

青木秀夫の研究活動 (2022-2023)

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。これらの物理系においては、強相関電子系やトポロジカル系に特有な現象が起きる。さらに、強相関系やトポロジカル系において、**非平衡**で生じる新奇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年度からは東京大学名誉教授として研究を続けている。2022-2023年度は以下の研究を行った。

1 2バンド超伝導におけるBCS-BECクロスオーバーとFano-Feshbach共鳴

より高い超伝導相転移温度 T_C を示す物質構造探索の理論指針として、多バンド系や平坦バンド系における超伝導の研究が広く注目を集めている。**平坦バンド超伝導** [1] については、斥力相互作用から生じる高温超伝導が電子 nematicity により増強されることを、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) 等とともに見出し、[2] に出版した。

さらに、田島裕之 (東大理)、Andrea Perali (Università di Camerino)、Antonio Bianconi (RICMASS, Roma) と青木は、2バンド系における超伝導に対して、メインバンド上の超伝導形成が、随伴するバンドとの間のペア散乱の為にどのように増強され得るかを、以下のように調べた [3, 12]。引力相互作用をもつ2バンド系において、有効質量の大きいバンドが化学ポテンシャル近傍に位置する incipient な状況を考えると、異なるバンド間のペア散乱が、**Feshbach 共鳴** (図1) による強い引力相互作用を生み出し [4]、化学ポテンシャルの変化に応じて、弱結合BCS超伝導から強束縛電子対の Bose-Einstein condensate (BEC) へのクロスオーバーが実現される。しかし、こうした強結合領域にある多バンド超伝導を含め、一般に T_C の評価は、揺らぎの効果を考慮すると大幅に下がる場合が多々ある。揺らぎを扱う方法の一つに、Gor'kov-Melik-Barkhudarov (GMB) [Sov. Phys. JETP **13**, 1018 (1961)] によって定式化された粒子-正孔揺らぎを扱う理論があり、この方法論では、揺らぎを particle-particle および particle-hole の両チャンネルに亘って取り入れる。これが2バンド超伝導ではどのような効果をもたらすかは今まで明らかでなかった。田島等は、先ずこれを定式化し、重い **incipient バンドをもつ2バンド系** に適用したところ、特にBCS-BECクロスオーバー領域において、particle-hole 揺らぎと Feshbach 共鳴との競合により、 T_C が2バンドの質量比に対してドーム状となり (図2)、最適な有効質量が存在することが示された。さらに、重いバンド直下に束縛状態が生じ、これに伴う **Fano 共鳴** が存在し、化学ポテンシャルがこの共鳴近傍に位置する場合に particle-hole 揺らぎによる T_C の減少が抑えられることも示された。

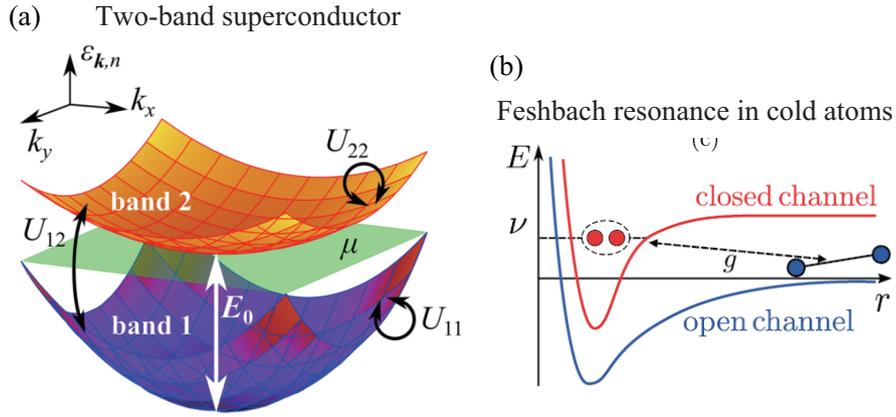


Figure 1: (a) 有効質量の重いバンド（赤）を随伴するバンド（青）から成る電子系において、バンド内ペア散乱 (U_{11}, U_{22}) およびバンド間ペア散乱 (U_{12}) が存在する模型。 μ は化学ポテンシャル、 E_0 はバンド・オフセット。(b) 冷却原子系において、 closed channel（赤）を随伴する open channel（青）における Feshbach 共鳴。 横軸 r は 2 原子間の距離、 g は Feshbach coupling、 ν は束縛状態の準位。 [3, 4]

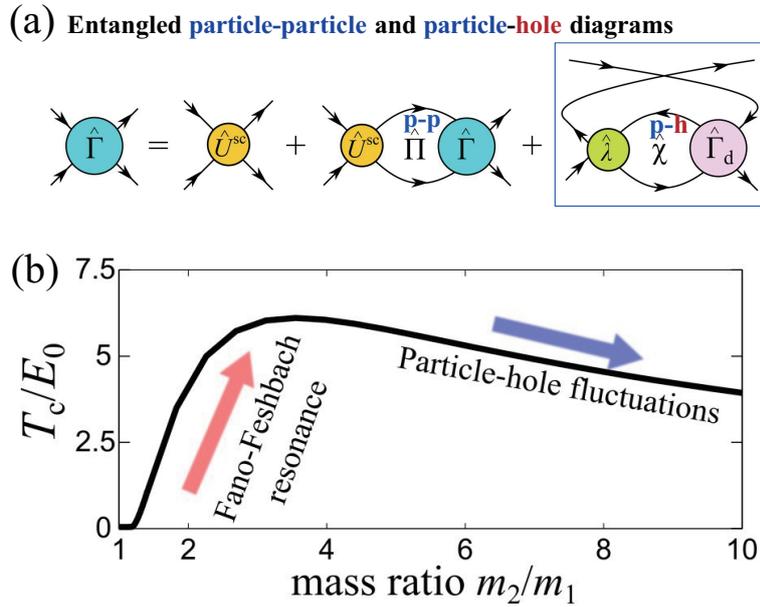


Figure 2: (a) GMB 理論において、 particle-particle および particle-hole の両チャンネルを取り込むペアリング相互作用のダイアグラム。 2 バンド系においては、各 vertex は 2×2 行列となる。(b) 2 バンド系（重い質量 m_2 のバンドと、軽い質量 m_1 のバンドから成る）において、GMB 理論から評価された超伝導転移温度 T_C を、質量比 m_2/m_1 に対してプロット。 m_2/m_1 を増やすと、 T_C は初めは上昇するが、増やし過ぎると減少に転じる。 [3]

2 強相関電子系に対するサブサイクル多次元分光

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。2023年度は以下を行った。近年、強相関電子系に強いレーザーを照射したときに、電子系と光の結合が新たな量子状態を発生させ得るために、強い興味もたれている。これをキックオフした一つの研究は、岡隆史と青木により2009年に提案された、Floquet topological insulator (フロケ・トポロジカル絶縁体)の理論提案であり、爾来**Floquet engineering**と呼ばれる分野となっている。従来は、電子系に、連続光あるいは数サイクルのレーザー・パルス照射したときの応答が主に研究されてきた。青木は、HamburgのEuropean XFEL (ヨーロッパX線自由電子レーザー)およびHamburg大学のAlexander Lichtensteinのグループ、Olga Smirnova (Max-Born-Institut, Berlin)のグループ等と共同で、強相関電子系に1サイクル、あるいはそれ以下(**sub-cycle**)という極端に短いレーザー・パルス照射したときに、電子系と光の結合がどのような量子状態を発生させるかを理論的に調べた[5]。これは、超短時間(sub-femtosecond)における強相関電子状態の操作として興味もたれる。この研究では、**非線形多次元分光**という方向を導入した。ここで多次元と呼ぶのは、carrier-envelope phaseという制御変数を新たな自由度として分光する、という意味である。これにより、エネルギー軸上では、下部および上部Hubbardバンド、準粒子などからなる相関電子状態スペクトル、空間上では様々なサイズをもつ量子状態がどのように制御されるか(図3)、特に、レーザー・パルス照射の後でも残存する量子状態を調べた。銅酸化物高温超伝導体を念頭に、**非平衡DMFT** (non-equilibrium dynamical mean-field theory)を用いて計算した結果、多次元分光スペクトルは、多彩な相関電子状態の間の電荷やエネルギーの流れを敏感に反映し、また、超短レーザーによって生成された量子状態は、多電子応答の集団的效果として長時間生き残ることも分かった。

このような分光は、強相関電子状態の観測や、従来のFloquet engineeringを超えた制御として強力であり、強相関効果の理解の鍵ともなり得ることが示唆された。

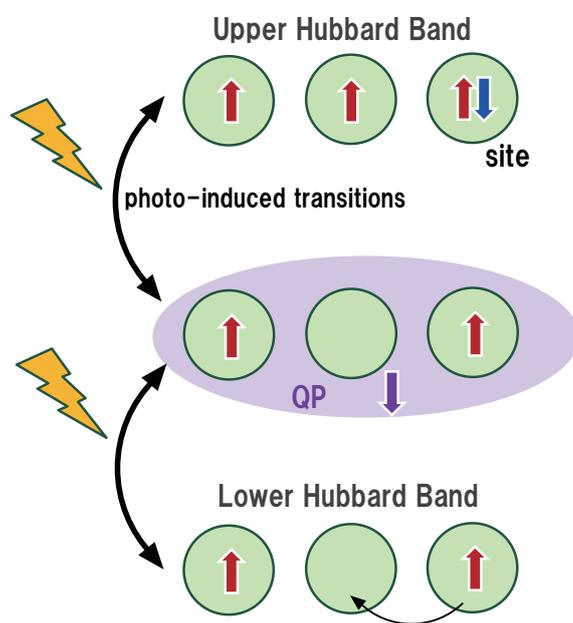


Figure 3: 強相関電子系の多体状態と、光による励起の概念図。多体状態は、下部および上部 Hubbard バンド、準粒子 (QP) から成る。両方向矢印はレーザーによる励起。[5] に基づく。

3 その他

青木は、*Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, 2nd edition という百科事典の編集委員の一人を務めた [6]。また、*Comprehensive Semiconductor Science & Technology*, 2nd edition のために、整数量子ホール効果 (Integer quantum Hall effect) の総説 [7] を執筆した。さらに、「超伝導の物理学」という単行書を執筆した [8]。

青木は、国際会議の招待講演において、超伝導やトポロジカル系について報告した [9, 10, 11]。

References

<報文>

(原著論文)

- [1] H. Aoki: Theoretical possibilities for flat-band superconductivity, *J. Supercond. Nov. Magn.* **33**, 2341 (2020).
- [2] Sharareh Sayyad, Motoharu Kitatani, Abolhassan Vaezi, and Hideo Aoki: Nematicity-enhanced superconductivity in systems with a non-Fermi liquid behavior, *Journal of Physics: Condensed Matter* **35**, 245605 (2023). [Selected in “Celebrating the impact of research published through the Max Planck transformative agreement in 2023”.]
- [3] Hiroyuki Tajima, Hideo Aoki, Andrea Perali, Antonio Bianconi: Emergent Fano-Feshbach resonance in two-band superconductors with an incipient quasi-flat band: Enhanced critical temperature evading particle-hole fluctuations, *Phys. Rev. B Letter* **109**, L140504 (2024).
- [4] 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).
- [5] V. Valmispild, E. Gorelov, M. Eckstein, A. Lichtenstein, H. Aoki, M. Katsnelson, M. Ivanov and O. Smirnova: Sub-cycle multidimensional spectroscopy of strongly correlated materials, *Nature Photonics* **18**, 432 (2024). [Featured by Eleftherios Goulielmakis: News & views — Attosecond photonics Sub-cycle photonics in correlated materials, *Nature Photonics* **18**, 407 (2024).]

(国際出版)

- [6] T. Chakraborty, Ana M. Sanchez, Hideo Aoki, Robert H. Blick, Roberto Raimondi, Rudolf A. Roemer, and Vladimir Mihajlovic Fomin (editors): *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, 2nd edition. (Elsevier, 2023).
- [7] Hideo Aoki: Integer quantum Hall effect, in *Comprehensive Semiconductor Science & Technology*, 2nd edition (Elsevier), to be published.

(国内出版)

[8] 青木秀夫：「超伝導の物理学」（裳華房、2024 出版予定）。

< 学術発表 >

(国際会議招待講演)

[9] Hideo Aoki: Engineering topological superconductivity in and out of equilibrium, Int. Conf. “Superstripes2022”, Frascati/online, 21 June 2022.

[10] Hideo Aoki: Engineering superconducting and topological systems in and out of equilibrium, Int. Workshop “CORPES 2022”, online, 14 July 2022.

[11] Hideo Aoki: Floquet generation of topological superconductivity and magnetism in the strong-correlation regime, Int. Conf. “Superstripes2023”, Ischia, 26 June 2023.

(国内会議一般発表)

[12] 田島裕之, 青木秀夫, Andrea Perali and Antonio Bianconi : 質量が重い incipient バンドをもつ 2 バンド超伝導における Fano-Feshbach 共鳴と粒子正孔揺らぎの競合から生じる Tc ピーク、日本物理学会、北海道、Sept 2024。