

大森 賢治

自然科学研究機構・分子科学研究所・光分子科学研究領域・研究主幹・教授

アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御

## §1. 研究実施体制

### (1)「大森」グループ

- ① 研究代表者: 大森 賢治 (自然科学研究機構・分子科学研究所・光分子科学研究領域、研究主幹／教授)
- ② 研究項目
  - ・研究全体の統轄
  - ・超高速量子シミュレーターの開発とバルク固体コヒーレント制御への応用
  - ・アト秒精度のバルク固体コヒーレント制御(中村グループと共同)
  - ・デコヒーレンス制御技術の開発

### (2)「中村」グループ

- ① 主たる共同研究者: 中村 一隆 (東京工業大学応用セラミックス研究所、准教授)
- ② 研究項目
  - ・アト秒精度のバルク固体コヒーレント制御(大森グループと共同)
  - ・アト秒精度のバルク固体コヒーレント制御のための予備実験と検出系の開発

### (3)「萱沼」グループ

- ① 主たる共同研究者: 萱沼 洋輔 (大阪府立大学21世紀科学研究機構、特認教授)
- ② 研究項目
  - ・凝縮系のアト秒コヒーレント制御理論の構築

## §2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

### ・リュードベリ電子波束間相互作用の原子数密度依存性の観測

量子シミュレーター班は、光格子中の冷却 **Rb** 原子にピコ秒光パルス照射してリュードベリ電子波束を発生させ、その空間広がり加工してサイト間相互作用を制御することを目指している。これまでに、次年度導入予定の光格子の格子間隔と同程度の平均原子間距離を有する光双極子トラップを準備し、そこに捕獲された高密度 **Rb** 原子集団に励起されるリュードベリ電子波束の時間発展を観測する実験系を構築してきた。また、フィールドイオン化とダブルパルスを利用したラムゼー干渉型の測定系を構築し、量子干渉信号に原子数密度に応じた位相シフトが生じることを観測してきた。密度を変えることで、リュードベリ電子波束間の相互作用を制御することに成功している。今年度は、実験と並行して準備している **Guido Pupillo** 教授 (**Strasbourg** 大学)らによる理論モデルとの比較に向けて、システムの定量的評価と最適化を試みた。準位選択的イオン化を導入して、波束を構成する各固有状態においても量子干渉を測定し、位相シフト量がリュードベリ準位の主量子数、原子密度、ダブルパルス間の遅延時間に依存することを観測した。励起パルスのスペクトルを削るパルス整形技術を新たに導入することによって、波束に含まれる固有状態の数を制限し、ほぼ単一固有状態の励起も可能となった。そして単一固有状態においても量子干渉信号に位相シフトが生じることを観測した。今後、このような状態数の少ない波束の相互作用下でのダイナミクスについて理論モデルを考案し、システムをより定量的に評価する予定である。また、並行してボーズアインシュタイン凝縮を生成して光格子に導入し、光格子原子結晶の作成を行う。

### ・超伝導物質の超高速ダイナミクスの研究

鉄系超伝導物質の  $\text{FeTe}_{0.75}\text{Se}_{0.25}$  の超伝導転移温度以下 ( $\sim 9\text{K}$ ) での、キャリアフォノンダイナミクスをフェムト秒過渡反射率測定により計測した。コヒーレント振動からは  $4.5\text{THz}$  の  $A_{1g}$  フォノンが観測され、寿命が  $0.62\text{ps}$  と求められた。また、光励起キャリアの寿命が  $1.2\text{ps}$  と求められた。測定結果から、電子-フォノン結合定数を  $\lambda \sim 0.12$  と見積もることができた。またこの結合定数とマクミランの式を用いて、超伝導転移温度の上限を計算すると実際の転移温度  $13\text{K}$  よりも1桁以上小さい値となり、この超伝導機構が **BSC** 理論では説明できないことが示唆された。

### ・トポロジカル絶縁体のフォノンキャリアダイナミクスの研究

トポロジカル絶縁体である  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  単結晶におけるフォノンダイナミクスを、フェムト秒過渡反射率計測により測定した。過渡反射率測定に **Electro-Optic** 測定法を用いることで、等方的振動モードの **A** 対称振動のコヒーレント振動を抑え、非対称振動の **E** モードのコヒーレン

ト振動を選択的に検出することに成功した。検出に成功したのは、 $E_g^2$  モードの振動で、振動数 3.9THz、寿命 1.5ps と求めることができた。

- 半導体における準粒子の発生と計測および制御

極性半導体にフェムト秒レーザーを照射すると、コヒーレントフォノン振動に加えて、フォノンとプラズモンの結合したモード(LOPC)のコヒーレント振動が誘起される。P-型 InP の場合には、LOPC の寿命が非常に短く、通常的时间領域分光計測ではフォノン振動に隠れてしまい計測できない。本研究では位相制御したフェムト秒パルス列を照射することで、フォノンのコヒーレント振動を打ち消すことで、LOPC のコヒーレント振動だけを選択的に計測する事に成功した。その結果、振動周期が 139fs に対して、寿命が 113fs と非常に短いことを見いだした。

- 振動外場によるブロッホ粒子の量子ダイナミクス制御理論

空間的周期ポテンシャル中の粒子(結晶電子など)に一樣外場が加えられたとき、自由空間での運動とは異なり、粒子は位置と運動量の双方で振動を繰り返す。これはブロッホ振動と呼ばれる巨視的量子現象である。ブロッホ振動の研究は、光学格子中の冷却原子による量子シミュレーター技術の進歩により近年、急速に進み、現在では数1000回におよぶコヒーレント振動が観測されている。現実の系では二つのブロッホバンドが接近するバンド端で、ブロッホ・ゼナー遷移と呼ばれるバンド間遷移が起こる。われわれはブロッホ粒子に振動的な外場が印加されたときに、ギャップが消失する Dynamical Band Gap Collapse の現象を理論的に予言したが、これを2バンドブロッホ・ゼナー系に適用し、量子力学的粒子の実時間運動を明らかにした。2バンド間の遷移は、二つの時間スケールでの2重ランダウ・ゼナー干渉効果[3]により記述でき、これを利用して遷移ダイナミクスのコヒーレント制御が可能であることを見出した[論文投稿済み]。

- アンダーソン局在と動的局在の競合

弱いランダムポテンシャルによるブロッホ粒子のアンダーソン局在は空間的な量子波の干渉による。一方、時間軸上の振動的な外場により動的局在(dynamic localization)と呼ばれる現象が起きることが光学格子中の冷却原子で確認されている。われわれはこの両方が共存する場合のダイナミクスを、散乱問題ととらえ Floquet-Lippmann-Schwinger の散乱方程式により解析した。その結果、アンダーソン局在により完全反射が起きる場合でも、振動外場により有意な透過確率が回復することを見出した[投稿準備中]。これは二つの異なるタイプの破壊的干渉効果の相殺によるものと理解できる。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

1. N. Norimatsu, J. Hu, A. Goto, K. Igarashi, T. sasagawa, and K. G. Nakamura, “Coherent optical phonons in Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> single crystal measyred via transient anistropic reflectivity”, Solid State Commun., vol. 157, pp. 58-61, 2013 (DOI: 10.1016/j.ssc.2012.12.023)
2. J. Hu, O. V. Misochko, A. Goto, and K. G. Nakamura, “Delayed formation of coherent LO phonon-plasmon coupled modes in GaAs unveiled by femtosecond coherent control technique”, Phy. Rev. B 86, 235146 (6 pages), 2012 (DOI: 10.1103/PhysRevB.86.235145).
3. Y. Mizumoto and Y. Kayanuma, “Role of a Nontrivial Quantum Phase in the Dynamical Band Gap Collapse”, Phys. Rev. A 86, 035601 (4 pages) (2012). (DOI: 10.1103)