **435**, 168440 (2021).

[5] P. A. Maksym and H. Aoki: Complete spin and valley polarization by total external reflection from potential barriers in bilayer graphene and monolayer transition metal dichalcogenides, *Phys. Rev. B* **104**, 155401 (2021).

(国内雑誌)

[6] 山崎公裕、越智正之、小倉大典、黒木和彦、青木秀夫：新銅酸化物高温超伝導体 $Ba_2CuO_{3+\delta}$ の多軌道模型に基づく理論、固体物理、**56**, 315 (2021)。

[7] 青木秀夫：物性物理学のルネサンス — 超伝導、トポロジカル系、非平衡（その 3）、固体物理 **56**, 153 (2021)。

[8] 青木秀夫：物性物理学のルネサンス — 超伝導、トポロジカル系、非平衡（その 4）、固体物理、**56**, 209 (2021)。

＜学術発表＞

(国際会議)

招待講演

[9] Hideo Aoki: Designing superconducting and topological systems in and out of equilibrium, DESY theoretical physics symposium 2021 (online/Hamburg, Nov 2021).

[10] Hideo Aoki: Designing topological systems in and out of equilibrium: a perspective, Int. Workshop “Bulk-Edge/Boundary Correspondence 2022 (BE/BC2022)” (online, Feb 2022).

[11] Hideo Aoki: Flatbands as an arena for superconducting and topological properties, IBS Conference on Flatbands (online, Aug 2021).

[12] Hideo Aoki: Flat bands as an arena for designing superconducting and topological systems, PCS IBS Seminar (online, Oct 2021).

(国内会議)

一般発表

[13] Kazunari Ochi, Hiroyuki Tajima, Kei Iida, and Hideo Aoki: Pair-exchange scattering in a BCS-BEC crossover in superconductors having dispersive and incipient heavy bands (SuperFluctuations 2021, June 2021, online).

[14] P. Maksym, H. Aoki: 1D flat mini-bands in bilayer graphene in a periodic array of potential wells （日本物理学会 2021 年 9 月秋季大会、オンライン開催)。

[15] P. Maksym and H. Aoki: 2D flat mini-bands induced by a periodic potential applied to bilayer graphene （日本物理学会 2022 年 3 月年次大会、オンライン開催)。