

光と強結合したトポロジカル物質の非平衡状態・励起状態の物性研究

日野 健一、前島 展也

[本研究は、JSPS KAKENHI Grants (No. JP 19K03695) による研究費支援の基に現在進行中である。よって、研究結果に関しては、学術論文に掲載後に随時更新する。]

1. 研究背景

トポロジカルな（以下、適宜トポと略称）絶縁体、半金属、磁性体、超伝導体などのトポ物質には、物質の対称性（時間反転、パリティ、鏡映等の対称性）を反映したトポ秩序が内在し、それに伴い表面には直線的なバンド分散の交差（ディラック交差）が生じる。トポ秩序は、バルクバンドの波動関数のパリティが波数空間で部分的に反転して生じるバンド構造のねじれに起因する。ディラック交差の電子状態（エッジ状態）は表面端に局在した特異な状態である。これは対称性で保護された擾乱に対して頑強であるため、通常の固体中の電子では不可能な物性を引き起す。さらに、バルクバンド反転を制御することにより、エッジ状態の発生・消失を伴うトポ相転移を誘起することができる。現在、トポロジカルに自明（通常物質）か非自明（トポ物質）の観点から、固体物理学のパラダイムの再構築が進行している。また、エッジ状態の特性に着目して、新規機能を有するトポ物質の広範な探索と応用へ向けた追究が世界レベルで精力的に行われている。

これまでのトポ物質研究の対象は主として基底状態であり、非平衡状態および励起状態におけるトポ物性は未開拓領域である。それゆえに、これに向けた研究は未知な潜在力を秘めた広大な原野への挑戦と言える。最近、表面プラズモンや電荷密度波などの電子相の素励起を対象としたトポ物性研究が報告されているが、非平衡状態・励起状態を形成するための最も有効な手段は「光」であり、最近これらのバンド構造にトポ秩序が発現するという報告がある。具体的には、連続波(cw)レーザーを絶縁体・半導体に照射して生成する光着衣状態（フロケ状態）の擬エネルギーフォトンサイドバンド(PSB)構造や電子・正孔対の複合状態である励起子のバンド構造およびこの励起子と光子の連成波であるポラリトンのバンド構造において、トポ秩序発現の可能性が見出されている。ここでは、これらをそれぞれフロケトポ絶縁体、トポ励起子およびトポポラリトンと呼ぶことにする。これらの非平衡状態・励起状態におけるトポ物質の研究は緒に就いたところであり、更なる理解の深化が必要である。

2. 研究目的

本研究では、フロケトポ絶縁体、トポ励起子およびトポポラリトンに内在する基礎物性や多体効果を理解することを目的とする。物質系はタイプ III 半導体量子井戸（井戸層 HgTe および障壁層 CdTe）とする。この物質は2次元のバルクバンド構造を形成し、井戸層の膜厚(d)が臨界幅(d_{cr})より大きくなる($d > d_{cr}$)と、トポロジカルに自明な相からトポロジカルに非自明な相（時間反転対称性が保持されたトポ絶縁体）へと相転移する。具体的な目的は以下のとおりである。

(1) フロケトポ絶縁体

- ・レーザーに駆動された量子井戸 [自明($d < d_{cr}$)とする] におけるフロケ状態の擬エネルギーバンド構造を求め、レーザー誘起による PSB 間の反転に起因して、量子井戸の表面端の1次元バンド構造にディラック交差の PSB 列が発現（トポ秩序が発現）するかどうか、さらにはトポ相転移の制御の可能性を調べる。そのため、任意の強度・周波数を有するレーザー照射に対して、バンド内結合、バンド間結合 (ac-ゼナー効果、ac-シュタルク効果、ラビ分裂) および電子間クーロン相互作用を取り込むフロケ理論を構築する。
- ・フロケトポ絶縁体は非平衡系であるため、この系は現象論的に非エルミート Hamiltonian により記述できるとみなし得る。これに基づき、複素エネルギーを有するエッジ状態（共鳴エッジ状態に対応）の発現可能性を追跡する。

(2) トポ励起子

- ・量子井戸 [非自明($d > d_{cr}$)とする] に生成する電子・正孔対は複合粒子である励起子を形成し、特徴的なスペクトル帯を示す。励起子状態は、離散エネルギー準位ごとに、対の並進自由度に起因

するバンド構造を形成する。トポ絶縁体と同様に、励起子バンド構造にバンド反転が生じれば、複合粒子状態のトポ秩序が形成されると考えられる。トポ絶縁体では価電子帯と伝導体のバンドが反転するが、トポ励起子ではどのようなバンドが反転し得るか不明である。従来の励起子バンド理論の範囲でこの問題を解決することは困難なので、トポ励起子まで普遍化した新規なバンド理論を構築し、トポ秩序形成の詳細を理解する。

(3) トポポラリトン

- ・トポ励起子と光子が空洞内に閉じ込められると、これらの連成波（複合粒子状態）であるトポポラリトンが作られる。ポラリトン分散は、励起子・光子バンドが混合した上下分岐によって構成されるので、トポポラリトンのバンド構造はトポ励起子のバンド構造より一層複雑になる。このトポ秩序を理解するために、前記のトポ励起子のバンド理論を拡張した枠組みを構築する。
- ・光子数（強度）の変化に応じて励起子・光子結合の大きさも変わるので、上下分岐のバンド間反発（真空ラビ分裂）の大きさも変化し、トポポラリトンのバンド反転にもこれが反映する。光子数によってトポ秩序がいかに制御できるかを調べる。
- ・励起子は光捕集性に優れた特性を有している。自明および非自明なポラリトン間の励起子発光特性の相違を調べ、トポポラリトンの特徴を追究する。特に、トポ秩序は時間反転対称性で保護された擾乱に対して頑強であるため、発光の線幅が極めて小さい良質の光源になると期待される。

3. 研究方法

（随時記載）

4. 結果および考察

（随時記載）