

固体電子系における光電場駆動アト秒ダイナミクスの理論

理学研究科物理学専攻 今井渉平

レーザー光の高強度化に伴い、電子系の超高速現象はフェムト秒からアト秒の時間領域で観測されるようになった。特に、光の電場振幅が物質中の電子が感じる Coulomb 電場に匹敵する大きさに達したことで、光電場振動の一周期以内(サブサイクル)で電子が素早く応答する現象が起きるようになった。このサブサイクル非平衡ダイナミクスは光電場駆動ダイナミクスと呼ばれ、高次高調波発生[1]等の多くの超高速現象をもたらす。近年ではテラヘルツ波発生技術やパルス波形整形技術の発展により、固体の高次高調波発生の観測が多く報告されることとなり、多様な電子物性との関わりが議論されている。一方、固体からサブフェムト秒パルスを発生させる研究はいまだ発展途上であり、発生する光の時間波形を決定する微視的機構については明らかでないことが多い。そこで本研究では、光電場駆動された固体電子の微視的量子ダイナミクスと発生する光パルスの中に成立する関係の解明を目的とした。特に共鳴励起パルスを用いてエネルギー選択的に電子状態を用意し、その状態が光電場駆動によってどのような光パルスを発生させるのかを考察した。

バンド絶縁体を記述する二軌道強束縛モデルを用いて、図1の黒線で示した電場パルスを照射したとき、同図青線のような電流密度の時間波形が得られた。非対称な波形を持つ励起パルスと強い振幅を持つ電場パルスを順に照射することにより、光照射後新たに励起光の波形を反転させた電流の振動が現れることがわかった。詳細な解析計算によりこの時間反転光放射が、電子正孔対の波束の衝突によって記述できることを示した。これは従来のスピンエコー等とは異なるエコー現象であり、区別のため「エネルギーバンドエコー」と呼称する[2]。

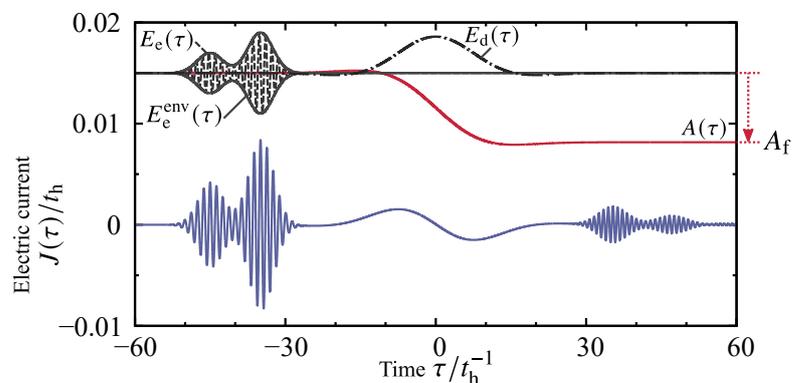


図1 非対称パルス励起と光電場駆動によるエコー電流発生。一次元バンド絶縁体において数値的に計算。上部黒線は入射電場波形、赤線はそのベクトルポテンシャル。

このほか、強相関 Mott 絶縁体を対象とした同様の解析により、エネルギーバンドエコースペクトルからこれまでの標準的測定手法では観測の困難であった多体準粒子のエネルギーと運動量の関係を可視化できることを示した[2]。これらの結果を踏まえ、トンネル励起された電子正孔対の光電場制御により、様々な固体電子系において Fourier 限界に迫るアト秒パルスを発生させる方法の考案にもつながった。以上の成果が固体アト秒科学の基礎となり、物質科学の多様性と合わせた相乗的な発展につながることを期待している。

[1] Shohei Imai, Atsushi Ono, and Sumio Ishihara, Phys. Rev. Lett. **124**, 157404 (2020).

[2] Shohei Imai, Atsushi Ono, and Sumio Ishihara, Phys. Rev. Res. **4**, 043155 (2022).