

「光誘起相転移の現在と未来」

光が生み出す電子的、構造的コヒーレンスは

どこまで協同現象を制御できるのか？

(東京科学大(東工大) 理) 腰原 伸也

Koshihara.s.aa@m.titech.ac.jp

物質科学やその基礎を構成する物性物理学、物理化学は、豊かな物質的文化の果実をもたらして来た。従来の物質設計は、主に安定な構造に基づいていた。この概念的、理念的限界を突破するべく、「変化」し「揺らいでいる」物質の構造とそれに伴うエネルギー状態の変化が本質的な役割を担う、「非平衡状態」における物質の特性や、その発現機構解明を行おうとする試みが、光誘起相転移 (Photoinduced Phase Transition :PIPT) 現象の研究である。

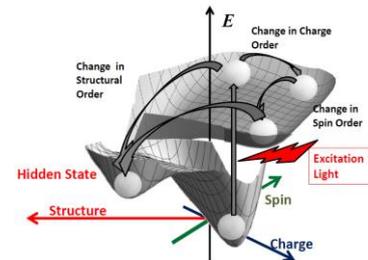


図1：光子エネルギーの注入で起きる光誘起相転移の概念図|4|

PIPT 研究は、その励起に用いる「光子」の性質をどのように活かすかで、ごく粗く、以下のような3段階に分類できると講演者は考えている。本日の講演ではこのうち第二段階の後半のコヒーレントフォノン (フォノンクス) による PIPT 制御と第三段階の電子コヒーレンスも関与する最近の PIPT 制御を中心に議論を行いたい。

第一段階 (1990–2000 年ごろ)：もっぱら光をエネルギー注入のために用いた、PIPT 研究初期の段階[1-3] (図1 参照)。

第二段階 (2000–2015 年ごろ)：遷移金属酸化物や電荷移動錯体等、強相関電子系、強電子–格子結合系の物質相制御へと拡張の時代[4-9]。この時期に飛躍的に発展普及した fs 超短パルスレーザー、超短パルス X 線源としての放射光、自由電子レーザー、さらには ps–fs 光電子観測、電子線技術が極めて重要な役割を果たした。それら新光源、観測技術の利用によって、光誘起強誘電状態 [5]、様々なコヒーレントフォノンを利用した物質相制御が達成された。その中には、光メモリー材料の相制御[6]や、超伝導性の制御[7]なども含まれ、フォノンクスの名称で集中的な研究が世界的にも現在進行中である[8]。さらに今日では光による励起子絶縁体相の制御にも至っている[9]。本講演では日本で大きく発展した光メモリー物質のフォノンクス制御、欧州を中心に進展しつつある THz 光源によるフォノン励起を利用した光誘起超伝導現象について紹介する。

第三段階 (2015–現在 (将来))：この超高速の構造制御に伴う電子状態の変化を 10fs のレーザーで観測している過程で、物質系の電子状態と、外部の励起光とのコヒーレントな結合 (物質場と光子場の結合・協奏) が PIPT 現象に重要なことが明らかとなった[4]。つまり光子のエネルギー量子としての利用から、その光の量子振動としての特性

を利用する形に進化することとなったのである(図2)。この種の研究の進展には、THz 光技術に加えて、さらなる光の超短パルス化とその構成電磁波の位相制御技術の進歩が重要であるとは言うまでもない。このような状況に更なる大きな一石を投じたのが、フロッケ状態、動的局在などの理論面での進展である[10, 11]。これらの理論からの提案をきっかけに、トポロジカル絶縁体バンド構造

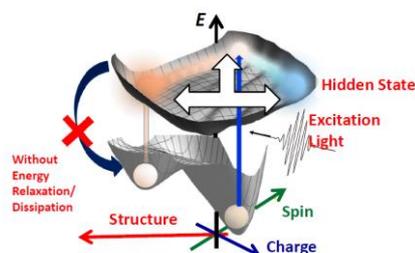


図2：物質場と光子場の結合・協奏が生み出す、光誘起相転移コヒーレント制御の概念図[4]

の超高速制御をはじめ[12]、強光電場による瞬間的な電子の局在化による金属-絶縁体転移[13]、さらには高強度 THz 光による強相関誘電体の超高速誘電性制御[14]、金属有機構造体 (MOF : Metal Organic Frameworks) における光誘起による局所的反転対称の超短時間での破れ[15]等、励起光と電子状態がコヒーレントに連携した、新しい非平衡物質相の発見が相次いでいる。超高速コヒーレント相制御の扉がまさに開かれつつある。

以上のように、物質開発と観測技術の連携によって、PIPT は「光エネルギー」の単純な利用から、「光量子振動」の特性活用へと進みつつある。物質相制御の速さは、電子コヒーレント制御の特性を活かしてアト秒域に至る例が発見されており[16]、今後 光位相制御技術 (CEP) の進展によって、飛躍的發展が期待されている。さらに、パルス幅圧縮の結果として、THz から軟 X 線に至る広範な波長域の物質応答が一気に観測可能となりつつある。講演では、強相関電子系の特徴である広範な波長領域での多種の電子状態の協働的変調と、光源の発展が協力することで生み出すであろう、新しい量子相制御や光電機能材料開拓などの「夢」に関してもコメントしたい。

- [1] S.Koshihara et al. Phys. Rev. Lett. 68 (1992) 1148. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.1148>.
- [2] O.Sato et al. Science 272 (1996) 704-705. <https://doi.org/10.1126/science.272.5262.704>.
- [3] K.Ichimura, Chem. Rev. 100 (2000) 1847-1874. <https://doi.org/10.1021/cr980079e>.
- [4] S.Koshihara et al. Physics Reports 942 (2022), 1-61, <https://doi.org/10.1016/j.physrep>.
- [5] E.Collet et al. Science 300 (2003) 612-615. <https://doi.org/10.1126/science.1082001>
- [6] K.Makino et al. Opt. Express 19 (2011) 1260-1270. <https://doi.org/10.1364/OE.19.001260>.
- [7] D. Fausti et al. Science 331 (2011) 189-191. <https://doi.org/10.1126/science.1197294>.
- [8] M. Först et al. Nat. Phys. 7 (2011) 854-856. <https://doi.org/10.1038/nphys2055>
- [9] K.Okazaki et al. Nat. Commun. 9 (2018) 4322. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06801-1>.
- [10] T.Oka and S.Kitamura, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 10 (2019) 387-408. <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031218-013423>
- [11] K.Nishioka and K.Yonemitsu, J. Phys. Soc. Jpn 83 (2014) 024706. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.83.024706>.
- [12] Y. H. Wang et al. Science 342 (2013) 453-457. <https://doi.org/10.1126/science.1239834>.
- [13] T.Ishikawa et al. Nat. Commun. 5 (2014) 5528. <https://doi.org/10.1038/ncomms6528>.
- [14] Y.Okimoto et al. Phys. Rev. Appl. 7 (2017) 064016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.7.064016>.
- [15] S.Banu et al. Advanced Optical Materials 12 (2023) 2301554. <https://doi.org/10.1002/adom.202301554>
- [16] K.Onda et al. Acc. Chem. Res. 47, 12 (2014) 3494. <https://doi.org/10.1021/ar500257b>